

**RAINER NOBIS**

**ILLUSTRIERTE GESCHICHTE  
DES ZEMENTS UND BETONS**

**DIE SPANNENDE ENTWICKLUNG ZWEIER BEDEUTENDER BAUSTOFFE**

# INHALTSVERZEICHNIS

---



Vorwort und Danksagung 6

Die Anfänge 9

Lehm, Ton und ihre Möglichkeiten 13

Ohne Mörtel geht es auch 18

Bitumen und Asphalt 22

Gips 26



Kalk 30

Phönizier entwickeln den Wassermörtel 38

Projekte beispielloser Mühlen 42

Römer entwickeln opus caementitium 51

Römische Bauingenieure spezifizieren Mörtel und Beton 56



Rom baut monumental mit opus caementitium 62

Vom römischen Niedergang bis ins 18. Jahrhundert 72

Woher stammen die Worte Zement, Beton und Klinker 80

England, die Geburtsstätte des Portlandzements 81

England glaubt an Portlandzement 99

Deutschland wird zur Konkurrenz 105



Amerika wacht auf 112

Ein Weltmarkt entsteht 122

Andere Länder holen auf 125

Der besondere Weg Chinas 140

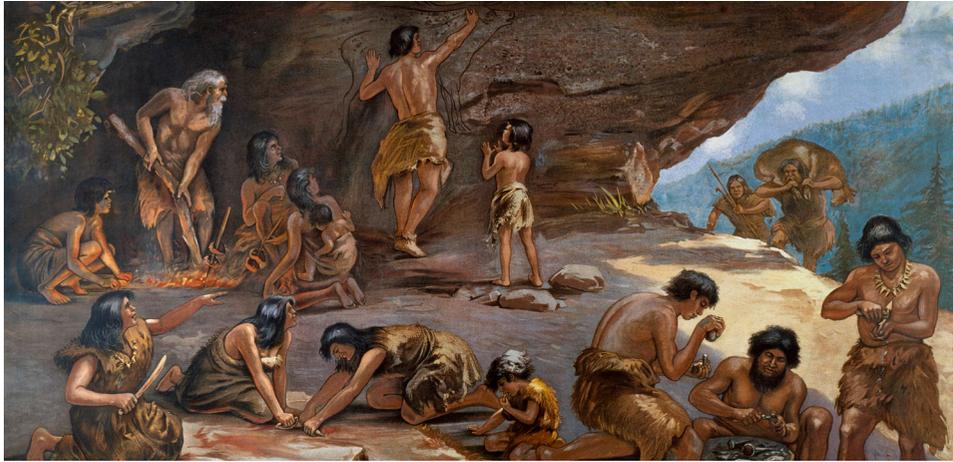
## INHALTSVERZEICHNIS

---

Geschichte der Zementchemie bis 1850	150
Wer ergründete das Wirken des hydraulischen Kalks?	155
Zementforschung ab 1850 bis in die Gegenwart	160
Prüfverfahren und Normen entstehen	164
Zemente mit besonderen Eigenschaften	171
Natürliche Puzzolane	176
Hüttensande und Flugaschen werden Standard	186
Entwicklung der Klinker-Brenntechnik	191
Entwicklung der Brech- und Mahltechnik	208
Verpackung von Zement	216
Beton erobert den Markt	220
Vom Massenbeton zum Stahlbeton	233
Vorgespannter Beton macht Unmögliches möglich	249
Beton als strategischer Baustoff in Kriegen	260
Schiffe aus Beton	268
Von Blut, Eiern und Sonstigem	274
Zusatzmittel verbessern Betoneigenschaften	276
Visionäre Projekte verändern die Betonwelt	280
Entwicklung nach dem Zweiten Weltkrieg und Ausblick	292
Ausflug in die Bindemittelchemie	294
Quellenanhang	300



# Die Anfänge



**Das Leben der frühen, nicht sesshaften Menschen fand meist in natürlichen Höhlen statt. Man ernährte sich von der Jagd, gesammelten Beeren und Wurzeln. Darum nennt man sie auch „Wildbeuter“. (1.1)**

Die Evolution der Menschheit begann vor mindestens zwei Millionen Jahren. Das Mittelpaläolithikum wird etwa auf die Periode vor 250.000 bis 50.000 Jahren datiert. Danach begann die paläolithische Periode oder Alte Steinzeit mit der Evolution des Homo sapiens, wie wir ihn uns heute vorstellen. Menschen versuchten, sich vor Wind, Kälte, Sonne, Regen und Gefahren in natürlichen Höhlen zu schützen. Ihre Bewohner waren noch nicht sesshaft, sondern folgten den Tierwanderungen oder suchten entsprechend den Jahreszeiten wärmere Regionen auf. Man nennt sie auch „Wildbeuter“, da sie Jäger und Sammler waren.

Etwa zur gleichen Zeit erreichten steinerne Werkzeuge und Waffen, höhere Qualität. Auch

Höhlenmalereien oder künstlerische Artefakte begannen, mehr Aussagekraft zu erhalten. Ihre Darstellungen zeugen von der Wichtigkeit der Jagd und vermutlich hoher weiblicher Fruchtbarkeit. Menschen waren gesund, denn sie lebten im Einklang mit der Natur. Die umherziehenden Familien und Sippen hatten wohl bestimmte Jagdreviere und Wasserstellen, benötigten aber auf ihren Wanderungen bewegliche Unterschlüpfen. So waren Zelte aus vielfältigen Materialien im Gebrauch. Sie mussten leicht zu transportieren, wasserdicht und windfest sein.

Als das Klima der Erde wärmer wurde, die Sahararegion austrocknete und nördliche Breitengrade sich vom Eis befreiten, begann der Übergang von der Alten Steinzeit in die Neue

Steinzeit. Archäologen datieren diese Periode etwa zwischen 10.000 und 3.000 Jahre v. Chr.

## Frühneolithische Kulturen bauen erste feste Behausungen

Im Vergleich zur paläolithischen Periode mit ihrer sehr langsamen technischen Entwicklung, bringt die neolithische Periode eine Erneuerung, die jedoch mehrere Jahrtausende währt. Menschen begannen sesshaft zu werden, in größeren Siedlungen zu leben, feste Behausungen zu bauen oder sich mittels Verteidigungsanlagen gegen Feinde zu schützen. In dieser frühen neolithischen Periode entstanden in den Jahren um 10.000 v. Chr. die ersten bekannten festen Siedlungen. Es war die Zeit, in der eine primitive Landwirtschaft startete, Schafe domestiziert wurden, erste gewebte Stoffe und vor allem Töpfe aus gebranntem Ton entstanden. Auch die Verarbeitung von gebranntem Kalk kann bereits nachgewiesen werden. Erste Metallwerkzeuge aus Kupfer entstanden im 8. Jahrtausend v. Chr., die aus Bronze sogar erst 5.000 Jahre später. Erste Belege für Räder stammen aus dem 4. Jahrtausend v. Chr.

Bis vor nicht langer Zeit glaubten Archäologen, dass in Jericho, Palästina, eine der ältesten Siedlungen der Menschheitsgeschichte gefunden wurde. Ihre Entstehung wird etwa auf 9.000 v. Chr. datiert. Die nachgewiesenen runden Bauten von ca. 5 Metern Durchmesser bestanden aus einer Mischung aus Lehm und Stroh. Einzelne „Ziegel“ waren in der Sonne

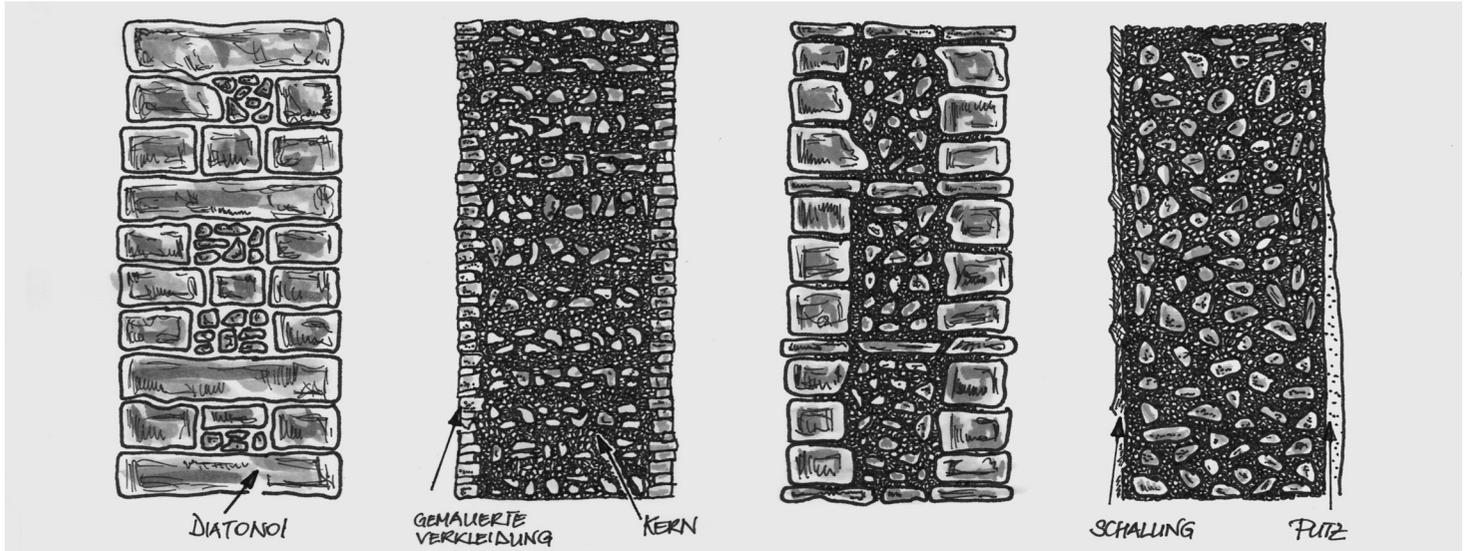


**Die Venus vom Hohlefeld ist eine etwa sechs Zentimeter hohe, aus Mammut-Elfenbein geschnitzte Figur, die bei Ausgrabungen in einer Karsthöhle in Süddeutschland gefunden wurde. Mit einem Alter von über 30.000 Jahren zählt sie zu den weltweit ältesten Darstellungen des menschlichen Körpers. (1.2)**



**Eine der weltweit ältesten Höhlenmalereien befindet sich in der spanischen Altamira-Höhle bei Santillana. Die Wisent-Darstellung wird auf ein Alter von über 20.000 Jahren geschätzt. (1.3)**

**Als großer und wichtiger Entwicklungsschritt am Ende der paläolithischen Periode gilt der Übergang von geschlagenen Steingeräten, z.B. Faustkeilen, zu final geschliffenen Steingeräten, z.B. Steinbeilen. (1.4)**



Verschiedene römische Mauerkonstruktionen ohne und mit opus caementitium. Die neue Mauertechnik aus zwei Mauerwerksschalen (Emplecton) und dem römischen opus caementitium machte bis dahin undenkbare Bauten mit waghalsiger Architektur möglich. Bei römischen Betonkonstruktionen übernimmt meistens der Mauerkerne die tragende Funktion. (9.5)

nicht genügend Tragfähigkeit, und außerdem war die Lebensdauer für große Investitionen nicht ausreichend.

## Griechen vermitteln neue Mauertechniken

Ab etwa der Mitte des 3. Jahrhunderts v. Chr. entwickelte sich langsam eine in Rom neue, besonders für die Mauertechnik entscheidende Bautechnik, die sich im Griechischen „Emplekton“ nannte. In der Übersetzung bedeutet es etwa „das verflochtene oder Gussmauerwerk“. Und wieder waren die Griechen ihre Lehrmeister. Diese neue Baumethode, die bereits schon lange in griechischen Kolonien im Süden des Landes angewendet wurde, übernahmen nun auch die Römer.

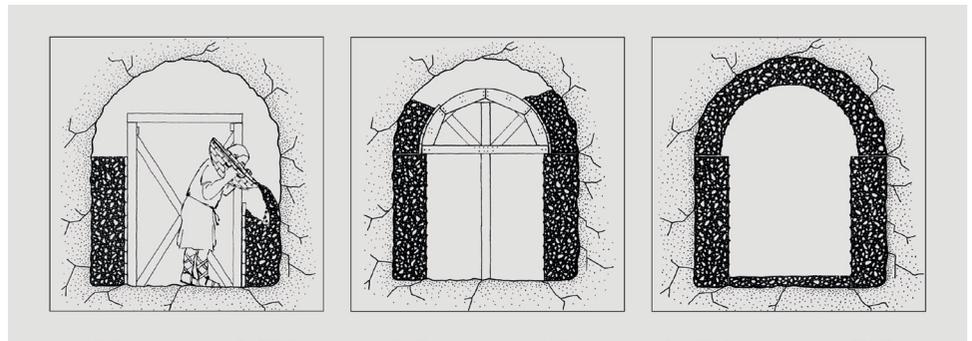
Beim „Emplekton“ handelte es sich um eine Wandkonstruktion aus zwei außen liegenden Wänden, zwischen denen zunächst lehmige Erde oder kleine Steine lose eingebracht wurden. In späteren Konstruktionen wurden die Hohlräume des losen Materials entweder mit flüssigem Kalkbrei vergossen, die Feinanteile mit flüssigem Kalkbrei oder Mörtel gemischt und eingebracht oder direkt mit steifem Mörtel vermauert. Meist erfolgte dies lagenweise.

Zur besseren Stabilisierung wurden oft in bestimmten Abständen große Steine gelegt, die durch das gesamte Mauerwerk reichen. Diese „Spann-“ oder „Ankersteine“ nannte man im Griechischen „Diatonoi“. Sie verbinden praktisch beide Außenmauern miteinander. Der überlagernde Druck erreicht so eine enorme Stabilisierung und deutlich verbesserte Steifigkeit massiver Mauern, auch wenn kein Mörtel verarbeitet wurde.

## Opus caementitium – eine technische Revolution

Mit der Regentschaft des ersten Kaisers Augustus (31 v. Chr.-14 n. Chr.) begann die sogenannte Kaiserzeit, die Blütezeit Roms und eine 200 Jahre andauernde lange Friedens- und Schaffensperiode. Man schuf ein großes Weltreich, das nicht nur einen enormen wirtschaftlichen

Aufschwung, sondern außerdem gewaltige Fortschritte in Wissenschaft und Kunst erlebte. Dieser lange Zeitraum mit hohem Wohlstand, Frieden und Forschung für Rom brachte auch neue Bautechniken hervor. Sie erreichten eine Vollendung, wie sie selbst in der Blütezeit Griechenlands, einige Jahrhunderte zuvor, bei Weitem nicht erreicht wurde. Die Kombination des griechischen Emplekton mit römischem Mörtel



Bau eines römischen Abwasserkanals aus opus caementitium mit Holzschalung. (9.6)



Der berühmte römische Abwasserkanal Cloaca Maxima ist nach über 2.500 Jahren heute noch in Betrieb. Gebaut wurde er aus opus caementitium, dem römischen Beton. (9.7)

# England, die Geburtsstätte des Portlandzements

Seit wann Kalkmörtel in England verwendet wird, ist nicht bekannt. Es gibt jedoch noch heute viele zu bewundernde römische Bauten, die seit der Besetzung Britanniens durch die Römer im 1. Jahrhundert n. Chr. mit römischem Mörtel errichtet wurden.

Wie im Kern des Römischen Reichs, kannte man natürlich in Britannien den hydraulischen Kalk, also den, der auch unter Abschluss von Luft erhärtet. Man mischte keinen importierten Puzzolan aus Italien oder Santorinerde aus Griechenland zum Kalk, sondern ausgediente, gebrochene und vermahlene Tonziegel, Tonkrüge, Fliesen und dergleichen. Nach dem Abzug der Römer ging allerdings, wie vieles andere, auch die Lehre vom hydraulischen Kalk verloren. Normaler Kalkmörtel wurde jedoch von den Angelsachsen weiterhin verwendet.

Erst mehr als viele Jahrhunderte später kam das Wissen über den hydraulischen Mörtel auch nach England zurück. Man mischte dem gebrannten Kalk wieder Ziegelmehl zu und erhielt hydraulischen Kalk. Ab etwa Mitte des 18. Jahrhunderts wurde dann vermehrt aus Holland importiertes Trassmehl, das sogenannte „Dutch terrass“, vermahlene Tuffgestein aus Deutschland, zur Produktion von hydraulischem Mörtel verwendet. Dies berichtete zumindest der Bauingenieur John Smeaton als einer der Ersten.

## John Smeaton und der Eddystone-Leuchtturm

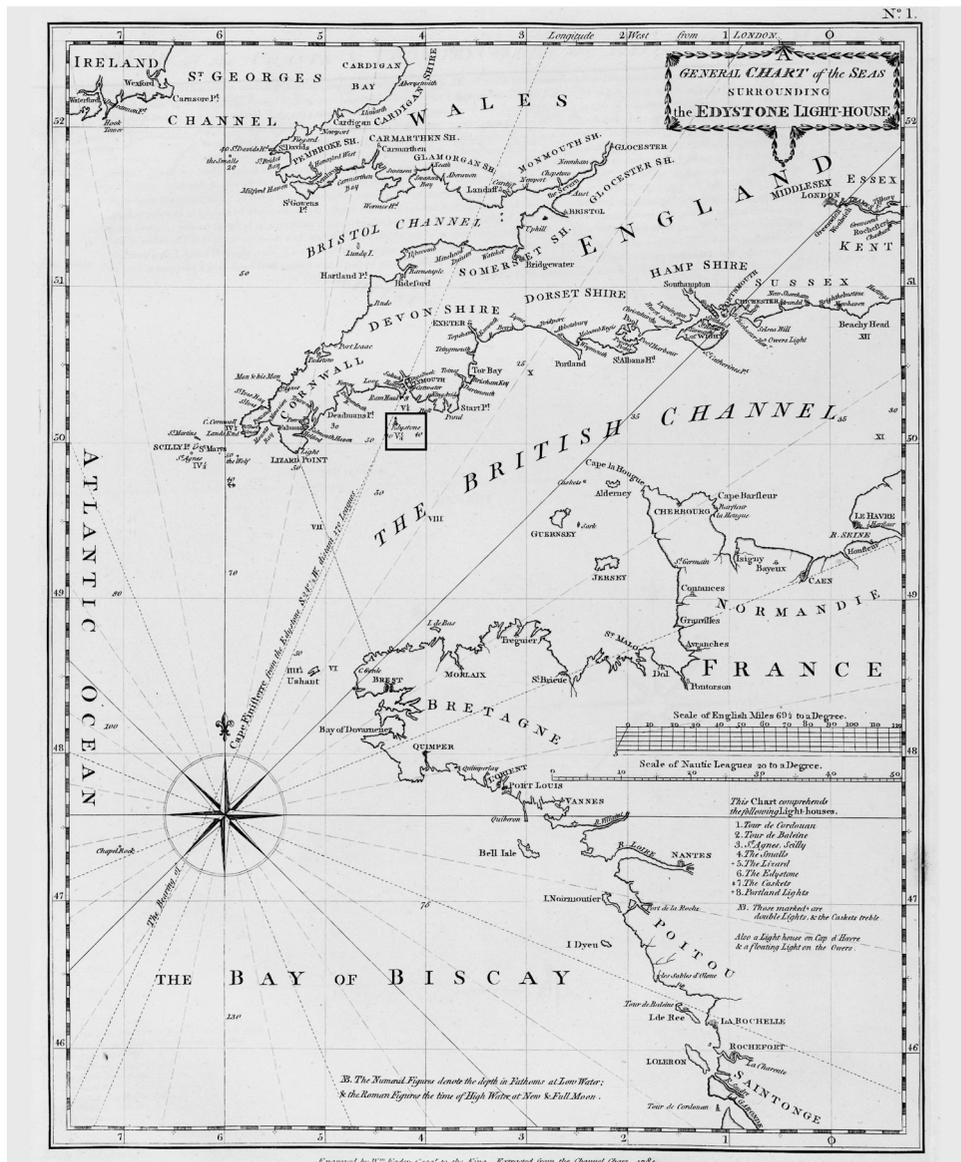
Mit Beginn der Industriellen Revolution, während der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts, entstand der Forscherwille, neue Dinge zu entwickeln. Die Emanzipation des Menschen gab Kräfte frei. Bessere Kommunikation erleichterte das Lernen und erste Patentsysteme boten neue Einkünfte.

Impulsgeber dieser Entwicklung waren insbesondere England und verzögert auch Frankreich. Deutschland und die Vereinigten Staaten folgten später nach. Mit diesem Drang nach Wissen entwickelte sich auch die empirische Forschung. Es entstanden für die damalige Zeit große Infrastrukturprojekte und repräsentative Bauten, für welche moderne und vor allem dauerhafte Baustoffe benötigt wurden. So fiel auch einer der wichtigsten Meilensteine zur Entwicklung von Zement in diese Zeit. Wie wir heute wissen, haben nämlich die Untersuchungen und Ergebnisse von John Smeaton zweifellos dazu beigetragen, einen ersten Schritt in diese Richtung zu machen. Smeaton hat mit umfassender und organisierter Forschung als Erster nachgewiesen, dass sich der



John Smeaton, „Vater des Ingenieurbaus“, war englischer Ingenieur, baute Brücken, Kanäle, Häfen, u. a. auch den berühmten Eddystone Leuchtturm. Bei diesem Projekt untersuchte er umfangreich verschiedene Kalksteine, die sich am besten für einen hoch belasteten Mörtel eigneten. Dabei stellte er fest, dass nicht der reinste Kalkstein den besten Mörtel ergab, sondern jener, der Ton beinhaltet. Damit war er der Erste, der die jahrtausendealte Doktrin widerlegte und eine neue Ära zur Entwicklung eines hydraulischen Zements einläutete. (14.1)

Karte der Südküste Englands. Sie zeigt den Standort des Eddystone-Leuchtturms. Die Felsen der Eddystone Rocks ragen nur wenige Meter aus dem Meer. Viele Seefahrer verloren auf ihnen Schiff und Leben. (14.2)





Das erste Portlandzementwerk der HeidelbergCement AG wurde von dem Brauer Johan Philipp Schifferdecker 1874 in Heidelberg gebaut. Nach einer kompletten Zerstörung durch einen Großbrand, wurde die Produktion 1896 nach Leimen verlegt, wo es Platz und Rohstoffe gab. (16.9)

## Weltunternehmen entstehen

Auch die Geschichte der heutigen Heidelberg-Cement AG geht auf diese frühe Gründerphase zurück. So hatte der Mannheimer Kaufmann für Eisenwaren, Carl Dietzsch, die Idee, sich auch in diesem aufstrebenden Gewerbe der Zementproduktion zu betätigen. Er kaufte Gelände in Mannheim und erhielt die Genehmigung zum Bau eines Stampf- und Mühlenwerkes. Da es nennenswerte Kalk- oder Kreidevorkommen im näheren Umkreis nicht gab, mussten bereits die Rohmaterialien für erste Versuche weit aus dem Neckartal herbeigeschafft werden. Leider waren diese Versuche doch so aufwendig, dass seine finanziellen Möglichkeiten schon bald erschöpft waren. Durch den Verkauf von Firmenanteilen an den vermögenden Mannheimer Bürger Julius Friedrich Espenschied erhielt er jedoch finanzielle Unterstützung. Espenschied kannte den Wert eines guten Zements, denn er benötigte selbst für den Bau seiner Kartoffelmehlfabriken Zement, für den er hohe Preise zahlen musste.

Die Versuche konnten daraufhin fortgesetzt werden und kamen 1861 zu einem akzeptablen Ergebnis. 1862 setzte dann ein bescheidener Verkauf ein. Der Zement schien gut zu sein, denn er erhielt auch von Baufachleuten gute Kritiken. Als Rohstoff wurde Kalkstein per Schiff aus dem Ort Haßmersheim am Neckar herbeigeschafft. Dietzsch verkaufte jedoch bald darauf seine Firmenanteile an Espenschied und wechselte im Jahr 1866 in die neu gegründete Portland-Cementfabrik Böcking & Dietzsch in

Malstatt bei Saarbrücken. Hier kam auch sein bekannt gewordener Schachtofen erstmalig zum Einsatz und machte ihn in kurzer Zeit zum wohlhabenden Unternehmer.

Espenschied produzierte trotz des Einsatzes fähiger Mitarbeiter und zur damaligen Zeit moderner Maschinen mit geringem wirtschaftlichen Erfolg. So schrieb er 1864 in einem Rundschreiben: „Wie leider in so manchen Dingen bestand und besteht in Deutschland ein Vorurteil gegen bei uns fabrizierten Portland-Cement zu Gunsten des fremdländischen (englischen) Fabrikats, natürlich nur zum Schaden unserer Konsumenten, unserer Industrie und unseres Landes“.

Etwa zur gleichen Zeit entschied sich der Unternehmer und Bierbrauer Johan Philipp Schifferdecker, seine Brauerei in Königsberg, heute Kaliningrad, zu verkaufen. Er stammte aus dem Raum Heidelberg im Großherzogtum Baden und beabsichtigte, sich dort im fortgeschrittenen Alter wieder anzusiedeln. Über verschiedene Quellen hörte er von den wirtschaftlichen Möglichkeiten in der Zementproduktion. Durch glückliche Umstände konnte er auch in Heidelberg am Neckarufer eine Getreidemühle ersteigern, die er zu einem Zementwerk umbaute. Im Jahr 1874 begann die Produktion. Der Kalkstein wurde südlich von Heidelberg aus der Region Leimen bezogen.

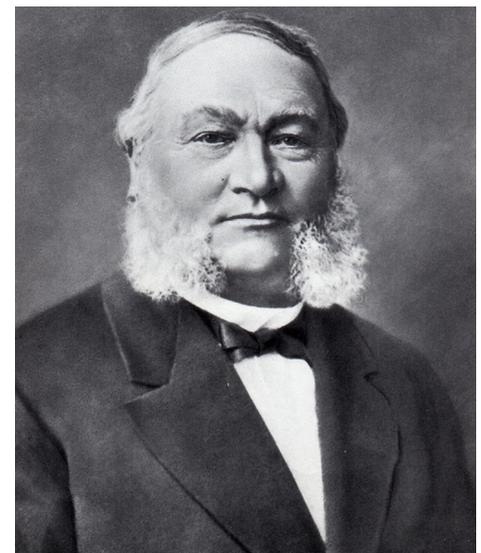
Die wirtschaftlichen Erfolge waren jedoch sehr ernüchternd. Erst mit dem Anwerben des ausgesprochen fachkundigen Betriebsleiters Friedrich Schott kam auch ab 1876 der Erfolg. Man investierte, optimierte und expandierte. Die



Fassaufkleber der Portland-Cement-Werke Heidelberg und Mannheim. Wegen starker Kapazitätsausweitungen in der Deutschen Zementindustrie um die Jahrhundertwende fiel die Auslastung einzelner Unternehmen. Zusammenschließungen oder sogar Stilllegungen waren nicht selten. So fusionierten auch 1901 die Portland-Cement-Werke Heidelberg und die Mannheimer Portland-Cement-Fabrik AG. Damit war der Grundstock für ein Großunternehmen, die spätere HeidelbergCement AG, geschaffen. (16.10)

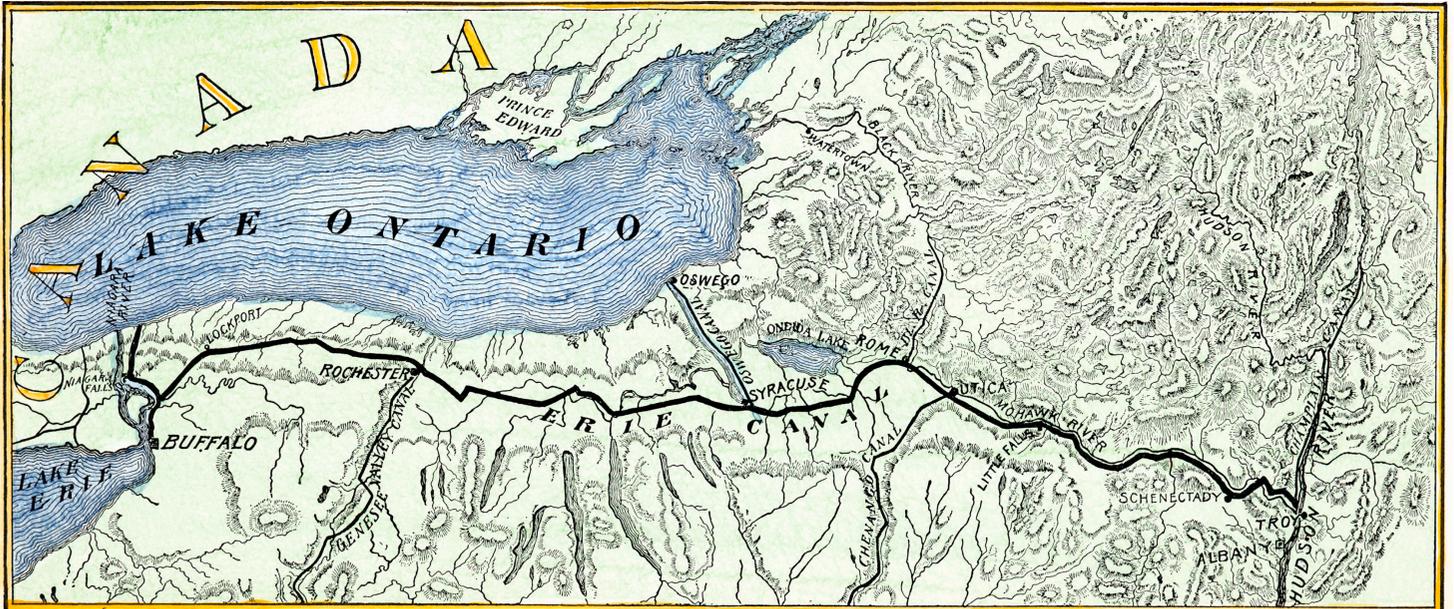
Produktion stieg kontinuierlich auf immerhin 63.000 t im Jahr 1888. Das Unternehmen Portland-Cement-Werk Heidelberg, Schifferdecker & Söhne OHG war zu einem blühenden Unternehmen geworden. Viele Großbaustellen im In- und Ausland wurden beliefert.

Im Jahr 1895 brannte jedoch das gesamte Fabrikareal nieder. Da die Brandversicherungen



Der Bierbrauer Johann Philipp Schifferdecker hörte von der aufstrebenden Zementindustrie und entschied sich 1867, seine Brauerei in Königsberg zu verkaufen. 1873 gründete er die Portland-Cement-Werke Heidelberg, Schifferdecker und Söhne. Aus diesem Unternehmen entstand die spätere HeidelbergCement AG, heute eines der größten Zementunternehmen weltweit (16.11)

# Amerika wacht auf



Der Eriekanal verbindet New York mit Buffalo am Eriesee. Damit machte man einen sicheren und effizienten Transportweg zwischen den Großen Seen und dem Atlantik möglich. Seine Länge beträgt 584 km. Es war das größte Infrastrukturprojekt seiner Zeit. (17.1)

## Der Eriekanal spielt eine bedeutende Rolle

Zu Beginn des 19. Jahrhunderts war Amerika besonders an der Atlantikküste besiedelt, obwohl es seine Territorien mit dem „Louisiana Purchase“ aus dem Jahr 1803 deutlich erweiterte. Die Appalachen im Westen und das Nichtvorhandensein von Straßen- oder Wasserwegen machten es jedoch extrem schwer, das Inland zu erschließen.

Der Transport von Massengütern über Land war so teuer, dass er kaum praktikabel war. Pferdegespanne auf übelsten Wegen waren die einzige Transportmöglichkeit. Ein Acht-Pferde-Gespann benötigte ca. 15 bis 45 Tage für den Weg von Albany, NY, nach Buffalo, NY. Die Transportkosten für Güter lagen bei unglaublichen 100 \$ pro Tonne.

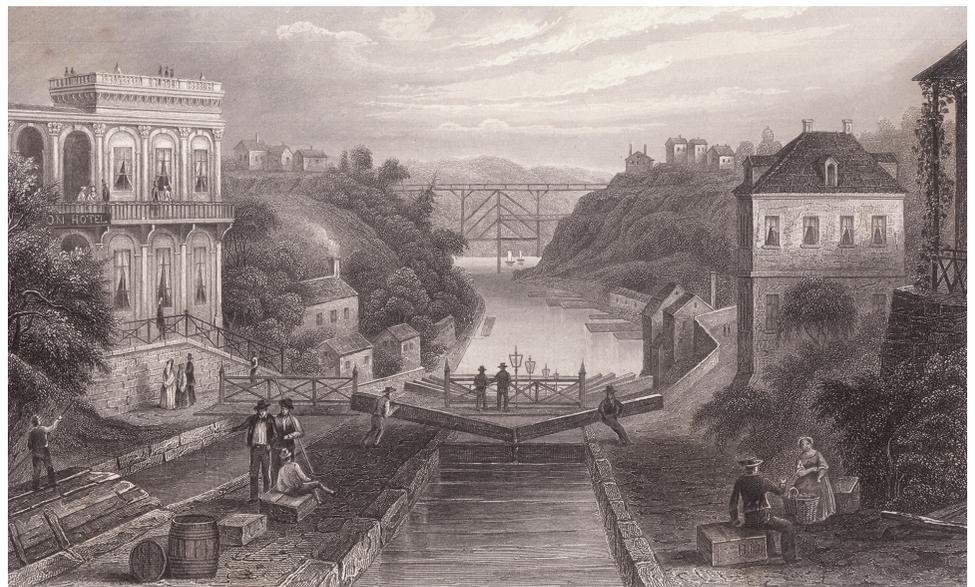
Das rapide wirtschaftliche Wachstum des westlichen Teils des Staates New York und die Städte am Rande der Großen Seen benötigten bessere Transportmöglichkeiten von und zur Atlantikküste. Hinzu kam, dass große Salzlagerstätten in der Nähe von Syracuse, im nördlichen Teil des Staates New York, der Ausbeutung harhten. Wegen der guten Beispiele aus Europa, kam nun auch das junge Amerika bzw. der Staat New York zu dem Schluss, dass Wasserkanäle die Lösung der Transportprobleme sind.

Der damalige Präsident Jefferson glaubte nicht an die Machbarkeit eines Kanals quer durch unwegsames Gelände. Er war mehr an einer Straße nach Westen, ausgehend von Baltimore, in-

teressiert. An eine finanzielle Unterstützung der Zentralregierung für einen Kanal von New York zu den Großen Seen war also vorerst nicht zu denken. So war der Staat New York auf sich allein gestellt und stellte das Projekt vorerst zurück.

Nach dem Ende des Krieges mit England im Jahr 1812 wurde der Druck durch die Bevölkerung für eine Wasserstraße jedoch so groß, dass der Staat New York nun 20.000 \$ zur Ver-

messung und zum Bau eines Kanals bewilligte. So begann am 4. Juli 1817 der Bau des Eriekanal, der New York mit Buffalo am Eriesee verbinden sollte. Damit machte man einen sicheren und effizienten Transportweg zwischen den Großen Seen und dem Atlantik möglich. Es handelte sich jedoch um eine riesige Herausforderung. Der neue Kanal mit 584 km Länge sollte doppelt so lang sein wie jeder andere bis dahin gebaute Kanal. Allerdings waren Bauma-



Eine der Schleusen des Eriekanal. Der Bau erforderte erhebliche Mengen an guten Baustoffen, die zunächst aus England importiert werden mussten. Die Eröffnung des Kanals reduzierte die Transportkosten von New York City nach Buffalo von ca. 100 auf 10 \$ per Tonne. Die Nutzung des Kanals war damit so groß, dass bereits nach neun Jahren die erheblichen Baukosten verdient waren. (17.2)



Flüssiger Tonerdezement, wie er aus dem Ofen fließt. Die Temperatur beträgt bis 1.700 °C. (25.4)

standsfähigkeit gegen aggressive Salzlösungen aus.

Erschmolzen wird der Tonerdezement meist in sogenannten L-Öfen, manchmal auch in Drehrohröfen gesintert. Bei dem L-Ofen werden faustgroße Brocken Bauxit und Kalkstein in einem exakten chemischen Verhältnis zueinander über einen Schacht in die Öfen geschüttet. Gefeuert wird mit Kohle oder Öl, bis die Mischung in flüssiger Form über einen Auslass in einen umlaufenden Pfannentransport fließt. Der flüssige Klinker kühlt dabei recht schnell ab. Nach kompletter Abkühlung wird er ohne weitere Zusätze zu normaler Zementfeinheit vermahlen.

Tonerdezement erstarrt im Allgemeinen zügig und erreicht bereits nach wenigen Stunden Festigkeiten, die von normalen Portlandzementen

erst nach 28 Tagen erreicht werden. Nach 28 Tagen erreicht der Tonerdezement Festigkeiten, die in etwa doppelt so hoch sind wie die eines durchschnittlichen Portlandzements.

Zu Beginn seiner Anwendung kam Tonerdezement hauptsächlich in maritimen Projekten zum Einsatz. Während der Weltkriege diente er auch umfangreich zur schnellen Fertigstellung von Unterständen und Geschützplattformen.

Zeitweise kam er auch in tragenden Elementen zum Einsatz. Nach erheblichen Bauschäden und sogar katastrophalen Einstürzen entdeckte man jedoch, dass der Beton aus Tonerdezement sich über einen längeren Zeitraum einer kristallinen Umwandlung unterzieht, die in deutlich reduzierten Festigkeiten endet. Dieser als Konversation bekannte Vorgang ist auf eine unvermeidliche und unumkehrbare Umwandlung

der Hydrate im Zementstein zurückzuführen, die mit einem Anstieg der Porosität endet. Die Verarbeitung in tragenden Elementen wurde daraufhin gestoppt.

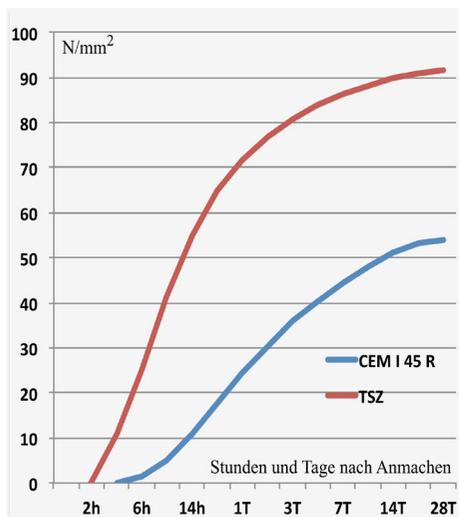
Grundsätzlich hat Tonerdezement damit die Bedeutung als hochfester Zement bzw. Beton verloren. Die jetzige Daseinsberechtigung erfährt er aber in seiner Feuer- und Säurebeständigkeit sowie in seiner sehr hohen Frühfestigkeit. So wird heute der Tonerdezement insbesondere für feuerfeste Mörtel und Betone eingesetzt, da er hohen Temperaturen widersteht. Wegen seiner beschleunigten Wirkung und hohen Festigkeiten findet er außerdem umfangreiche Verwendung als Zusatz zu Portlandzementen in Produkten der Bauchemie, insbesondere in Klebern, Fugenmörteln und Ähnlichem. Als Schnellzement eignet er sich für eine Vielzahl von Schnellreparaturmörteln und wegen seiner Schwefelsäureresistenz als Auskleidung in Abwasserrohren.

Hergestellt wird Tonerdezement heute in relativ geringen Mengen in Frankreich, Kroatien, Russland, Japan, China und den USA.

## Weißzement

Ein anderer, jedoch umfangreich eingesetzter Sonderzement, ist der „Weißzement“. Er gehört zur Gruppe der Portlandzemente und zeichnet sich, wie sein Name bereits sagt, besonders durch seine weiße Farbe aus.

Die Herstellung von Weißzement ist wesentlich aufwendiger als die von gewöhnlichem Portlandzement. Die Produktion benötigt deutlich mehr Energie zu seiner Sinterung, da Eisen als Flux (Verflüssiger) fehlt und der Anteil an Silikaten deutlich höher ist. Denn ein normaler Anteil an Eisen ( $Fe_2O_3$ ) im grauen Portlandklinker hilft, die Sintertemperatur auf etwa 1.450 °C zu begrenzen. Da der Weißzement



Typische Festigkeitsentwicklung eines Tonerdezements und eines der mittleren Festigkeitsklassen entsprechenden CEM I 45,5 R. (25.5)

Eine Anzeige für die Verarbeitung von Ciment Fondu preist die schnelle Belastbarkeit und die kurzen Betriebsunterbrechungen an. (25.6)



Weißer Portlandzement wird in geringen Mengen hergestellt. Er ist teuer und nicht einfach, in hoher Qualität herzustellen. (25.7)



**Beim Bau des Pont du Veudre in Zentralfrankreich machte Freyssinet die ersten Beobachtungen mit dem bis dahin weitgehend unbekanntem Kriechen und Schwinden von Beton. (33.13)**

kalen Einknicken der Brückenmitte. Er folgerte daraus, dass sich die Brücke unter Druck verkürzt hatte und so die Senkung verursachte. Außerdem erkannte er, dass Beton selbst nach Erhärtung viel formveränderlicher und plastischer war, als es allgemein bekannt war.

Die Senkung und erhöhten Spannungen in der Betonkonstruktion konnten durch Heben der Bögen in der Mitte mittels hydraulischer Stempel und Verguss des entstandenen Spalts in der Bogenmitte mit Beton behoben werden. Durch diese Erfahrung realisierte er, dass der Brückenbeton sich langsam unter Belastung deformierte und dass die Deformation permanent war, und zwar auch, als die Belastung eliminiert wurde. Freyssinet erkannte in weiteren Tests, die er allerdings bis zum Ausbruch des Ersten Weltkrieges nicht vervollständigen konnte, dass er das

Phänomen des Kriechens und Schwindens im Beton entdeckt hatte und dass es von erheblicher Bedeutung für die Anwendung der Vorspannung war.

Erst nach dem Krieg nahm Freyssinet seine Versuche wieder auf und lernte, dass das Kriechen des Betons umso geringer ausfällt, je druckfester und dichter der Beton ist. Je geringer das Kriechen und Schwinden im Beton ist, desto geringer ist auch der Spannungsverlust in eingelegten Stahlspanndrähten.

Seine Forderung bestand daraufhin, den Beton so hoch vorzuspannen, dass bei Abschluss des Schwindens und Kriechens genügend Vorspannung verbleibt, um im Beton keine Zugkräfte aufkommen zu lassen.

Freyssinet folgerte auch, dass die bisherigen Versuche des Vorspannens anderer Ingenieure

nicht von Erfolg gekrönt waren, weil einerseits der verwendete Beton von zu geringer Festigkeit und außerdem die verwendeten Eisendrähte nicht hoch genug vorgespannt werden konnten. Zu jener Zeit standen weder hochfeste Betonqualitäten, noch Drähte mit extrem hohen Zugfestigkeiten zur Verfügung.

Es dauerte noch fast 20 Jahre, bis wirklich dieser hochfeste Stahl zur Verfügung stand. Seine Forschungen und Erkenntnisse beflügelten Freyssinet, sämtliche bisherigen geschäftlichen Aktivitäten aufzugeben und sich mit allen Kräften der Idee der Vorspannung hinzugeben. Leider fanden die Ideen Freyssinets in der Anfangszeit keinen bedeutenden Widerhall. Zum einen, weil wirklich hochfester Beton und Stahl noch nicht entwickelt waren, und zum anderen, weil Frankreich und die ganze Welt in eine schwere wirtschaftliche Depression verfallen waren. Öffentliche Aufträge für Brücken gab es kaum. So intensivierte er seine Forschung und entwickelte Spannpressen und Verankerungen von Spanngliedern mit hochfestem Stahl.

Freyssinet machte deutlich, dass es zwei Betonqualitäten gibt. Den Eisenbeton mit mildem Stahl als Einlage und den vorgespannten Beton mit hochfesten vorgespannten Stahleinlagen. Beim traditionellen Stahlbeton übernehmen die Einlagen die Zugkräfte und entlasten den Beton von Zug. Bei vorgespannten Einlagen unterliegt der Beton keinen Zug-, sondern nur Druckkräften. Dies garantiert, dass keine Risse wegen Durchbiegung entstehen, weil der Beton keinen Zugkräften ausgesetzt ist. Seine Theorien und praktischen Erkenntnisse ließ er sich 1928 in Frankreich und vielen anderen Ländern patentieren. In ihnen forderte er Eisendrähte, die eine Elastizitätsgrenze von mindestens  $40 \text{ kg/mm}^2$  (ca.  $400 \text{ N/mm}^2$ ) aufweisen. Außerdem müsse der Beton mit optimierten Zuschlägen angemacht, mit angemessener Verschalung beim Gießen versehen sein und intensiv gerüttelt werden.

Als sich der neue Bahnhof im Hafen von Le Havre wegen unzureichender Fundamente 1933 um monatlich 25 mm abzusenken begann, schien dies eine nationale Tragödie zu sein und wurde umfangreich publiziert. Freyssinet erhielt die Möglichkeit, ein Konzept zur Sicherung und Wiederaufrichtung des Bahnhofs mittels vorgespannter neuer Pfeiler zu entwickeln. Das Projekt gelang und Freyssinet erhielt nationale und internationale Aufmerksamkeit.

1933 veröffentlichte er seine Forschungen und Ergebnisse über das Kriechen und Schwinden. Sie waren zur damaligen Zeit revolutionär und erhielten in Fachkreisen größte Aufmerksamkeit. Es war das erste Mal, dass ein Ingenieur klare Spezifikationen für die physikalischen Eigenschaften von Beton und Stahl zur Fertigung von Spannbeton machte. Im selben Jahr 1933 erhielt er einen Auftrag von der Firma

## Kriechen und Schwinden des Betons

Man unterscheidet lastunabhängige Verformungen, wie z. B. das Schwinden und lastabhängige Verformungen, welche über den Begriff Kriechen definiert werden.

Als **Schwinden** bezeichnet man die Verkürzung bzw. Volumenverminderung des unbelasteten Betons im Laufe der Zeit, bedingt durch Austrocknen und durch chemische Reaktionen bzw. Gefügewandlungen während des Aushärtens. Das Schwinden des Betons hängt vor allem von der Feuchte der umgebenden Luft, den Massen der Bauteile und der Zusammensetzung des Betons ab.

Als **Kriechen** bezeichnet man die Verformung des Betons im Laufe der Zeit unter einer konstanten Belastung. Es ist eine Eigenschaft des Betons, die sich insbesondere bei einer hohen, lang einwirkenden Druckbelastung durch eine Gefügewandlung und Volumenverminderung äußert. Dabei unterscheidet man einen reversiblen und einen irreversiblen Teil der Verformung. Wird der Beton entlastet, findet eine teilweise Rückverformung statt.



**Der Öltanker S.S. Selma war eines von 24 Stahlbetonschiffen, das 1918 im Rahmen des Emergency-Fleet-Programms in den USA gebaut wurde. Der Rumpf bestand aus Leichtbeton. Heute dient er als Wellenbrecher vor der Küste Galvestons, Texas. Der Betonrumpf ist nach fast 100 Jahren Salzwasser und Wellengang erstaunlich gut erhalten. (35.5)**

hatte eine Länge von 132 Metern und konnte 6.380 Tonnen Öl laden. Die Wandstärken betragen 100 bis 127 mm, die Abdeckung über der Armierung lediglich 16 mm. Nachdem sie 34 Jahre dem Meerwasser ausgesetzt gewesen war, untersuchte man 1953 in Galveston, Texas, den Rumpf. Ihm wurde ein ausgezeichnete Zu-

stand attestiert. Korrosion war kaum erkennbar. Insgesamt sollen allein in den USA während des Ersten Weltkriegs mehr als 100 Betonschiffe gebaut worden sein.

Zu dieser Zeit besannen sich aber auch andere Länder wie England, Deutschland, Kanada, Italien, Dänemark, Spanien oder Schweden

Schiffe aus Ferrozement zu bauen. In Deutschland zum Beispiel hatte der Stahlbetonbau für Schiffe während und zum Ende des Ersten Weltkriegs eine erstaunliche Bedeutung erlangt. Gebaut wurden vor allem kleine Transportschiffe, Fischkutter und Schuten. Es wird angegeben, dass ein Stahlbetonschiff gegenüber einem konventionellen Stahlschiff mit 500 t Tragfähigkeit anstatt 200 Tonnen, lediglich 60 Tonnen Stahl benötigte.

Der Krieg endete, Stahl verbilligte sich und Schiffbauer, mit Naturkräften vertraut und konservativ, fielen zurück in alte Gewohnheiten. Der Niedergang des Stahlbetonschiffbaus war zunächst besiegelt.

Kurz vor und vor allem während des Zweiten Weltkriegs wurde Stahl dann wieder knapp und teuer. Die Geschichte des Ersten Weltkriegs wiederholte sich. Amerikanische und englische Frachtschiffe wurden besonders auf den Routen im Nordatlantik zu Dutzenden von deutschen U-Booten versenkt. Amerika und England kamen mit dem Bau neuer Schiffe kaum nach.

1942, ein Jahr nach amerikanischem Kriegseintritt, war die Situation so dramatisch, dass die amerikanische Marine kurzfristig den Auftrag zum Bau von 24 Stahlbetonschiffen gab. Beauftragt mit dem Bau wurde die „McCloskey & Company“ in Philadelphia. Sie hatte auch



**1940 erhielt die Werft Henry J. Kaiser in Oregon, USA, von der britischen Regierung den Auftrag, 31 Frachtschiffe aus Beton zur Unterstützung ihrer Kriegstätigkeiten zu bauen. (35.6)**