

Elektrische Erwärmung von Beton und Mörtel bei Frosttemperaturen (Elektrobeton)

Autor(en): **Haller, P.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **107/108 (1936)**

Heft 6

PDF erstellt am: **20.05.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-48244>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

INHALT: Elektrische Erwärmung von Beton und Mörtel bei Frosttemperaturen (Elektrobeton). — Neue Tageskino in Paris und Brüssel. — Nochmals der Simplon-Autostrassen-Tunnel. — Mitteilungen: Gas-Heizanlagen. Baggerpumpenanlage am Fort Peck-Staudamm in Montana (U.S.A.). Wirtschaftliches zum Fernsehen. Für die schweizerische Flugzeugindustrie. 330 m weite Bogenbrücke in Südrhodesien. Amerikanisches

«Departement für Bodenuntersuchungen». Postautokurs Lugano-St. Moritz. Chirurgische Klinik der Zürcher Heilstätte Clavadel. Schweizer. Landesausstellung 1938. Güter-Triebwagen. Brücke über den kleinen Belt. Schweiz. Werkbund. — Wettbewerbe: Teilbauungsplan Frauenfeld. — Mitteilungen der Vereine. — Vortrags-Kalender.

Band 107

Der S. I. A. ist für den Inhalt des redaktionellen Teils seiner Vereinsorgane nicht verantwortlich.
Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet.

Nr. 6

Elektrische Erwärmung von Beton und Mörtel bei Frosttemperaturen (Elektrobeton).

[Am 10. Februar 1934 ist hier (Bd. 103, S. 70*) eine Abhandlung über die elektrische Erwärmung von Beton erschienen, deren Schlussabsatz wie folgt lautet:

„Um zu prüfen, ob dieses Verfahren, im Interesse der Bekämpfung der Arbeitslosigkeit sich auch für die hiesigen Verhältnisse eignet, werden von der eidg. bawirtschaftlichen Zentralstelle in Bern in Verbindung mit der EMPA Versuche vorgenommen, über die ein Versuchsbericht folgen wird. Damit hoffen wir dann zu beweisen, dass es technisch und wirtschaftlich möglich sein wird, im Winter zu betonieren, wobei einheimische Bauarbeiter während einer längeren Zeit des Jahres beschäftigt werden könnten, als bisher.“

Dies ist nun inzwischen geschehen und die nachfolgenden Kapitel stellen einen gedrängten Auszug aller theoretischen und praktischen Forschungsergebnisse dar, die ermöglichen sollen, den Elektrobeton von Fall zu Fall zweckmässig anzuwenden.

Dipl. Ing. P. Haller, Abteilungschef der EMPA, behandelt in vorliegender Nummer zunächst die theoretischen Grundlagen des Verfahrens, sowie die daraus sich ergebenden Richtlinien für die Praxis (Seite 57 ff.), während die Ingenieure der Eidg. Zentralstelle für Arbeitsbeschaffung, C. Kunz und E. Fontanellaz, im nächsten Heft die von ihnen durchgeführten Anwendungen und die wirtschaftlichen Gesichtspunkte besprechen werden. Red.]

1. Technische Grundlagen.

Von Dipl. Ing. P. HALLER, Abteilungschef der Eidg. Materialprüfungsanstalt, Zürich.

Nähert sich die Temperatur eines frisch angemachten Betons dem Gefrierpunkt, so wird nicht nur der Beginn des Abbindevorganges zeitlich hinausgeschoben, sondern der Abbinde- und der darauffolgende Erhärtungsprozess werden ebenfalls träger. Sinkt die Temperatur in dem frischen oder in dem im Abbindeprozess sich befindenden Beton sogar unter den Gefrierpunkt, verwandelt sich das noch ungebundene Anmachwasser unter Raumvergrößerung (1/11) in Eis; dadurch wird nicht nur das Abbinden unterbrochen, sondern durch die Volumenvermehrung während der Zustandsänderung von Wasser in Eis wird durch die ausgelösten Spannungen das Gefüge des Beton gelockert. Mit zunehmender Temperatur schmilzt das Eis, der Abbindeprozess nimmt seinen Fortgang, aber infolge der Gefügelockerung (auch unter nachträglich normalen Abbinde- und Erhärtungsbedingungen), ist eine volle Festigkeitsentwicklung nicht mehr zu erwarten.

Eine wirksame und wirtschaftliche Behandlung des Betons während der Frostperioden hat die Abbindebedingungen des Betons so zu regeln, dass der Beton kurzfristig so weit abbindet und erhärtet, dass dieser nach der Behandlung ohne Schaden zu erleiden, den Frosttemperaturen ausgesetzt werden kann. Das Abhalten der gefährlichen Kälte durch bauliche Schutzmassnahmen hat sich nur bei kleineren Bauwerken als wirtschaftlich tragbar erwiesen. Die Behandlung mit warmer Luft oder mit Dampf ist da und dort mit Vorteil angewendet worden; wir verweisen auf die einschlägige Literatur.

Die Behandlung des frisch angemachten Betons mit elektrischem Strom ist in Schweden (System Brund und Boblin), in Russland (System Réthy) usw.¹⁾ in grösserem Masse zur Anwendung gekommen, weil man dort nur während einigen Monaten im Jahr auf günstige Temperatur-Verhältnisse für die Betonierungsarbeiten zählen kann.

¹⁾ Literaturnachweis: Ing. A. Brund und H. Boblin, Vortrag in der königlich schwedischen Akademie der Ingenieurwissenschaften 1931; Auszug dieses Vortrages in „Beton und Eisen“ 1932; H. Boblin und A. Brund in „Byggnadsvärlden“ vom 26. März 1932; Ing. A. Réthy, Moskau, in „Beton und Eisen“ vom 20. Sept. 1933 und 20. Febr. 1934 und Ing. A. Réthy, Moskau, in „Travaux“ (Paris) Februar 1935.

THEORETISCHE UND VERSUCHSTECHNISCHE GRUNDLAGEN.

Durch den Durchfluss eines elektrischen Wechselstromes (Gleichstrom ist wegen Elektrolyse unbrauchbar) in frisch angemachtem Beton wird Wärme erzeugt, die den von der Temperatur abhängigen Umbildungsprozess des Zementwassergemisches massgebend beeinflusst. Der elektrische Widerstand eines mit Portlandzement frisch aufbereiteten Zementbreies, Mörtels oder Betons ist von der Entwicklung des chemischen Umwandlungsvorganges abhängig. Während der ersten Zeit, der Hydratationszeit, dringt das Anmachwasser in die Zementkörner ein; ein Teil des freien Kalkes geht bis zur Sättigung in Lösung und der Ohm'sche Widerstand vermindert sich bis zu einem Minimalwert, der zeitlich mit dem

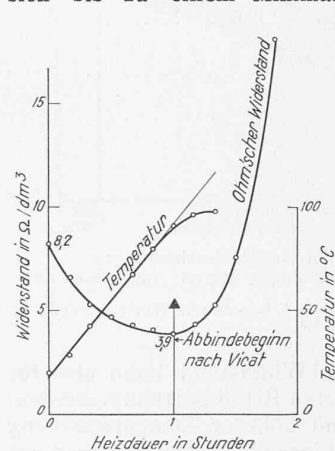


Abb. 1. Zeitlicher Verlauf des Ohm'schen Widerstandes in Zementbrei 1:0, Elektrodenabstand 20,3 cm; Körperlänge $10 \times 10 \times 20,3$ cm. Temperaturerhöhung im Zementbrei. Abbindebeginn nach Vicat fällt mit dem Widerstandminimum zusammen.

Beginn des zweiten Verfestigungsabschnittes, des Abbindens, zusammenfällt (Abb. 1). Im Verlaufe des Abbindeprozesses wird der grösste Teil des Anmachwassers gebunden unter weiterschreitender Umbildung in der Zusammensetzung des Zementteiles.

Während dem Abbinden des Bindemittels nimmt der elektrische Widerstand wiederum zu. Diese chemischen Umbildungen erzeugen je nach Zusammensetzung und Herstellungsart des Bindemittels, der Dosierung und des Wasserzusatzes des Betons und der Temperatur der Umgebung mehr oder weniger Eigenwärme, die wiederum je nach dem Arbeitsfortschritt, den Abmessungen des Bauteiles, je nach der Temperatur und Wärmeleitfähigkeit des Betons und besonders der Umgebung zu einem bestimmten Temperaturanstieg führen kann.

Diese Änderung des Ohm'schen Widerstandes während des Hydratations- und Abbindevorganges macht das Verfahren der elektrischen Erwärmung des Betons verwendbar. Wird beispielsweise eine Stelle des Betons mehr vom elektrischen Strom durchflossen, so wird der Abbindeprozess schneller eingeleitet, der Widerstand wächst und so wird eine Stelle mit noch weniger vorgeschrittenem Umwandlungsprozess nunmehr relativ stärker vom Strom durchflossen, erwärmt und das Abbinden eingeleitet. Nicht nur der Abbindeprozess, sondern auch Wärmeentwicklung, Wärme- und Feuchtigkeitsverteilung im Betonkörper werden durch diese Veränderlichkeit des Ohm'schen Widerstandes geregelt und die daraus entstehenden Wärme- und Schwindspannungen werden weitgehend vermindert.

Werden an einem frisch angefertigten Betonkörper gleichflächige Elektrodenbleche, die mit einer Wechselstromquelle verbunden sind, angelegt, so fliesst ein elektrischer Strom, der nach dem Ohm'schen Gesetz

$$\text{Stromstärke } J \text{ in Ampère (A)} = \frac{\text{Stromspannung } E \text{ in Volt (V)}}{\text{Stromwiderstand } R \text{ in Ohm } (\Omega)}$$

berechnet werden kann. An der E. M. P. A. in Zürich durchgeführte Versuche mit Zementbrei, Mörtel und Beton, die in verschiedenen Mischungsverhältnissen und Kon-

sistenzen aufbereitet waren, haben unter Vernachlässigung der geringen Stromleitfähigkeit des Zuschlagstoffes folgende Beziehung für die Berechnung des Kleinstwiderstandes, der zu Beginn des Abbindeprozesses auftritt, aufstellen lassen (Abb. 2):

$$R_{\min} = \frac{l}{q} \frac{1}{a(z+w)^2} \text{ in } \Omega \quad (1)$$

Hierin bedeuten:

$R_{\min}$ = kleinster elektrischer Stromwiderstand in Ω .

l = Dicke des Betonstückes in m.

q = stromdurchflossener Betonquerschnitt in m^2 .

z = absolutes Zementvolumen in m^3
= Zementdosierung Z in kg/m^3 fertigen Beton
spezifisches Gewicht γ_z des Zementes ($\gamma_z = 3,1$)

w = Anmachwassermenge in absoluten Volumen (= in Liter im m^3 Beton).

a = Koeffizient, abhängig von der Temperatur des Betons und der Umgebung, sowie von der Zementmarke. Der Koeffizient a wurde für Beton, mit dem gleichen Portlandzement hergestellt, bei Temperaturen von $+14$ bis $+20^\circ\text{C}$ zu 3,5, bei Frosttemperaturen zu 2,7 bestimmt.

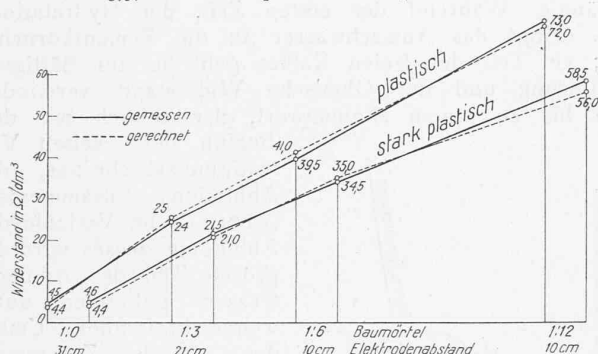


Abb. 2. Abhängigkeit des minimalen Stromwiderstandes von Mischungsverhältnis und Konsistenz einiger Mörtel. Gemessene und nach der Formel $R_{\min} = \frac{l}{q} \frac{1}{a(z+w)^2}$ berechnete Werte ($a=2,7$).

Der elektrische minimale Widerstand kann also für jeden bekannt zusammengesetzten Beton berechnet werden. Die wasserreichen und die mit höherer Zementdosierung hergestellten Betone sind leitfähiger als magere und weniger verarbeitbare Betone. Für die Dimensionierung der Transformator genügt die Kenntnis des maximalen Stromdurchflusses bzw. des maximalen Widerstandes.

Der Verlauf des Abbindeprozesses ist in erster Linie abhängig von der im Beton herrschenden Temperatur, die ihrerseits wieder abhängig ist von der entwickelten Wärme (aus dem Abbindeprozess und der Stromumwandlung) sowie vom Wärmeverlust durch die Schalung und Betonoberfläche. Für den Gebrauch in der Praxis werden einige, die Bauplatzverhältnisse genügend genau erfassende Formeln angegeben. Was die theoretischen und versuchstechnischen Grundlagen für die Ableitung dieser mathematischen Einkleidung anbelangt, verweisen wir auf den demnächst erscheinenden Diskussionsbericht der E. M. P. A. in Zürich.

Die entwickelte Wärmemenge ist gleich der im Körper vorhandenen Wärmemenge + dem Wärmeverlust, d. h.

$$Q_A + Q_E = Q_K + Q_V \text{ in kcal} \quad (2)$$

Hierin bedeuten:

Q_A = Wärmemenge aus dem Abbindeprozess in kcal.

Q_E = Wärmemenge aus der Umwandlung von elektr. Energie in kcal.

Q_K = Wärmemenge im Betonkörper in kcal.

Q_V = Wärmeverlust wegen Abfluss durch Schalung und Betonoberfläche in kcal.

Die während der 8 bis 15 Stunden dauernden elektrischen Erwärmung entwickelte Wärmemenge hängt von der Energieaufnahme und den daraus sich entwickelnden Temperaturen des Betons ab. Die elektrische Behandlung des Betons wird in der Regel in den Abendstunden begonnen und dauert bis zum Morgen des folgenden Tages (z. B. von 17 bis 8 h). Eine gleichmässige Durchwärmung des zu behandelnden Betons ist zur Vermeidung von erheblichen innern Spannungen erwünscht, weshalb auch zur vollständigen Durchwärmung aller Komponenten eine nicht

zu rasche Erwärmung angezeigt ist. Andererseits sollte diese spätestens bis zum Eintreten des höhern Tagestarifs des Strompreises beendet sein, auch wenn nach Beendigung des Abbindeprozesses kein grosser Stromdurchfluss stattfindet. Die Erwärmung, bzw. die Stromspannung wird unter Berücksichtigung dieser Umstände zweckmässigerweise so berechnet, dass das Temperaturmaximum von $+40$ bis $+60^\circ\text{C}$ im Betonkörper nach 8 bis 11 Stunden auftritt.

Die Entwicklung der Abbindewärme steht in Beziehung mit der im Beton herrschenden Temperatur und bestimmt sich zu:

$$Q_A = a Z \text{ in kcal} \quad (3)$$

Hierin bedeuten:

Z = Zementmenge in kg.

a = spezifische Abbindewärme in kcal/kg Zement. Sie beträgt nach den der Literatur entnommenen Zahlenwerten, die für die in unserem Lande verwendeten Portlandzementtypen umgerechnet wurden, für 7 bis 10 stündige Erwärmungszeit 25 bis 35 kcal/kg Zement. Die kleinere Zahl wird für Beton mit einer Dosierung von 200 kg/m^3 fertigem Beton, die grössere für P 300 zutreffen. Die Werte sind je nach der Zementqualität und Herkunft verschieden; für die vorliegenden Berechnungen wird die Einsetzung dieser Zahlenwerte genügen.

Die durch den elektrischen Stromdurchfluss erzeugte Wärmeentwicklung kann mittels des Joule'schen Gesetzes berechnet werden mit

$$dQ_E = 0,24 E J dt \cdot 10^{-3} \text{ in kcal mit } t \text{ in sec, bzw.}$$

$$dQ_E = 0,0144 \frac{E^2}{R} dt_1 \text{ in kcal mit } t_1 \text{ in min.}$$

$$R_{\text{mittel}} = \text{mittlerer elektrischer Widerstand in } \Omega$$

$$= 1,36 R_{\min}$$

$$Q_E = 0,864 \frac{E^2}{1,36 R_{\min}} t_2 \text{ in kcal} \quad (4)$$

Hierin bedeuten:

E = Stromspannung in V.

t_2 = Erwärmungsdauer in Stunden.

Die Körperwärme des Betons kann durch Temperaturmessungen ermittelt werden, wenn die spezifische Wärme des Betons bekannt ist.

$$Q_K = G c (T_{\text{mittel}} - T_0) \text{ in kcal} \quad (5)$$

Hierin bedeuten:

G = Gewicht des Betons in kg.

c = spezifische Wärme des Betons, die mit guter Annäherung zu 0,27 in Rechnung gesetzt werden kann.

T_{mittel} = mittlere Temperatur des Betons in $^\circ\text{C}$, $\approx 0,95 T_{\text{max}}$.

T_0 = Anfangstemperatur des Betons in $^\circ\text{C}$.

Der Wärmeverlust durch anfangs nasse Schalungen, sowie der Wärmeverlust an der Betonoberfläche ist vom Zustand dieser wärmeisolierenden Schichten in erster Linie abhängig; mit zunehmender Trocknung der Schalung wird der spezifische Wärmeverlust kleiner werden. Der auch von der Körpertemperatur und von der Aussentemperatur, bzw. von Fundamentboden usw. beeinflusste mittlere Wärmeverlust lässt sich auf Grundlage der Versuche folgendermassen darstellen:

$$Q_V = k F (T - T_a) t_2 \text{ in kcal} \quad (6)$$

Hierin bedeuten:

k = Wärmedurchgangszahl der Schalung bzw. der Abdeckung der Betonoberfläche. k kann für die Berechnung des Wärmeverlustes mit genügender Genauigkeit zu 3,5 für eine 3 cm starke Schalung und zu 4,0 für eine 2,5 cm starke Schalung eingesetzt werden. Für die Planenabdeckung auf einer 3 cm starken Holzbohlenlage kann die Wärmedurchgangszahl ebenfalls zu 4,0 angewendet werden. Der Wärmeabfluss in den Baugrund ist noch durch Versuche festzustellen.

F = Flächeninhalt der Schalung bzw. der Abdeckung der Betonoberfläche in m^2 .

T = Temperatur des Betons an der Schalung in $^\circ\text{C}$.

T_a = Temperatur der Umgebung (Luft, Baugrund) in $^\circ\text{C}$.

t_2 = Erwärmungsdauer in Stunden.

Die rechnerische Ermittlung der Randtemperatur des Betonkörpers stösst auf grosse Schwierigkeiten. Der Verlauf der Aussentemperatur hängt von den örtlichen klimatischen Bedingungen ab und kann nur sehr angenähert in Rechnung gesetzt werden. Mit genügender Genauigkeit kann man folgendes annehmen:

$$T - T_a = 0,7 \cdot (0,90 T_{\max} - T_a') \text{ in } ^\circ\text{C}$$

Hierin bedeutet:

T_a' = tiefste Temperatur der Umgebung in $^\circ\text{C}$.

Der Wärmeverlust kann demnach mit für die Praxis genügender Genauigkeit folgendermassen berechnet werden zu:

$$Q_V = 0,7 k F (0,90 T_{\max} - T_a') t_2 \text{ in kcal} \quad (6a)$$

Durch Abdeckung der nicht verschalteten Betonoberfläche mit Segeltuchplanen und dergleichen auf Holzbohlen wird eine wärmeisolierende Luftschicht geschaffen, die nicht nur bei der Erwärmung, sondern besonders bei der nachfolgenden Auskühlung eine günstigere Wärmeverteilung zur Folge hat. Gleichzeitig wird das verdunstende und verdampfende Anmachwasser an der Plane kondensiert und dadurch wieder für die Bindung im Beton nutzbar gemacht. Durch diese Luftschicht wird auch der Einfluss einer Aussenluftströmung auf die Wärmeabführung stark vermindert. Durch die Wasserkondensierung wird auch ein Teil der Wärme zurückgewonnen.

Das *Endziel* dieser Berechnungen ist die *Ermittlung* der für einen Bauteil von gegebenen Abmessungen anzuwendenden *elektrischen Spannung*, des höchsten Stromflusses zur *Bemessung der Transformatoren* und der aufzuwendenden *Stromenergie*.

Beispiel: Betonmauer ohne Bewehrung, beidseitig geschalt, Dicke 20 cm, P 200 plastische Konsistenz, äussere Lufttemperatur ± 0 bis -10°C , maximale Körpertemperatur $+50^\circ\text{C}$, Anfangstemperatur des Betons $+10^\circ\text{C}$, Erwärmungsdauer 10 Stunden.

Es folgt für 1 m² Betonmauer:

- a) die Abbindewärme mit (3) zu

$$Q_A = \alpha Z \\ = 200 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,2 \text{ m} \cdot 1,0 \text{ m}^2 \cdot 30 \\ Q_A = 1200 \text{ kcal.}$$

- b) die Körperwärme mit (5) zu

$$Q_K = G c (T_{\text{mittel}} - T_0) \\ = 0,2 \text{ m}^3 \cdot 2400 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,27 (0,95 \cdot 50 - 10) \\ Q_K = 4860 \text{ kcal.}$$

- c) der Wärmeverlust mit (6a) zu

$$Q_V = 0,7 k F (0,9 T_{\max} - T_a') t_2 \\ = 0,7 \cdot 4,0 \cdot 2 \text{ m}^2 \cdot [0,9 \cdot 50 - (-10)] 10 \\ Q_V = 3080 \text{ kcal.}$$

- d) die durch den elektrischen Stromdurchfluss zu erzeugende Wärmemenge mit (2) zu

$$Q_E = Q_K + Q_V - Q_A = 4760 + 3080 - 1200 \\ Q_E = 6640 \text{ kcal.}$$

- e) der elektrische Widerstand mit (1) zu

$$R_{\min} = \frac{l}{q} \frac{1}{a(z+w)^2} \\ = \frac{0,2 \text{ m}}{1,0 \text{ m}^2} \cdot \frac{1}{2,7 \cdot \left(\frac{0,200}{3,1} + 0,160\right)^2} = 1,46 \Omega/\text{m}^2 \\ R_{\min} = 1,46 \Omega/\text{m}^2$$

- f) die elektrische Spannung mit (4) zu

$$Q_E = 0,864 \cdot \frac{E^2}{1,36 R_{\min}} t_2 \text{ bzw.} \\ E^2 = \frac{Q_E 1,36 R_{\min}}{0,864 t_2} = \frac{6640 \cdot 1,36 \cdot 1,46}{0,864 \cdot 10} = 1525 \quad E = 39 \text{ V} \\ E = 40 \text{ V}$$

Somit folgt die maximale Transformatoren-Leistung L nach dem Joule'schen Gesetz zu

$$L = E I \text{ bzw.} \\ = \frac{E^2}{R_{\min}} = \frac{1525}{1,46} = 1045 \text{ Watt} \\ L = 1045 \text{ Watt bzw. } 1,05 \text{ kW}$$

und der totale Stromverbrauch zu

$$L_h = \frac{L}{1000 \cdot 1,36} t_2 \\ = \frac{1045}{1000 \cdot 1,36} \cdot 10 \\ = 7,7 \cdot 1,2 = 9,3 \text{ kWh/m}^2 \\ L_h = 9,3 \text{ kWh/m}^2$$

Multiplikator 1,2 = Mehrstromverbrauch für die Heizdauerverlängerung über das Temperaturmaximum hinaus.

Die Stromspannung wird so niedrig gewählt, dass innerhalb der zur Verfügung stehenden Zeit der Beton zum Abbinden gebracht wird und so weit erhärtet ist, dass er ohne Schaden den tieferen Temperaturen ausgesetzt werden kann. Spannungen unter 50 V sind normalerweise ungefährlich und der Bauplatz bedarf keinerlei besonderer Schutzmassnahmen. Bei höhern Spannungen, die bei der Volumen- und Nadelerwärmung unter Umständen zur Anwendung kommen müssen, sind Absperr- und Sicherheitsmassnahmen vorzusehen.

Um die Ermittlung für überschlägige Berechnungen zu vereinfachen, können selbstverständlich unter Einbusse an Genauigkeit Abbindewärme und Wärmeverlust, die sich teilweise kompensieren, vernachlässigt werden.

Die Erwärmungsdauer wird zweckmässig um $\frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{2}$ der Zeitdauer bis zum Eintritt des Temperaturmaximums verlängert, eine Massnahme, die auch mit Rücksicht auf die praktische Unmöglichkeit, jeden Betonzwinkel usw. direkt zu erwärmen, zweckmässig erscheint. Diese unerwärmten Betonteile, die in ihrer Ausdehnung naturgemäss auf ein Minimum beschränkt werden sollen, werden indirekt durch die benachbarten elektrisch behandelten Betonteile miterwärmt. Auch wirkt sich die längere Erwärmungsdauer günstig auf die gleichmässige Temperaturabnahme und gute Wärmeverteilung während der ersten Phase des Temperaturabfalls aus. Eine Uebererwärmung ist bei richtig gewählter Stromspannung infolge stetiger Zunahme des Ohm'schen Widerstandes nicht zu befürchten; die Kosten sind auch für diese Zusatzwärmerung nurmehr gering (etwa 20 % der normalen Behandlungskosten).

Die Abkühlung eines abgeordneten Betonkörpers mit gleichmässiger Temperatur verursacht keine inneren Spannungen. Diese treten erst dann auf, wenn die Wärmeverteilung im Betonkörper ungleichmässig ist (meist gegen die Schalung abfallend). Bei Temperaturengleichung infolge der stärkeren Längenverkürzungen des Kerns werden darin Zugspannungen, in den Randpartien Druckspannungen auftreten. Diese inneren Spannungen sind zum grösseren Teil die Ursache einer Druckfestigkeitsverminderung des elektrisch behandelten Betons. Die Biegefestigkeiten der Versuchsprismen zeigen keinen Rückgang gegenüber den unbehandelten Prismen, dagegen war bei der tiefsten Versuchstemperatur von -15°C ein Druckfestigkeitsabfall von 10 bis 20 % festzustellen. Die Betonprismen waren aber nicht durch eine wärmeisolierende Planenabdeckung zugedeckt. In der Praxis werden bei den zusammenhängenden Betonteilen, bei zweckmässiger Abdeckung und verlängerter elektrischer Erwärmung über das Temperaturmaximum hinaus geringere Festigkeitsrückgänge zu erwarten sein. Auch wären Festigkeitsabfälle bis zu 20 % bei der heutigen Entwicklung der Bindemittelindustrie und Betonfabrikation noch tragbar.

Es wurden auf einer Baustelle orientierende Versuche mit zwei Eisenbetonbalken (mit Seitenblechen erwärmt) und zwei Hohlkörperdecken (Teppichelektroden) durchgeführt, wovon je ein Versuchsstück in einer Baracke bei einer Temperatur von $+10^\circ\text{C}$ während mehrerer Tagen gelagert wurde, während das Schwesterstück, gleichzeitig hergestellt, elektrisch behandelt und nachher im Freien der wechselnden Temperatur ausgesetzt wurde. Die Verformungen und Bruchlasten waren, auf gleiche Abmessungen bezogen, bei beiden Behandlungsarten nicht voneinander verschieden, so dass also eine Beeinträchtigung des Verformungsvermögens des Betons nicht stattgefunden hat. Der Nachweis, dass die andern Eigenschaften: Schwinden, Wasserdurchlässigkeit usw. durch die elektrische Behandlung des Betons nicht verändert werden, ist noch — obwohl dies nicht im ungünstigen Sinne zu erwarten ist — durch entsprechende Versuche zu erbringen.

RATSCHLÄGE FÜR DIE PRAXIS.

Der Beton, bzw. seine Komponenten sind im Winter so zu erwärmen, dass er mit einer Temperatur von $+10^\circ\text{C}$ in die Schalung eingefüllt werden kann. Diese Massnahme soll verhindern, dass der Beton durch eine Abkühlung an

der Schalung, oder an fertiggestellten Bauteilen, oder auf dem Baugrund sich so stark abkühlt, dass er durch teilweise Umwandlung des Anmachwassers in Eis an Verarbeitbarkeit einbüsst und deshalb eine ungenügende Verdichtung des Betons befürchtet werden muss. Aus diesem Grunde sollte Beton mit einer Temperatur von weniger als $+5^{\circ}\text{C}$ nicht mehr in die Schalung gebracht werden.

Für die elektrische Behandlung von frischem Beton können vier verschiedene Arten von Erwärmungselektroden verwendet werden.

1. Die *Volumenerwärmung* nach Abb. 3a zeichnet sich durch den mit dem Einlegen von Blechen an die Schalung erzielten gleichmässigen Stromdurchfluss aus. Die Wärme wird in allen Punkten gleichzeitig und gleichmässig entwickelt, wodurch auch der Abbindeprozess gleichzeitig in allen Punkten eingeleitet und beendet wird. Diese Erwärmungsart eignet sich hauptsächlich für stabförmige Bauteile (Säulen, Balken, usw.). Die Elektrodenbreite kann mit Rücksicht auf die gute Wärmeleitfähigkeit des frischen Betons etwas geringer als die Säulenbreite bzw. Balkenhöhe gewählt werden. Die Ermittlung des Strombedarfes ist nach dem entwickelten Berechnungsverfahren ohne weiteres durchführbar.

2. Die *Oberflächenerwärmung* nach Abb. 3b ist für flächenartige Bauteile mit nicht zu grossen Dickenabmessungen vorteilhaft (Decken, Platten, Fundamente aus Eisenbeton, Wände, usw.). Der Strom sucht zuerst seinen Weg durch die der Elektrode anliegenden Betonteile. Erst nach Einleitung des Abbindeprozesses und der damit verbundenen Zunahme des elektrischen Widerstandes werden auch die tiefer liegenden Partien mehr und mehr vom Strom durchflossen, erwärmt und das Abbinden eingeleitet. Die Wärme fliesst nun ebenfalls in die untern Schichten des Betons ab, so dass auch diese eine Temperatur erreichen, bei welcher der Abbindeprozess beschleunigt wird.

Diese Erwärmungsart verlangt einige Massnahmen zur Vermeidung von grösseren innern Spannungen bei der Abkühlung und der Beeinträchtigung der Festigkeitseigenschaften durch Feuchtigkeitsverluste infolge Verdampfens des Anmachwassers. Die Erwärmungsdauer muss hier mindestens um $\frac{1}{3}$ verlängert werden, so dass ein weitgehender Temperaturausgleich stattfinden kann, ehe nach Abstellen der Erwärmung die Abkühlung vorsichgehen kann.

Die plattenförmigen Bauteile sind auch mit Rücksicht auf die unwirtschaftlichen Wärmeverluste und die daraus entstehenden Temperaturgefälle innerhalb der Bauteile durch Abdecken mit grossen Planen zu schützen. Die Berechnung des elektrischen Widerstandes und der Energie für diese Erwärmungsart wird unter Verwendung von (1) durch folgende Beziehung ermöglicht:

$$R_{\min} = \frac{b_1}{m d} \frac{1}{a(z+w)^2} \quad \text{in } \Omega \quad \dots \quad (7)$$

Hierin bedeuten:

b_1 = Lamellenabstand in m,

m = Anzahl der Lamellenabstände pro m,

d = mittlere vom elektrischen Strom durchflossene Schicht in m.

$R_{\text{mittel}} = 1,4$ bis $1,5 R_{\min}$, je nach Plattenstärke von 6 bis 20 cm.

Die für die Volumenerwärmung entwickelte Berechnungsweise für den Stromverbrauch lässt sich auch hier anwenden. Auch die Wärmeverluste werden von den angegebenen Werten, wie sie in (6) zusammengefasst sind, nicht wesentlich abweichen. Verwertbare Bauverfahren sind aber zur Ueberprüfung dieser Angaben noch heranzuziehen. Als mittlere Stromschicht kann bei vorzüglichem Kontakt zwischen Teppich und Beton 2,5 cm in Rechnung gesetzt werden. Ist der Kontakt besonders an den Rändern der Bleche nicht einwandfrei, wird vorsichtigerweise mit 1 bis 2 cm Stromschicht gerechnet.

Die Blechlamellen werden mit Rücksicht auf die günstigere Auflagerung in der Breitseite leicht gebogen; dadurch gewährleisten die stromübertragenden Randteile einen besseren Kontakt mit der Betonoberfläche; auch erreichen die Lamellen dadurch eine grössere Steifigkeit.

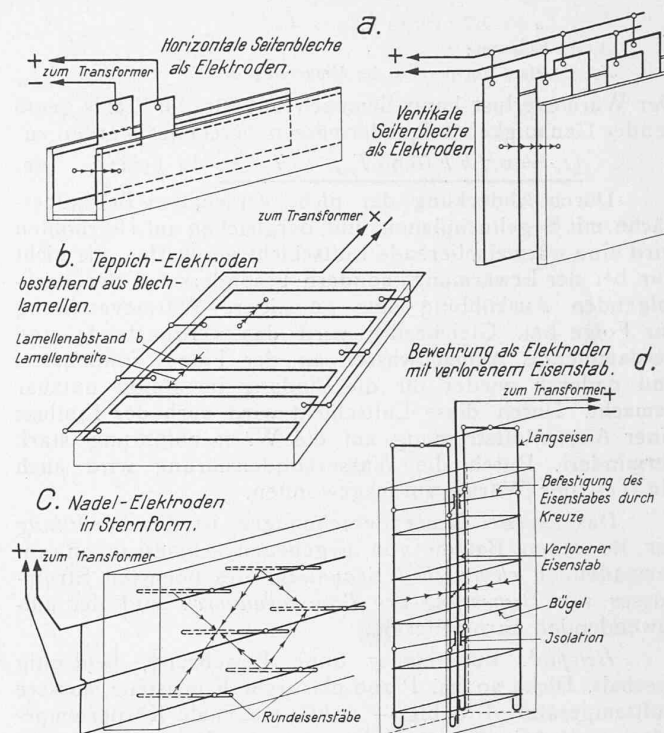


Abb. 3. Verschiedene Elektrodenarten: a) Volumenerwärmung mit horizontalen und vertikalen Seitenblechen; b) Oberflächenerwärmung mit Elektrodenteppich; c) Nadelerwärmung mit eingesteckten Abfallrundeisen; d) Bewehrungserwärmung mit verlorenem Eisenstab.

3. Die *Nadelerwärmung* nach Abb. 3c, so genannt nach den in den Beton gesteckten Eisenstäben („Nadeln“), eignet sich vorzugsweise für massive Baukörper (Stützmauern, Pfeiler, usw.). Die aus Abfalleisen hergestellten Nadeln werden eingesteckt und teilweise mit dem einen, teilweise mit dem andern Pol des Transformators verbunden. Infolge der grösseren Stromliniendichte nahe der Nadel wird der Abbindeprozess dort zuerst eingeleitet; dadurch wird der Stromdurchfluss kleiner, noch bevor die andern Teile des Betons in dieser Entwicklungsstufe sind.

Für die Berechnung des Stromdurchflusses kann mit grosser Annäherung der durchflossene Querschnitt mit $\frac{A}{2} b$ in Rechnung gesetzt werden.

Hierin bedeuten:

A = Abstand der Nadeln einer Reihe in m, Reihenabstand $= \frac{A}{2}$

b = Dicke der stromdurchflossenen Schicht in m.

Der Ohm'sche Widerstand errechnet sich unter dieser Voraussetzung zu:

$$R_{\min} = \frac{\sqrt{2}}{4 b} \frac{1}{a(z+w)^2} \quad \text{in } \Omega \quad \dots \quad (8)$$

$R_{\text{mittel}} \cong 1,5 R_{\min}$

und die von der Umwandlung der elektrischen Energie erzeugte Wärmemenge

$$Q_E = \frac{1}{A^2} 0,864 \frac{E^2}{R_{\text{mittel}}} t_2 \quad \text{in kcal} \quad \dots \quad (9)$$

Der Widerstand ist also in erster Annäherung vom Abstand der Nadeln unabhängig. Die elektrische Spannung darf nicht zu hoch gewählt werden, weil bei den Nadeln zufolge der starken Stromdichte das Anmachwasser verdampft und zu Auflockerung und Festigkeitseinbussen im Beton führen könnte. Der Nadelquerschnitt wird deshalb tunlichst gross gewählt.

4. *Bewehrungserwärmung* erhält man durch Anlegen der Spannung an die Bewehrung und an einen „verlorenen“ Zusatzbewehrungsstab nach Abb. 3d, der isoliert im Käfig der Bewehrung in möglichst gleichen Abständen befestigt wird.

Um lokale Uebererwärmungen an der Oberfläche zu vermeiden, kann zweckmässig zu Beginn der Erwärmung mit einer geringeren elektrischen Spannung gearbeitet und

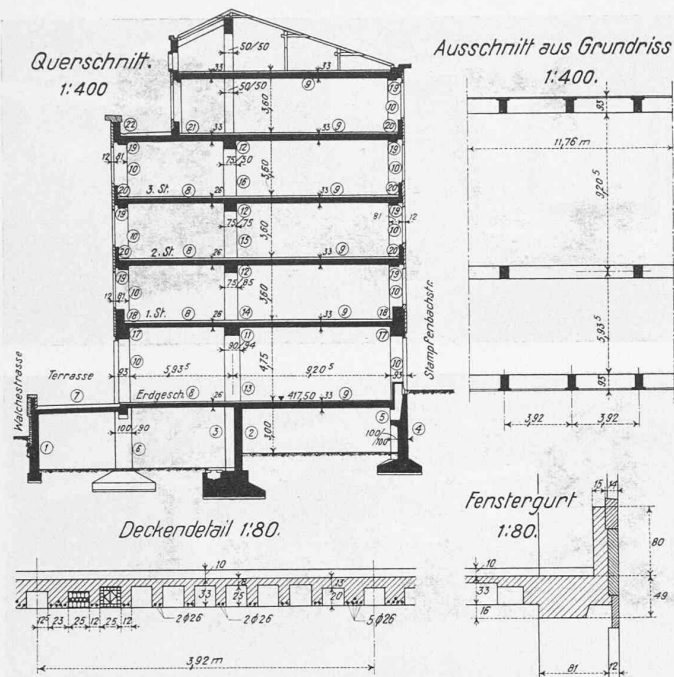


Abb. 4. Genereller Erwärmungsplan des Verwaltungsgebäudes «Walchetur» Zürich. (Arch. Gebr. Pfister, Eisenbeton: Ing. E. Rathgeb.)

Erwärmungstabelle für ein Bureauhaus gemäss Abb. 4.

Aussentemperatur: -10°C .

Position	Erwärmungsart	Abmessungen der Elektroden	° C Max. Temp.	Er- wärmungs- dauer	Elektr. Spannung V	Max. Leistung kW	Totaler Strom- verbrauch kWh	Masseneinheit	
1	Nadeln	A = 60 cm	50	14	60	1,96	15,7	m²	
2	Vertikale Seitenbleche	Breite: 15 cm Abstand: 20 cm	50	14	80	1,96	17,3	m²	
3	Bewehrung	—	45	11½	80	4,15	26,6	m	
4	Nadeln	A = 50 cm	50	12½	50	2,44	17,6	m²	
5	Bewehrung	—	45	80	4,15	26,6	m		
6	"	—	45	80	3,87	24,8	m		
7	Lamellentepich	Breite: 7 cm Abstand: 3 cm	60	30	1,67	10,7	m²		
8	"	" "	60	11½	30	1,67	10,7	m²	
9	"	" "	60		30	1,67	10,7	m²	
10	Vertikale Seitenbleche	Breite: 40 cm	45	40	2,37	13,4	}	m	
11	Horizont. Seitenbleche	" 20 cm	45	50	2,08	11,7			
12	"	" 20 cm	45	40	1,36	7,7			
13	Bewehrung	—	45	60	2,20	19,3			
14	"	—		50	1,56	13,7			
15	"	—		50	1,62	14,2			
16	"	—		50	1,30	11,4			
17	"	—		70	3,00	26,5			
18	"	—	45	14	60	1,83	16,2	}	m
19	"	—			60	1,83	16,2		
20	"	—			70	1,16	10,3		
21	"	—			60	1,56	13,8		
22	"	—			60	1,61	14,2		

Anmerkung. Die Kosten für die elektrische Erwärmung des Betons des ganzen Gebäudes, einschliesslich Fundamente und Dachstuhl, stellen sich auf 18,3 % der Kosten der Eisenbetonarbeiten, bzw. auf 7,9 % der Kosten des Rohbaues einschliesslich Steinverkleidung, Maurer-, Zimmer-, Spengler- und Dachdeckerarbeiten, wenn der im Abschnitt 2 (im nächsten Heft) berechnete Ansatz von 18 Fr./m³ Beton in die Rechnung eingeführt wird. Diese Kostenanteile sind aber als maximale zu bewerten.

Erhebliche Ermässigungen der Kosten sind zu erwarten, weil die Ausführungszeit eines solchen grossen Bauwerkes teilweise, wenn nicht zum grössten Teil, in die noch günstige Witterung fällt, bei der die Heizung nur in Bereitschaft gehalten werden muss.

Ist aber das ganze Gebäude zu erwärmen, so senkt sich der Einheitspreis von 18 Fr. erheblich, weil sowohl die Kosten für Installation und Transport als auch die allgemeinen Unkosten bei diesen Gebäudeabmessungen wesentlich kleiner ausfallen.

diese erst später auf diese berechnete Höhe gebracht werden. Die Temperatur sollte im Beton an keinem Punkte über $+60^{\circ}\text{C}$ gesteigert werden. Nicht nur die Wärmeverluste steigen bei höherer Temperatur infolge Verdunstung und Verdampfung des zum Abbinden notwendigen Anmachwassers, sondern auch die Temperaturgefälle (innere Spannungen) innerhalb der Betonkörper werden grösser.

Bewehrungen, besonders Bügel und Schubeisen, stören den elektrischen Stromdurchfluss im Beton. Der Spannungsabfall im Eisen, das im Beton vollständig eingebettet liegt, kann ohne Beeinträchtigung der Rechnungsgenauigkeit vernachlässigt werden. In einem durch Seitenbleche erwärmten Eisenbetonbalken mit geschlossenen Bügeln tritt nach folgender Beziehung ein erhöhter Stromfluss auf:

$$J = J_B \left(1 + \frac{b(d_1 + 3,4)}{2 a_1 e} \right) \text{ in A} \quad (10)$$

Hierin bedeuten:

J_B = Stromstärke im Beton ohne Bewehrung in A

b = Breite des Betonbalkens in cm 20 cm

d_1 = Bügeldurchmesser in cm 0,8 cm

a_1 = Bügelabstand von der Betonoberfläche in cm . . . 1,5 cm

e = Bügelabstand in cm 20 cm

bzw. nach (11) ein verminderter Stromwiderstand:

$$R_{\min} = \frac{R_B}{1 + \frac{b(d_1 + 3,4)}{2 a_1 e}} \text{ in } \Omega \quad (11)$$

Beispiel:

$$\frac{R_B}{1 + \frac{20 \cdot (0,8 + 3,4)}{2 \cdot 1,5 \cdot 20}} = \frac{R_B}{2,4}$$

$$R_{\min} = \frac{R_B}{2,4} \quad R_{\text{mittel}} = 1,7 R_{\min}$$

Aus dieser Formel geht hervor, dass der Abstand a_1 der Bügel von der Betonoberfläche von ausschlaggebender Bedeutung ist. Liegt beispielsweise die Bewehrung in einem Abstand von nur 0,5 cm vom Elektrodenblech entfernt, d. h. unter der Betonoberfläche, so steigt der Faktor 2,4 auf 5,2 an. Der Eisenkäfig muss deshalb mit besonderer Sorgfalt geflochten werden, so dass an keiner Stelle die Bügel zu nahe an die Oberfläche des Betons herankommen. Um eine diesbezüglich grössere Sicherheit zu erlangen, wird zweckmässig beim Konstruieren der Eisenabstand vergrössert. Der Einfluss der Längseisen kann analogerweise berücksichtigt werden zu:

$$R_{\min} = \frac{R_B}{1 + \frac{b(d_1 + 3,4)}{2 a_1 e} + \frac{b(d_2 + 3,4)}{a_2 h}} \text{ in } \Omega \quad (11a)$$

Hierin bedeuten:

R_B = Elektrischer Stromwiderstand im Beton ohne Bewehrung in Ω ,

d_2 = Durchmesser der Längseisen in cm,

a_2 = Abstand der Längseisen von der Betonoberfläche in cm,

h = Höhe des Betonbalkens in cm.

Entsprechend dem stärkeren Stromfluss im Eisen werden auch grössere Wärmemengen erzeugt und deshalb wird der Abbindeprozess in der Umgebung der Eisen und besonders im darüberliegenden Beton zuerst eingeleitet. Für die Wärmeverteilung ist die Bewehrung günstig.

Es ist notwendig, dass die elektrische Erwärmung des Betons planmässig an Hand eines besonderen *Erwärmungsplanes* durchgeführt wird, in dem Angaben über die Art der Elektroden, ihre Abstände und Abmessungen, Stromspannung und Erwärmungsdauer für jeden Konstruktionsteil gemacht werden (Abb. 4 mit Tabelle). Temperaturen sind zur Sicherheit besonders an jenen Punkten zu messen, die durch die Erwärmung nicht voll erfasst werden, wie z. B. Plattenunterkanten in dicken Decken, in Ecken usw.

Unmittelbar nach dem Betonieren eines Bauteiles (Platten und Balken) ist unbedingt mit der Installation der Elektroden und Abdeckung durch auf Bohlen liegende Planen, Tücher, Säcke usw. zu beginnen, die bis zum vollständigen Temperaturausgleich mit der Aussenluft zu belassen sind. Während der Erwärmungszeit kann die Abdeckung zur Förderung des Abbinde- und Erhärtungsprozesses zweckmässig mit warmem Wasser begossen werden.

Für die Einarbeitung in die Berechnungsart können die auf Versuchsergebnissen aus Laboratorium und Versuchserwärmungen auf einigen Bauplätzen aufgebauten Formeln gute Dienste leisten. Nach dem Einleben in diese neue Methode und nach einigen persönlichen Erfahrungen wird für den Ausführenden sowohl die Berechnung als auch die Anwendung sich erheblich vereinfachen. (Schluss folgt.)