

Untersuchung des Betons von Uferschutzbauten auf Helgoland

Von F. W. Locher, Düsseldorf

Übersicht

Von sieben Betonblöcken aus den Jahren 1916 und 1938, die als Wellenbrecher vor der West- und der Südmole von Helgoland liegen, wurden Bohrkerne entnommen und untersucht. Dabei wurden Art und Menge des Bindemittels, Art und Kornzusammensetzung der Zuschlagstoffe und die Roh- und Reindichten ermittelt. Durch Füllen des Kapillarporenraumes mit Tetrachlorkohlenstoff ergaben sich Anhaltswerte für den ursprünglichen Wasserzementwert. Um die Wirkung des Meerwasserangriffs zu beurteilen, wurde der Beton in verschiedenen Abständen von der Oberfläche chemisch, mikroskopisch und röntgenographisch untersucht. Dabei ergab sich, daß der Beton von 1916 zwischen 210 und 290 kg Zement je m³ enthält, daß der Wasserzementwert etwa 1,0 beträgt und daß das Zuschlaggemisch reich an Feinsand ist. Der Beton ist daher wenig dicht. Der Beton von 1938 enthält demgegenüber zwischen 360 und 420 kg Zement je m³ bei einem Wasserzementwert um 0,5 und einer besonders guten Kornzusammensetzung der Zuschlagstoffe. Das Meerwasser hat auch den weniger dichten Beton aus dem Jahr 1916 nur verhältnismäßig schwach angegriffen, kenntlich daran, daß sich von der Oberfläche der Blöcke aus Hüttenzement der Feinmörtel ablöst, während sich an den Blöcken aus Portlandzement die Ecken und Kanten abrunden. Magnesium- und Sulfationen sind in den Beton nur bis zu 2 cm, Chloridionen in den weniger dichten Beton von 1916 zum Teil mindestens bis zu 5 cm, in den dichten Beton von 1938 wahrscheinlich höchstens bis zu 3 cm tief eingedrungen. — Die Ergebnisse zeigen, daß dichter Beton gegenüber Meerwasser beständig ist. Bei Stahlbeton ist eine Überdeckung der Bewehrung von mindestens 5 cm erforderlich, da sonst durch eindringendes Chlorid der Rostschutz des Stahls gefährdet ist.

1. Einleitung

Die Betonbauten auf Helgoland und die Betonblöcke, die dem Schutz der Küste und des Hafens dienen und über deren Zustand hier berichtet wird, sind zum Teil über 50 Jahre, mindestens aber 29 Jahre alt. Sie können daher Aufschluß über die Wirkung eines langzeitigen Meerwasserangriffs auf Beton geben. Aus diesem Grund wurden die Bauten wiederholt besichtigt und der Beton

untersucht [1, 2]. Die letzte Besichtigung durch Fachleute aus der deutschen Zementindustrie fand im Einvernehmen mit dem Wasser- und Schiffsamt in Tönning am 27. Mai 1964 statt. Dabei wurde vereinbart, daß Proben aus einigen Betonbauwerken entnommen und im Forschungsinstitut der Zementindustrie eingehender untersucht werden sollten, um über das Verhalten von Beton im Meerwasser weiteren Aufschluß zu erhalten.

2. Betonproben

Vor der Westmole liegen als Wellenbrecher würfelförmige Blöcke mit einer Kantenlänge von etwa 1,5 m. Die tiefergelegenen Blöcke werden auch bei Tide-Niedrigwasser vom Wasser überspült, die höhergelegenen Blöcke erreicht der Wellengang nur bei Tide-Hochwasser. Aus den auf der Oberfläche eingeritzten Daten und aus Angaben von A. Eckhardt [3] geht hervor, daß die Blockvorlage im Herbst 1916 fertig geworden ist. Es war daher zu erwarten, daß der Beton der Blöcke nach etwa 50 Jahren die Wirkung des Meerwasserangriffs besonders deutlich erkennen lassen würde.

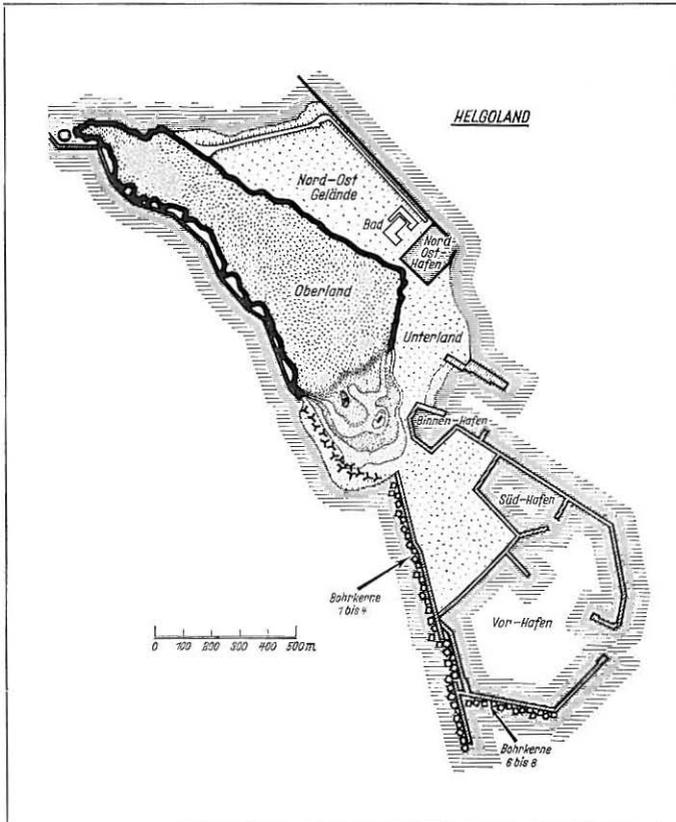


Bild 1 Plan von Helgoland mit den Entnahmestellen der Bohrkerne

Für die Untersuchung wurden vier der höhergelegenen Blöcke ausgewählt, von denen nach Augenschein zwei Portlandzement und zwei Hochofenzement als Bindemittel enthalten. Aus jedem der vier Betonblöcke wurden zwei Bohrkerne entnommen. Die Lage der Bohrkerne in bezug auf die Lage des Blocks bei der Herstellung konnte nicht ermittelt werden. Die vier Blöcke wurden mit den Zahlen von 1 bis 4, die zugehörigen Parallelproben jeweils mit a und b gekennzeichnet (Bild 1).

Die Südmole wird durch vorgelagerte quaderförmige Betonblöcke mit einem Gewicht von etwa 30 t geschützt. Die Blöcke wurden im Jahr 1938 hergestellt, lagen zunächst unter Wasser vor dem Inseldamm Nord, seit etwa 10 Jahren oberhalb des Höchstwasserstandes vor der Südmole und werden jetzt nur noch bei Sturmfluten überspült. Aus 3 Blöcken, bezeichnet mit 6, 7 und 8 (Bild 1), wurden je 2 mit a und b gekennzeichnete Bohrkerne entnommen. Auch in diesem Fall war es nicht möglich, die Lage der Bohrkerne in bezug auf die Lage des Blocks bei der Herstellung zu ermitteln. Alle Bohrkerne wurden in der Zeit vom 15. bis zum 20. Oktober 1964 entnommen. Bei einer einheitlichen Länge von etwa 25 cm hatten die Bohrkerne 1 bis 4 einen Durchmesser von 15 cm und die Bohrkerne 6 bis 8 einen Durchmesser von 10 cm.

3. Art der Untersuchungen

3.1 Eigenschaften des Betons

An den Betonkernen wurden folgende Prüfungen ausgeführt:

Die *Zementart* wurde mikroskopisch an Dünnschliffen festgestellt.

Der *Zementgehalt* wurde in der üblichen Weise durch Auflösen des Bindemittels in verdünnter Salzsäure (1 : 10) und Wägen der nicht gelösten Zuschlagstoffe bestimmt. Abweichend von der DIN-Vorschrift [4] wurde jedoch der grob zerkleinerte Beton durch Sieben in die Fraktionen kleiner als 1 mm, 1 bis 3 mm, 3 bis 7 mm, 7 bis 15 mm und größer als 15 mm zerlegt, aus denen dann, ihrem Gewichtsanteil entsprechend, Durchschnittsproben für die verschiedenen Untersuchungen zusammengesetzt wurden. Um das Auflösen des Bindemittels in der Salzsäure zu beschleunigen, wurden die beiden feinen Fraktionen kleiner als 1 mm und 1 bis 3 mm von den gröberen Fraktionen getrennt mit Säure behandelt [5].

Nach mikroskopischen Untersuchungen enthält der Zuschlag aller Bohrkerne mit Ausnahme der Probe 1 b kleine Mengen Kalkstein, der sich in der verdünnten Salzsäure löst und infolgedessen den als Bindemittel bestimmten Anteil erhöht. Da jedoch die Proben weniger als 2 % CO₂ und dementsprechend weniger als 5 % CaCO₃ enthalten, ist der dadurch hervorgerufene Fehler verhältnismäßig klein. Bei der Besprechung der Ergebnisse wird darauf näher eingegangen.

Der *W/Z-Wert* wurde nach dem von A. W. Brown [6] angegebenen Verfahren bestimmt. Dabei geht man davon aus, daß das Anmachwasser, soweit es nicht mit dem Zement reagiert hat, ursprünglich die Kapillarporen ausgefüllt hat. Aus diesem Grund ermittelt man den Kapillarporenraum des getrockneten Betons aus dem Gewicht

der im Vakuum aufgenommenen Tetrachlorkohlenstoffmenge, errechnet daraus die Wassermenge, die ursprünglich den Kapillarporenraum bildete, und addiert das im Zementstein des getrockneten Betons gebundene Wasser. Dabei ist das bei der Carbonatisierung des Betons entweichende Wasser zu berücksichtigen.

Über die Zuverlässigkeit dieser Prüfung liegen noch keine Erfahrungen vor. Insbesondere wäre es nötig, das Volumen der nach der Verdichtung des Frischbetons noch verbliebenen Luftporen zu berücksichtigen, falls sie ebenfalls mit Tetrachlorkohlenstoff gefüllt werden. Brown gibt an, daß sie sich unter den Bedingungen der Prüfung nicht mit Tetrachlorkohlenstoff füllen lassen. Dagegen wurde jedoch bei anderen Untersuchungen festgestellt, daß das Verfahren bei Beton mit höheren Luftporengehalten zu hohe W/Z -Werte liefert.

An den *Zuschlagstoffen* wurden nach dem Herauslösen des Bindemittels mit verdünnter Salzsäure die mineralogische Beschaffenheit und die Kornzusammensetzung bestimmt.

Die *Rohdichte* des Betons wurde durch Wägen der bei $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ getrockneten Probe an der Luft und der wassergetränkten Probe an Luft und im Wasser bestimmt.

Die *Reindichte* des Betons wurde an den auf unter $0,2\text{ mm}$ Korngröße zerkleinerten und bei $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ getrockneten Durchschnittsproben im Pyknometer mit *n*-Heptan als Pyknometerflüssigkeit bestimmt.

Der *Porenraum* wurde aus den Roh- und Reindichten errechnet nach der Formel

$$\text{Porenraum} = \left(1 - \frac{\text{Rohdichte}}{\text{Reindichte}}\right) \cdot 100$$

Zur Prüfung der *Druckfestigkeit* wurden aus den Bohrkernen etwa 15 cm lange zylindrische Prüfkörper herausgesägt und deren Stirnflächen mit einer Schleifmaschine plangeschliffen.

3.2 Einwirkung des Meerwassers

Das Meerwasser hat bei Helgoland einen Salzgehalt von rund $33\,000\text{ mg/l}$ und enthält dementsprechend in einem Liter

$$\begin{aligned} &18\,200\text{ mg Cl}^- \\ &2\,550\text{ mg SO}_4^{2-} \\ &1\,220\text{ mg Mg}^{2+} \end{aligned}$$

Mit den Bestandteilen des erhärteten Zements reagieren in erster Linie die Sulfat- und Magnesiumionen. Das Chlorid greift den Beton praktisch nicht an, es kann jedoch den Korrosionsschutz der Bewehrung beeinträchtigen.

Über die Wirkung des Meerwasserangriffs auf Beton gibt zunächst die äußere Beschaffenheit der Blöcke Aufschluß. Darüber hinaus wird der Fortschritt des Angriffs erkennbar, wenn man einzelne Schichten des Betons getrennt untersucht. Aus diesem Grund wurden die Bohrkern durch Aufspalten zwischen zwei Schneiden der Länge nach in vier Teile geteilt und ein Viertel, von der Oberfläche beginnend, in 1 cm dicke Scheiben zersägt. An den zerkleinerten Scheiben wurden chemisch-analytisch MgO , Cl , SO_3

sowie der unlösliche Rückstand, das Wasser und die Kohlensäure bestimmt. Außerdem wurde durch vorsichtiges Zerkleinern im Achatmörser und Absieben des Feinanteils das Bindemittel angereichert, das dann röntgenographisch auf seine Phasenzusammensetzung hin untersucht wurde.

4. Ergebnisse

4.1 Beschaffenheit des Betons

4.1.1 Gefüge

Einen ersten Überblick über das Grobgefüge des Betons vermitteln schon die in den Bildern 2 a bis g wiedergegebenen Sägeschnittflächen durch die Bohrkern. Sie zeigen, daß sich die vier Betonproben aus dem Jahr 1916 untereinander wesentlich unterscheiden. Der Bohrkern 1 a enthält deutlich weniger Feinmörtel und weniger Poren als die Betonproben 2 b, 3 b und 4 a. Ein erheblich dichteres Gefüge weist der Beton aus dem Jahr 1938 auf (Proben 6 a, 7 a und 8 a).

4.1.2 Zuschlagstoff

Die Zuschlagstoffe aller untersuchten Betone bestehen hauptsächlich aus Sandstein, Quarzit und Tonschiefer. In geringeren Mengen wurde auch Hornstein (Flint) festgestellt. Salzsäurelösliche carbonatische Zuschläge (Kalkstein) finden sich in kleinen Mengen in fast allen Proben, sie fehlen nur in den Bohrkernen 1 und 6. Ihr Einfluß auf die Bestimmung des Zementgehalts wird in Abschnitt 4.1.3 näher beschrieben.

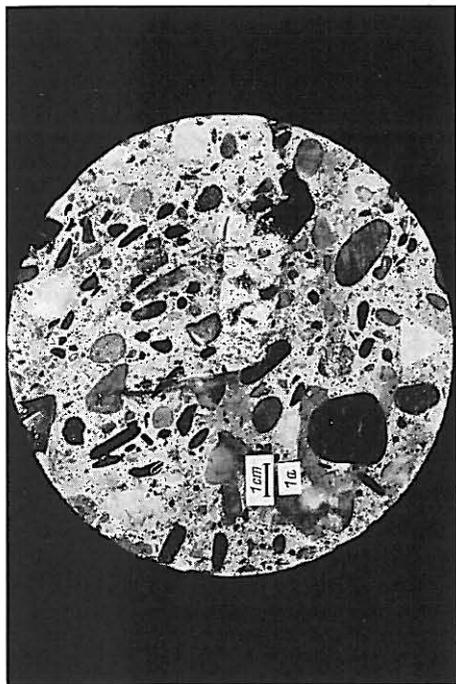
Die Kornzusammensetzung der Zuschlagstoffe gibt Bild 3 wieder. Daraus geht hervor, daß die Zuschläge in den alten Betonen aus dem Jahr 1916 (Bohrkerne 1 bis 4) einen hohen Anteil an Feinsand bis 1 mm Korngröße aufweisen, während der Zuschlag des Betons aus dem Jahr 1938 wesentlich weniger Feinsand enthält. Die Sieblinien liegen dementsprechend bei dem Beton von 1916 im „brauchbaren“ Bereich, bei dem Beton von 1938 im „besonders guten“ Bereich nach Bild 2 der DIN 1045.

4.1.3 Zementart, Zementgehalt und Wassermenge

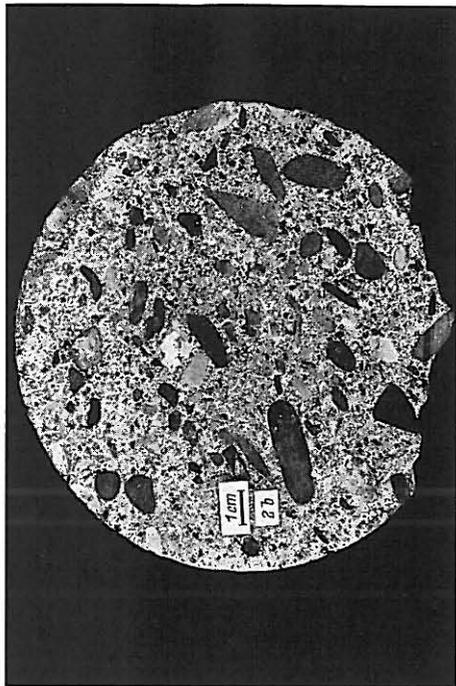
Aus den in Tafel 1 zusammengestellten Ergebnissen geht hervor, daß in Übereinstimmung mit der Feststellung bei der Probenahme von den vier untersuchten Betonblöcken aus dem Jahr 1916 die Blöcke 1 und 3 Portlandzement und die Blöcke 2 und 4 Hüttenzement enthielten. In den vier weiteren Betonproben 6 bis 8 aus dem Jahr 1938 wurde als Bindemittel nur Hüttenzement nachgewiesen.

Die Zementgehalte sind in den Bohrkernen 1 bis 4 aus den Betonblöcken von 1916 mit 210 bis 290 kg/m³ verhältnismäßig niedrig. Besonders hohe Zementgehalte von 380 bis 450 kg/m³ wurden in den Bohrkernen 6 bis 8 der Blöcke aus dem Jahr 1938 gefunden. Die W/Z-Werte sind dementsprechend bei den alten Betonproben 1 bis 4 mit 0,9 bis 1,1 sehr hoch, bei den jüngeren Proben 6 bis 8 mit 0,3 bis 0,4 außerordentlich niedrig.

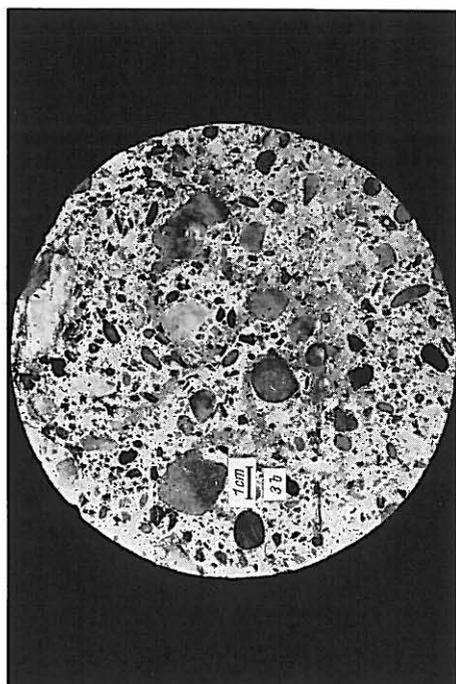
Bei der Bestimmung des Zementgehalts durch Lösen mit verdünnter Salzsäure ist der Anteil an säurelöslichen carbonatischen



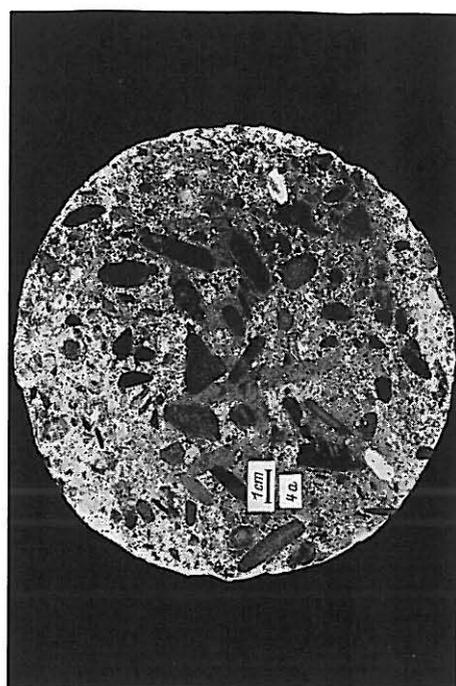
a



b



c



d

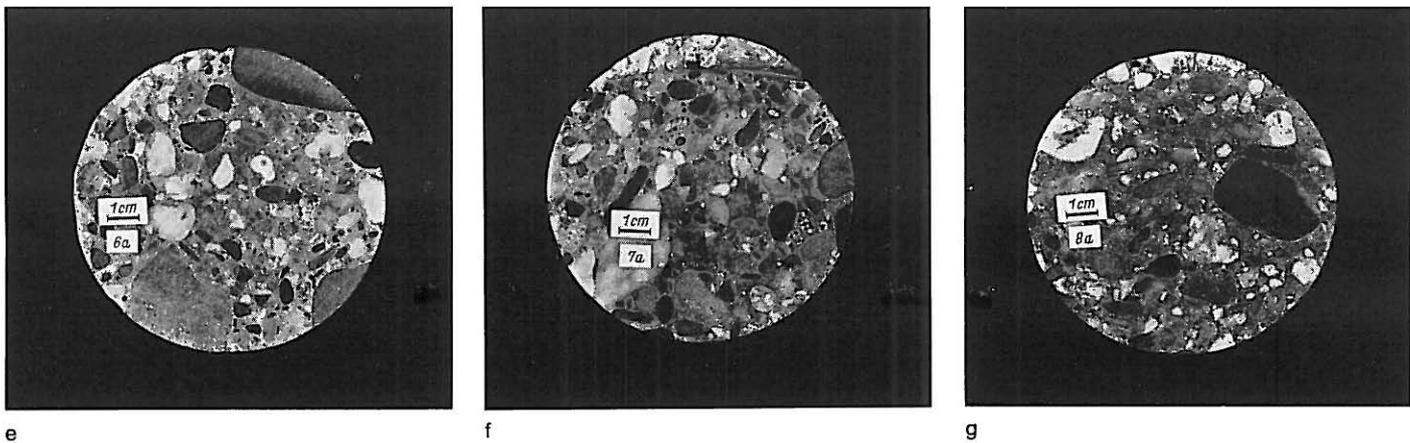


Bild 2 Sägeschnittflächen der Bohrkern
Bohrkerne a bis d aus dem Jahr 1916, Bohrkern e bis g aus dem Jahr 1938

Tafel 1 Zusammensetzung und Eigenschaften des Betons

Bohrkern Nr.	Herstel- lungsjahr	Zement- art	Zement- gehalt	W/Z	CO ₂ -Gehalt	Rohdichte	Reindichte	Porenraum	Druckfestig- keit
			kg / m ³	–	%	kg/dm ³	kg/dm ³	Raum-%	kp / cm ²
1 b	1916	PZ	290	0,9	0,29	2,24	2,52	11	360
2 a		HZ	250	0,9	0,88	2,13	2,52	15	250
3 b		PZ	210	1,1	0,60	2,15	2,56	16	290
4 a		HZ	240	0,9	1,35	2,16	2,54	15	240
6 a	1938	HZ	380	0,4	0,86	2,34	2,55	8	660
7 b		HZ	450	0,3	1,69	2,30	2,55	10	680
8 a		HZ	440	0,4	0,70	2,33	2,54	9	750

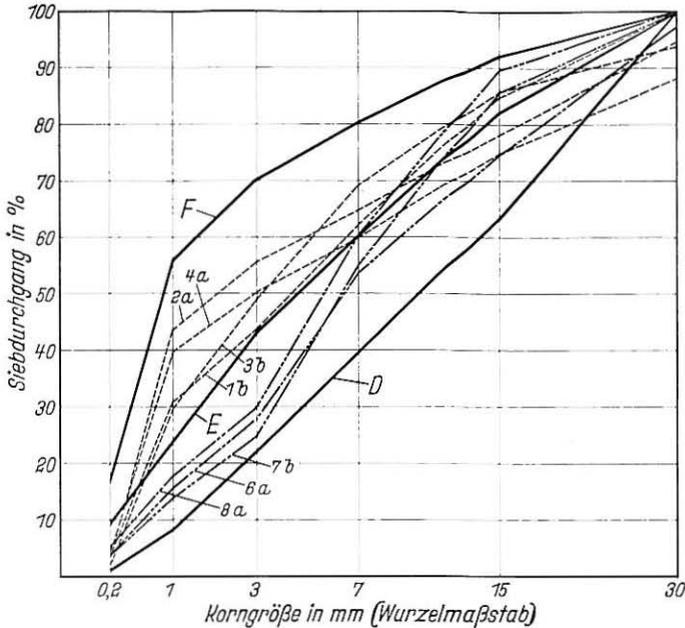


Bild 3 Kornzusammensetzung der Zuschlagstoffe

Zuschlägen zu berücksichtigen. Die Mengen sind jedoch nur sehr gering, wie aus den niedrigen CO_2 -Gehalten von 0,29 bis 1,69 % (Tafel 1) hervorgeht. Nimmt man an, daß 0,3 % CO_2 aus der carbonatisierten Randzone stammen, so beträgt der CO_2 -Gehalt aus dem carbonatischen Zuschlag im Höchstfall (Bohrkern 7 b) 1,4 % und der CaCO_3 -Gehalt dementsprechend höchstens etwas über 3 %. Unter Berücksichtigung dieser Gehalte ergeben sich für den Zementgehalt und den Wasserzementwert die in Tafel 2 zusammengestellten Werte. Aus einem Vergleich mit den entsprechenden Werten in Tafel 1 geht hervor, daß sich dadurch der Zementgehalt bei der Probe 7 b mit dem höchsten CO_2 -Gehalt von 1,69 % um 40 kg/m^3 , bei der Probe 3 b mit einem niedrigen CO_2 -Gehalt von 0,60 % um etwa 10 kg/m^3 vermindert. Der W/Z-Wert erhöht sich dementsprechend im Höchstfall um 0,2.

Nach Angaben von A. Eckhardt [1] beträgt bei den Blöcken aus dem Jahr 1916 das Mischungsverhältnis 1:4 nach Raumteilen, entsprechend etwa 1:5 nach Gewichtsteilen. Legt man eine mittlere Rohdichte von $2,2 \text{ kg/dm}^3$ und einen Gehalt an gebundenem Wasser von 25 % des Zementgewichts zugrunde, so ergibt sich daraus ein Zementgehalt von 350 kg/m^3 . Dieser Wert wird nur im Bohrkern 1 b erreicht, der Beton der Bohrkern 2 a, 3 b und 4 a enthält jedoch mit 210 bis 230 kg/m^3 (Tafel 2) wesentlich weniger Zement als dem von Eckhardt angegebenen Mischungsverhältnis entspricht. Bei einer früheren Untersuchung, die K. Obenauer ausführte und deren Ergebnisse K. Seidel [2] mitteilte, wurde andererseits für einen der Blöcke aus dem Jahr 1916 ein erheblich

Tafel 2 Zementgehalt und Wasserzementwert der Betonproben unter Berücksichtigung des salzsäurelöslichen Kalksteinanteils in den Zuschlagstoffen

Bohrkern Nr.	Zementgehalt kg/m^3	W/Z
1 b	290	0,9
2 a	230	1,0
3 b	210	1,2
4 a	210	1,1
6 a	360	0,5
7 b	410	0,5
8 a	420	0,5

höherer Zementgehalt von 400 kg/m^3 und auch eine dementsprechend höhere Druckfestigkeit von 640 kp/cm^2 gefunden. Daraus und aus den in Tafel 2 zusammengestellten Werten geht hervor, daß die Blöcke aus dem Jahr 1916 aus sehr uneinheitlichem Beton bestehen.

4.1.4 Porenvolumen und Druckfestigkeit

Das Porenvolumen, aus Roh- und Reindichte errechnet und in Tafel 1 zusammengestellt, beträgt bei dem Beton von 1916 zwischen 11 und 16 %, im Mittel 14 %, bei dem Beton von 1938 zwischen 8 und 10 %, im Mittel 9 %. Bei einem Vergleich mit den Angaben von K. Walz [7] ist zu berücksichtigen, daß den oben angegebenen Werten eine mit n-Heptan als Pyknometerflüssigkeit bestimmte Reindichte zugrunde liegt, die eine um etwa 5 % geringere Porosität als die Reindichtebestimmung mit Wasser ergibt, auf die sich die Werte von K. Walz beziehen. Danach ist das Porenvolumen mit 9 % besonders günstig und entspricht auch mit dem Höchstwert von 16 % noch üblichem Beton mit 300 kg Zement je m^3 , einem Wasserzementwert von etwa 0,7 und einer Kornzusammensetzung der Zuschlagstoffe im „brauchbaren“ Bereich nach Bild 2 der DIN 1045.

Die Druckfestigkeit, in der letzten Spalte von Tafel 1 aufgeführt, liegt bei den Blöcken 2 bis 4 mit dem niedrigeren Zementgehalt von 210 bis 230 kg/m^3 (Tafel 2) bei 240 bis 290 kp/cm^2 , bei Block 1 mit dem höheren Zementgehalt von 290 kg/m^3 bei 360 kp/cm^2 . Der Beton der Blöcke 6 bis 8 mit höherem Zementgehalt, niedrigerem Wasserzementwert und einer „besonders guten“ Kornzusammensetzung der Zuschlagstoffe hat eine wesentlich höhere Druckfestigkeit von 660 bis 750 kp/cm^2 . Die Festigkeit dürfte demnach bei dem Beton von 1916 einem B 120 bis B 160 und bei dem Beton von 1938 mindestens einem B 300 entsprechen haben.

4.1.5 Beurteilung des chemischen Widerstands

Als hinreichend widerstandsfähig gegenüber dem starken chemischen Angriff des Meerwassers gilt ein dichter Beton mit günstig

zusammengesetztem Zuschlaggemisch, ausreichend hohem Zementgehalt und damit auf höchstens 0,50 begrenztem Wasserzementwert [8]. Der Beton aus dem Jahr 1916 entspricht nicht dieser Bedingung, da er verhältnismäßig wenig Zement enthält, und zwar im Mittel etwa 250 kg/m^3 , das Zuschlaggemisch sehr sandreich ist und der Wasserzementwert zwischen 0,9 und 1,2 beträgt (Tafel 2). Demnach würde man ihm nur eine geringe Widerstandsfähigkeit gegenüber chemischen Angriffen zuschreiben.

Der Beton aus dem Jahr 1938 weist demgegenüber einen hohen Zementgehalt von etwa 400 kg/m^3 auf, die Kornzusammensetzung seiner Zuschlagstoffe liegt im „besonders guten“ Bereich nach Bild 2 der DIN 1045, und der Wasserzementwert ist mit etwa 0,5 sehr niedrig. Er besitzt demnach auch starken chemischen Angriffen gegenüber eine hohe Widerstandsfähigkeit.

4.2 Einwirkung des Meerwassers

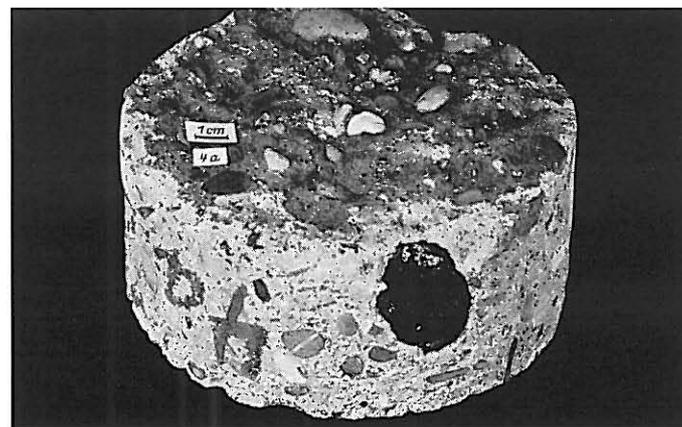
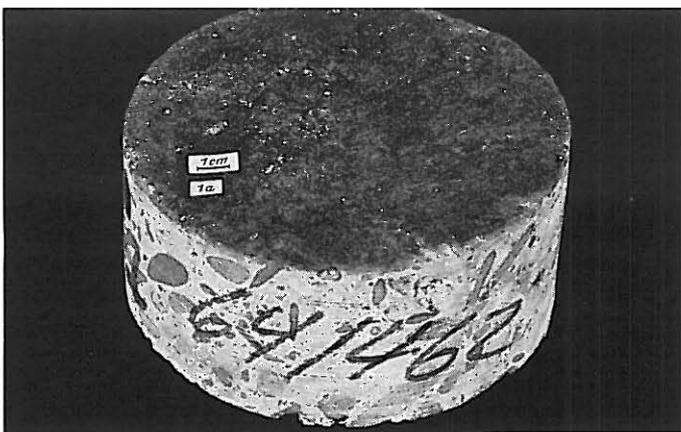
4.2.1 Veränderungen nach Augenschein

Über das Verhalten der Betonblöcke aus dem Jahr 1916 berichtet A. Eckhardt [1], daß bei einer Besichtigung im Jahr 1934 ein Teil der Blöcke „deutlich Angriffe vom Seewasser erkennen ließ“. Da sich die Beschaffenheit von Zement und Zuschlagstoffen während der Herstellung der Blöcke nicht geändert hatte und man annahm, daß auch der Zementgehalt gleich geblieben war, führte Eckhardt das verschiedene Verhalten auf einen ungleichmäßigen Wasserzusatz zurück. Im Gegensatz dazu geht jedoch aus Abschnitt 4.1.3 der vorliegenden Arbeit hervor, daß der Zementgehalt der Blöcke nicht einheitlich ist. Die Unterschiede in der Widerstandsfähigkeit lassen sich damit erklären.

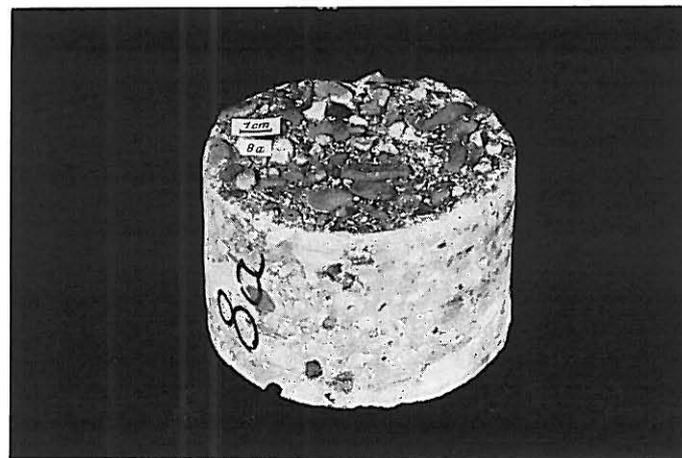
Bei der Beurteilung der äußeren Beschaffenheit ist zu berücksichtigen, daß die Betonblöcke durch Wellengang und Frosteinwirkung mechanisch angegriffen worden sind. Nach Beobachtung von A. Eckhardt [3] waren die Blöcke mit einem Gewicht von 10 bis 20 t noch zu leicht, so daß sie sich bei schwerer See bewegten und aneinander scheuerten. Bei der Besichtigung 1964 war festgestellt worden, daß die Betonblöcke des Jahres 1916 aus Portlandzement zwar an den Ecken und Kanten abgerundet sind und auch einige Risse aufweisen, daß aber die übrige Oberfläche noch unverändert ist, so daß das bei der Herstellung eingeritzte Datum noch erkennbar ist. Die Ecken und Kanten der Betonblöcke aus Hochofenzement sind praktisch noch vollständig erhalten, von der Oberfläche hat sich jedoch der Feinmörtel abgelöst, so daß die gröberen Zuschlagkörner frei liegen. Das geht auch aus den Bildern 4 a bis c hervor, die das äußere Ende der Bohrkerne zeigen.

4.2.2 Chemische und mineralogische Untersuchungen

Die Gehalte an Cl , SO_3 und MgO in den einzelnen Schichten mit verschiedenem Abstand von der Betonoberfläche sind in Tafel 3 zusammengestellt. Dabei handelt es sich um Prozentwerte, die sich auf den in Salzsäure löslichen, glühverlustfrei umgerechneten Bindemittelanteil beziehen. Trotz verhältnismäßig großer Schwankungen, die wahrscheinlich auch auf eine unterschiedliche Beton-



b



c

Bild 4 Äußeres Ende der Bohrkern
Bohrkerne a und b aus dem Jahr 1916, Bohrkern c aus dem Jahr 1938

zusammensetzung über den Querschnitt der Blöcke zurückzuführen sind, läßt sich feststellen, daß die Gehalte in oberflächennahen Schichten am höchsten sind. Im einzelnen ergab sich folgendes Bild:

Chlorid findet sich in allen Bohrkernen auch in den tieferen noch untersuchten Schichten. Die Gehalte erreichen bei den Proben 1 bis 4 erst in Tiefen über 5 cm, bei Probe 7 über 3 cm verhältnismäßig konstante Werte zwischen 0,6 und 2,5 % Cl. Unter der Annahme, daß als Anmachwasser Meerwasser verwendet worden ist, das bei Helgoland etwa 1,8 % Cl enthält, und kein Chlorid auf andere Weise in den Beton gelangt ist, läßt sich aus dem W/Z-Wert der Chloridgehalt des Betons berechnen (Tafel 3).

Daraus geht hervor, daß die tieferen Betonschichten zum Teil etwas mehr Chlorid enthalten, als die Rechnung über den Wasserzementwert ergibt. Da die Bestimmung des Wasserzementwertes verhältnismäßig ungenau ist und außerdem keine Angaben darüber vorliegen, ob bei der Betonherstellung Calciumchlorid zugesetzt worden ist, läßt sich nicht entscheiden, ob in den weniger dichten Beton von 1916 das Chlorid auch noch tiefer als 5 cm eingedrungen ist. Bei dem dichten Beton aus dem Jahr 1938 wird eine Eindringtiefe von 3 cm wahrscheinlich nicht überschritten.

Sulfat ist nur in der äußeren, 1 cm dicken Schicht von Probe 2 a deutlich angereichert. Eine schwächere Anreicherung in der Außenschicht läßt sich auch bei den Proben 1 b und 7 b feststellen. Die SO_3 -Gehalte in den tieferen Schichten aller Proben entsprechen etwa dem Sulfatgehalt der Zemente. Daraus geht hervor, daß das Sulfat des Meerwassers kaum tiefer als 1 bis 2 cm in den Beton eingedrungen ist.

Erhöhte *Magnesium*gehalte wurden ebenfalls nur in den Außenschichten festgestellt. Bei den Proben 2 a, 3 b und 4 a mit den niedrigsten Zementgehalten von 210 bis 250 kg/m³, verhältnismäßig hohen Porengehalten von 15 bis 16 Raumprozent und dementsprechend niedrigen Rohdichten von 2,13 bis 2,16 kg/dm³ sind die Anreicherungen bis auf 13 bis 15 % MgO besonders stark, bei den zementreicheren und dichteren Betonen 1 b und 7 b deutlich weniger stark ausgeprägt. Bei den Proben 2 a und 4 a geht der MgO-Gehalt erst in Tiefen von mehr als 4 cm, bei den anderen Proben schon etwa 2 cm unter der Betonoberfläche auf die für die entsprechenden Zemente typischen Werte zurück. Daraus ergibt sich die Schlußfolgerung, daß auch in mäßig dichten Beton die Magnesiumionen nur wenige Zentimeter tief eindringen und dort, wie die röntgenographischen und mikroskopischen Untersuchungen erkennen lassen, als Magnesiumhydroxyd und wahrscheinlich auch, wenn Chlorid zugegen ist, als basisches Magnesiumchloridhydrat mit der Formel $Mg_2(OH)_3Cl \cdot 2H_2O$ abgeschieden werden.

Die *röntgenographische* Untersuchung der Bohrkern 1 bis 4 ergab darüber hinaus, daß bei allen Proben die äußere, 1 cm dicke Oberflächenschicht weitgehend carbonatisiert ist und dementsprechend wenig oder kein Calciumhydroxyd enthält. Das Calciumcarbonat liegt in den Betonen aus Portlandzement (Proben 1 und 3) anscheinend ausschließlich in Form von Calcit vor. In den Hüttenzementbetonen tritt neben Calcit auch Vaterit, in

Probe 4 außerdem noch Aragonit auf. In einer Tiefe von mehr als 1 cm unter der Betonoberfläche findet sich kein Calciumcarbonat mehr. Als Sulfatverbindungen treten in allen 4 Betonproben Monosulfat $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ und Trisulfat $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ auf. Ihre Röntgeninterferenzen sind jedoch nur sehr schwach zu erkennen. Es ist damit zu rechnen, daß das SO_4^{2-} im Monosulfat teilweise durch 2Cl^- ersetzt ist.

Mikroskopisch wurde in allen Proben Trisulfat festgestellt, im Bohrkern 2 jedoch nur in der äußeren, carbonatisierten Schicht. Das Trisulfat ist in den Poren besonders stark angereichert und bildet dort zum Teil sphärolithische Aggregate oder rasenartige Auskleidungen. Die Trisulfatnadeln erreichen eine Länge von mindestens 0,5 mm. Es ist deutlich zu beobachten, daß die Betone aus Portlandzement mehr Trisulfat enthalten als die Betone aus Hüttenzement.

4.2.3 Beurteilung des Meerwasserangriffs und Folgerungen für die Praxis

Die Feststellungen haben ergeben, daß sich als Folge des Meerwasserangriffs von der Oberfläche der 50 Jahre alten Betonblöcke aus Hüttenzement der Feinmörtel ablöst, während sich an den Betonblöcken aus Portlandzement die Ecken und Kanten abdrücken. Die Veränderungen sind jedoch nicht sehr bedeutsam. Daraus geht hervor, daß das Meerwasser auch den weniger dichten Beton aus dem Jahr 1916 nur schwach angreift.

Von den angreifenden Bestandteilen des Meerwassers werden die Magnesiumionen weitgehend auf der Betonoberfläche in Form von Magnesiumhydroxyd abgeschieden, nur in weniger dichten Beton dringen sie einige Zentimeter tief ein. Das Sulfat reichert sich auch nur in der äußeren Schicht bis zu etwa 2 cm Tiefe an. Es liegt dort in Form von Monosulfat und Trisulfat vor. Eine zuverlässige Aussage über das Eindringen von Chloridionen ist nicht möglich, da alle Betone anscheinend mit Meerwasser angemacht worden sind und infolgedessen auch in tieferen Schichten Chlorid enthalten. Die Ergebnisse deuten jedoch darauf hin, daß das Chlorid in den weniger dichten Beton aus dem Jahr 1916 mindestens bis in eine Tiefe von 5 cm eingedrungen ist.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung stehen demnach im Einklang mit der Erfahrung, daß dichter Beton gegenüber Meerwasser beständig ist. Voraussetzung ist eine Kornzusammensetzung der Zuschlagstoffe im „besonders guten“ Bereich nach Bild 2 der DIN 1045, ein ausreichend hoher Zementgehalt und damit ein auf höchstens 0,50 begrenzter Wasserzementwert. Dem entspricht der Beton aus dem Jahr 1938. Für Stahlbeton sind diese Bedingungen für die Zusammensetzung besonders sorgfältig zu beachten, außerdem ist eine Betonüberdeckung der Bewehrung von mindestens 5 cm vorzusehen, weil sonst durch das eindringende Chlorid der Rostschutz des Stahls gefährdet ist.

5. Zusammenfassung

5.1 Im Oktober 1964 wurden auf Helgoland von verschiedenen Betonblöcken aus den Jahren 1916 und 1938, die als Wellen-

brecher vor der West- und der Südmole liegen, 12 Bohrkerne entnommen und daran das Verhalten des Betons im Meerwasser untersucht.

5.2 Mit chemischen und mikroskopischen Verfahren wurden Menge und Art des Bindemittels, Art und Kornzusammensetzung der Zuschlagstoffe und die Roh- und Reindichten ermittelt. Anhaltswerte für den ursprünglichen Wasserzementwert ergaben sich aus dem Kapillarporenraum des Betons, der sich im Vakuum mit Tetrachlorkohlenstoff füllen läßt. Zur Beurteilung des Meerwasserangriffs wurden die Bohrkerne parallel zur Betonoberfläche in 1 cm dicke Schichten zersägt, die chemisch, röntgenographisch und mikroskopisch untersucht wurden.

5.3 Der Beton der 4 Blöcke aus dem Jahre 1916 enthält zwischen 210 und 290 kg Portland- oder Hüttenzement je m^3 . Die Reindichte beträgt nach den Bohrkernen aus drei Blöcken 2,13 bis 2,16 kg/dm^3 , nach einem Bohrkern aus dem vierten Block 2,24 kg/dm^3 . Die Druckfestigkeit liegt nach 50 Jahren zwischen 240 und 360 kp/cm^2 . Das Zuschlaggemisch aus Sandstein, Quarzit, Tonschiefer und Hornstein (Flint) enthält 30 bis 45 % Sand bis 1 mm Korngröße, und der ursprüngliche Wasserzementwert beträgt etwa 1,0. Man würde danach erwarten, daß der Beton aus dem Jahr 1916 nur eine geringe Widerstandsfähigkeit gegenüber chemischen Angriffen besitzt.

Der Beton der Blöcke aus dem Jahr 1938 enthält 360 bis 480 kg Hochofenzement je m^3 , seine Rohdichte beträgt 2,30 bis 2,34 kg/dm^3 , seine Druckfestigkeit 660 bis 750 kp/cm^2 . Die Kornzusammensetzung seiner Zuschlagstoffe liegt im „besonders guten“ Bereich nach Bild 2 der DIN 1045, und der Wasserzementwert beträgt etwa 0,5. Er besitzt demnach eine hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber chemischen Angriffen.

5.4 Der chemische Angriff des Meerwassers erwies sich als verhältnismäßig schwach. Von der Oberfläche der 50 Jahre alten Betonblöcke aus Hüttenzement löst sich nur der Feinmörtel bis in rd. 5 mm Tiefe ab, während sich an den Blöcken aus Portlandzement die Ecken und Kanten abrunden. Die angreifenden Bestandteile des Meerwassers dringen auch in den weniger dichten Beton aus dem Jahr 1916 nicht weit ein. Das ist daran zu erkennen, daß sich MgO und SO_3 nur in einer etwa 1 cm dicken Oberflächenschicht angereichert haben. Für den weniger dichten Beton aus dem Jahr 1916 wurden dort MgO -Gehalte von über 13 % und SO_3 -Gehalte bis zu 8 % festgestellt, bezogen auf das glühverlustfreie Bindemittel. Der Chloridgehalt beträgt in den äußeren Schichten bis zu einer Tiefe von 5 cm 0,7 bis 3,4 %, in den tiefsten noch untersuchten Schichten 0,6 bis 2,5 %. Da anzunehmen ist, daß der Beton mit Meerwasser angemacht worden ist, läßt sich nicht entscheiden, ob Chlorid in den weniger dichten Beton von 1916 tiefer als 5 cm eingedrungen ist. Bei dem dichten Beton von 1938 wird eine Eindringtiefe von 3 cm wahrscheinlich nicht überschritten.

5.5 Die Untersuchungen haben gezeigt, daß dichter Beton gegenüber Meerwasser beständig ist. Voraussetzung dafür ist ein gün-

stig zusammengesetztes Zuschlaggemisch, ein ausreichend hoher Zementgehalt und damit ein auf höchstens 0,50 begrenzter Wasserzementwert. Das gilt insbesondere für Stahlbeton, bei dem außerdem eine Betonüberdeckung der Bewehrung von mindestens 5 cm vorzusehen ist, da sonst durch eindringendes Chlorid der Rostschutz des Stahls gefährdet ist.

SCHRIFTTUM

- [1] Eckhardt, A., und W. Kronsbein: Versuche über das Verhalten von Beton und Zement im Seewasser. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, H. 102, Wilh. Ernst & Sohn, Berlin 1950.
- [2] Seidel, K.: Beton in chemisch angreifenden Wässern. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, H. 134, Wilh. Ernst & Sohn, Berlin 1959.
- [3] Eckhardt, A.: Über den Bau des Hafens in Helgoland. Die Bautechnik 7 (1929) H. 37, S. 549/565.
- [4] DIN 52 170: Mischungsverhältnis und Bindemittelgehalt von erhärtetem Mörtel und Beton.
- [5] Bowden, S. R., und E. H. Green: The analysis of concrete. National Building Studies, Research Paper Nr. 8, Her Majesty's Stationery Office, London 1950.
- [6] Brown, A. W.: A tentative method for the determination of the original water cement ratio of hardened concrete. Journ. Appl. Chem. 7 (1957) S. 562/572.
- [7] Walz, K.: Witterungsbeständigkeit von Beton. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, H. 127, Wilh. Ernst & Sohn, Berlin 1957.
- [8] Locher, F. W.: Chemischer Angriff auf Beton. beton 17 (1967) H. 1, S. 17/19, und H. 2, S. 47/50; ebenso Betontechnische Berichte 1967, Beton-Verlag, Düsseldorf 1968, S. 19/34.