

Gewichtete Reife des Betons

Autor(en): **Egmond, Bram van / Jacobs, Frank**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Cementbulletin**

Band (Jahr): **67 (1999)**

Heft 11

PDF erstellt am: **15.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-153854>

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.

Gewichtete Reife des Betons

Mit dem Konzept der gewichteten Reife ist es möglich, den Einfluss unterschiedlicher Temperaturen auf die Festigkeitsentwicklung eines Betons zu bestimmen.

Die Kenntnis der Druckfestigkeit eines wenige Stunden alten Betons kann für viele Anwendungen von Interesse sein. Beispiele sind das Festlegen der frühestmöglichen Termine für das Ausschalen, für das Vorspannen oder für das Transportieren von Betonelementen in der Vorfabrikation.

Die Festigkeitsentwicklung eines «jungen» Betons hängt aber von vielen Faktoren ab. Zu nennen sind hier unter anderem die Art und Menge des Zements und der Zuschlagstoffe, der W/Z-Wert, gegebenenfalls eingesetzte Zusätze (Zusatzmittel und Zusatzstoffe), die Beton- und die Umgebungstemperatur sowie die Nachbehandlung. Dennoch hat es nicht an Versuchen gefehlt, einfache Verfahren zu entwickeln, mit denen die zu erwartende Druckfestigkeit eines Betons zu beliebigen Zeitpunkten der frühen Festigkeitsentwicklung vorausgesagt werden kann. Dazu gehört auch das Konzept der Reife bzw. der gewichteten Reife.

Frühe Reifemodelle

Reifemodelle ermöglichen Aussagen über die Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Zeit und von der Temperatur. Ausgangspunkt ist die These:

gleiche Reife = gleiche Festigkeit.

Die einfachste Form einer Reifefunktion stammt aus den Fünfzigerjahren. Sie wurde von *Saul* vorgeschlagen:

$$(1) \text{ Reife } R = \sum [\Delta t_i \cdot (T_i + 10)] \text{ in } [h \cdot ^\circ C],$$

wobei

T_i = mittlere
Betontemperatur im Zeitintervall Δt_i und
 Δt_i = Zeitintervall in Stunden mit gleicher Temperatur T_i

In Worten ausgedrückt heisst dies, dass der zeitliche Verlauf der Betontemperatur in einzelne Abschnitte unterteilt wird. Für Abschnitte mit kaum unterschiedlichen Temperaturen wird das Produkt aus dem Zeitintervall in Stunden und der um $10^\circ C$ erhöhten Temperatur bzw. mittleren Temperatur gebildet. Die Reife R ist die Summe dieser Produkte. Betone gleicher Zusammensetzung, die bei verschiedenen Temperaturen erhärten, erreichen die gleiche Festigkeit, wenn sie die gleiche Reife aufweisen. Theoretisch müsste nach *Saul* bei-

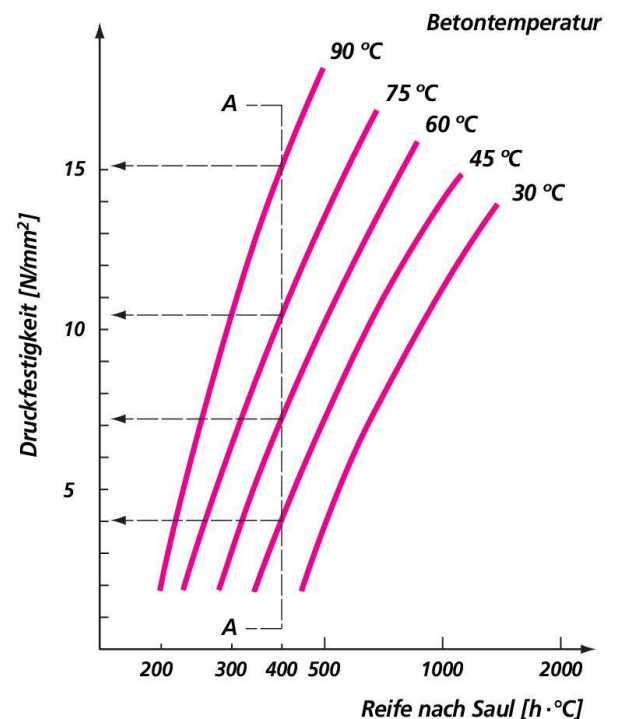


Abb. 1 Nach *Saul* [1] müssten die Druckfestigkeiten der gleich zusammengesetzten, aber bei unterschiedlichen Temperaturen erhärteten Betone bei gleicher Reife gleiche Druckfestigkeiten aufweisen (z.B. bei $400 h \cdot ^\circ C$, d.h. bei Schnitt A-A) [2, 5].

Grafik: [2]/TFB

spielsweise ein Beton, der während 30 Stunden bei konstant $20^\circ C$ erhärtet, die gleiche Druckfestigkeit aufweisen wie ein Beton gleicher Zusammensetzung, der während 18 Stunden bei konstant $40^\circ C$ erhärtet:

$$(2) \quad 30 (20 + 10) = 900 \\ = 18 (40 + 10) [h \cdot ^\circ C]$$

Dies stellt eine sehr grosse Vereinfachung dar [2]: Selbst identische Betone, die sich nur in der Erhärtemperatur unterscheiden, haben bei gleicher Reife stark unterschiedliche Druckfestigkeiten (siehe *Abbildung 1*).

In der Zwischenzeit sind zahlreiche verfeinerte Reifemodelle entwickelt worden (siehe z.B. [6]). Im Folgenden werden wir uns ausschliesslich mit der Methode nach *de Vree* befassen. Sie wird in den Niederlanden seit vielen Jahren erfolgreich eingesetzt [2]. Gegenwärtig steht der Entwurf zur niederländischen Norm NEN 5970 vor der Publikation, in dem die Anwendung der gewichteten Reife geregelt wird [7].

Das Verfahren ist aber auch in Deutschland bekannt: Es wurde bereits 1991 in einer Ergänzung zur DIN 1048 vorgestellt [3] sowie 1999 in E DIN 1045-3 («Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton») aufgenommen [8].

Die Methode nach de Vree

Die Methode nach *de Vree* [2, 5] ist eine Verfeinerung und Weiterentwicklung der Reifefunktion nach *Saul*. An die Stelle der Reife tritt die gewichtete Reife, in der das temperaturabhängige Erhärtungsverhalten von Betonen ebenso berücksichtigt wird wie die Zementart. Die Formel der gewichteten Reife *cal R* wird dadurch wesentlich komplizierter [3]:

$$(3) \quad \text{cal R} = \sum \Delta t_i \cdot r_i \quad \text{in h} \cdot ^\circ\text{C},$$

wobei

Temp. [°C]	C-Wert							
	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65
6	11	10	10	9	9	9	8	8
7	12	11	11	10	10	9	9	9
8	13	12	12	11	11	10	10	10
9	14	13	12	12	12	11	11	10
10	15	14	13	13	12	12	12	11
11	16	15	14	14	13	13	12	12
12	17	16	15	15	14	14	13	13
13	18	17	16	16	15	15	14	14
14	19	18	17	17	16	16	15	15
15	20	19	18	18	17	17	17	16
16	21	20	20	19	19	18	18	17
17	22	21	21	20	20	19	19	19
18	23	22	22	21	21	21	20	20
19	24	24	23	23	22	22	22	21
20	25	25	24	24	24	23	23	23
21	27	26	26	25	25	25	24	24
22	28	27	27	27	26	26	26	26
23	29	29	28	28	28	28	28	27
24	30	30	30	30	29	29	29	29
25	32	32	31	31	31	31	31	31
26	33	33	33	33	33	33	33	33
27	35	35	35	35	35	35	35	35
28	36	36	36	36	36	37	37	37
29	38	38	38	38	38	39	39	39
30	39	39	40	40	40	41	41	41
31	41	41	42	42	42	43	44	44
32	43	43	44	44	45	45	46	47
33	44	45	45	46	47	48	49	50
34	46	47	47	48	49	50	51	52
35	48	49	49	50	51	53	54	55
36	50	51	52	53	54	56	57	59
37	52	53	54	55	57	59	60	62
38	53	55	56	58	60	62	64	66
39	55	57	59	61	62	65	67	69
40	57	59	61	63	65	68	70	73
41	60	62	64	66	69	71	74	77
42	62	64	66	69	72	75	78	82
43	64	66	69	72	75	79	82	86
44	66	69	72	75	79	82	86	91
45	68	71	75	78	82	86	90	95
50	81	86	91	97	103	110	117	124
60	112	122	133	146	160	175	191	210
70	151	170	192	217	244	276	311	350
80	203	236	275	319	372	432	502	582

Tab. 1 Gewichtete Reife r_i und C-Werte für das Zeitintervall $\Delta t_i = 1 \text{ h}$ in Abhängigkeit von der Temperatur (gekürzt) [2, 5].

Δt_i = Zeitintervall in Stunden

r_i = gewichtete Reife innerhalb des Temperaturintervalls Δt_i

$$(4) \quad r_i = \int_{-10^\circ\text{C}}^{T_i} (C^{0,1T} - 1,245) dT$$

$$= \frac{10}{\ln C} [C^{0,1T_i} - 1,245 - C^{-2,245}]$$

in °C

T_i = mittlere Erhärtungstemperatur im Temperaturintervall Δt_i (1 h)

C = zementspezifischer Kennwert.

Mit den C-Werten wird die Temperaturempfindlichkeit des verwendeten Zements wiedergegeben. Sie müssen für jede Zementsorte separat ermittelt werden. Ein mögliches Vorgehen wird im Kasten «Bestimmung des C-Werts» beschrieben.

Die r_i -Werte für unterschiedliche Temperaturen und C-Werte können mittels der Formel (4) berechnet werden. Sie sind tabellarisch erfasst [2, 5, 6]. Eine Auswahl von r_i -Werten ist in *Tabelle 1* zusammengestellt.

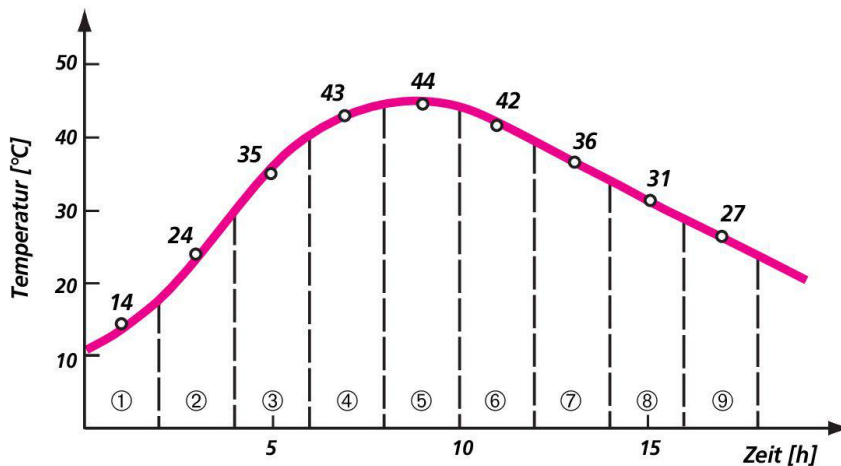


Abb. 2 Entwicklung der Bauteiltemperatur (Berechnung der gewichteten Reife $cal R$ in Tabelle 2) [3].

Grafik: [3]/TFB

Berechnung der gewichteten Reife

Ein Beton, der bei konstant 15 °C erhärtet und dessen C-Wert 1,50 beträgt, weist nach 1 Stunde eine gewichtete Reife $cal R$ von $1 \cdot 17 \text{ h} \cdot ^\circ\text{C}$ auf. Nach 24 Stunden gilt:

$$(5) \quad cal R = 24 \cdot 17 = 408 \text{ h} \cdot ^\circ\text{C}.$$

Ungefähr die gleiche gewichtete Reife $cal R$ wird bereits nach 15 Stunden erreicht, wenn sich die Temperatur – ausgehend von 15 °C – stündlich um 1 °C erhöht.

In Abbildung 2 ist die Entwicklung der Temperatur in einem Bauteil aufgezeichnet [3]. Die dazu ge-

sind, reicht eine Unterteilung in Streifen von 2 Stunden ($\Delta t_i = 2 \text{ h}$) aus, um die gewichtete Reife $cal R = \sum \Delta t_i \cdot r_i$ zu berechnen; nach 16 Stunden beträgt sie etwa $794 \text{ h} \cdot ^\circ\text{C}$.

Eichgrafiken

In den Niederlanden wurden zahlreiche Untersuchungen durchgeführt, um die Zuverlässigkeit der Methode nach de Vree zu dokumentieren. Die Resultate einer derartigen Untersuchung [5] sind in Abbildung 3 zusammengefasst: Für den untersuchten Beton gilt im Temperaturbereich zwischen 5 und 65 °C, dass bei gleicher gewichteter Reife $cal R$ eine ähnliche Druckfestigkeit resultiert.

hörende gewichtete Reife $cal R$ wird in Tabelle 2 ermittelt. Da die Temperaturänderungen relativ langsam

Intervall	mittlere Temperatur [°C]	Wert r_i nach Tab. 1 [°C]	gewichtete Reife $cal R$ [h · °C]
1	14	17	$2 \cdot 17 = 34$
2	24	30	$2 \cdot 30 = 60$
3	35	49	$2 \cdot 49 = 98$
4	43	69	$2 \cdot 69 = 138$
5	44	72	$2 \cdot 72 = 144$
6	42	66	$2 \cdot 66 = 132$
7	36	52	$2 \cdot 52 = 104$
8	31	42	$2 \cdot 42 = 84$

Gewichtete Reife nach 16 h Erhärtung: $cal R = \sum \Delta t_i \cdot r_i = 794 \text{ h} \cdot ^\circ\text{C}$

Tab. 2 Ermittlung der gewichteten Reife $cal R$ bei einem C-Wert von 1,40 und einem Erhärtungsalter von 16 Stunden (Temperaturverlauf in Abbildung 2 dargestellt). Bitte beachten: Das Zeitintervall Δt_i beträgt 2 Stunden.

Damit von der gewichteten Reife auf die Druckfestigkeit eines Betons geschlossen werden kann, müssen allerdings erst Eichgrafiken erstellt werden.

Diese Eichgrafiken gelten immer nur für eine bestimmte Betonart, denn in der Formel von *de Vree* sind – wie bereits erwähnt – lediglich die Einflüsse der Temperatur und der Zementsorte auf die gewichtete Reife berücksichtigt. Änderungen der Betonzusammensetzung (Zuschlagstoffe, Zusatzmittel, Zusatzstoffe, W/Z-Wert) haben zur Folge, dass eine neue Eichgrafik erstellt werden muss.

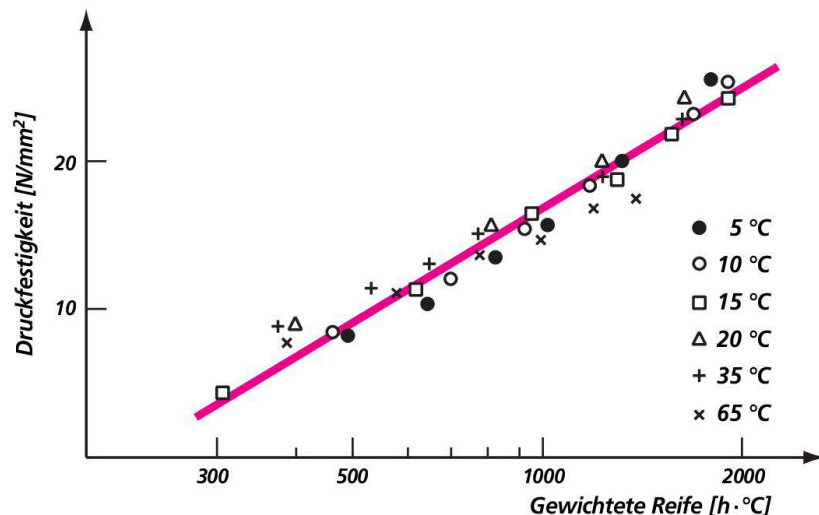


Abb. 3 Beziehung zwischen gewichteter Reife und Druckfestigkeit im Temperaturbereich von 5 bis 65 °C für eine Betonmischung [5].

Grafik: [5]/TFB

LITERATUR

- [1] Saul, A. G. A., «Principles underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure», Magazine of Concrete Research **1951** [6], 127–140.
- [2] de Vree, R.T., und Tegelaar, R.A., «Gewichtete Reife des Betons – Kontinuierliche, zerstörungsfreie Ermittlung der Betondruckfestigkeit», Beton **48** [11], 674–678 (1998).
- [3] «Prüfung von Beton – Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048», erarbeitet vom Arbeitsausschuss DIN 1048, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton **422**, 1–52 (1991).
- [5] «Gewogen rijpheid», Betoniek **6** [20], 1–10 (1984).
- [6] Chengju, G., «Maturity of concrete: Method for predicting early-stage-strength», ACI Materials Journal **86** [4], 341–353 (1989).
- [7] E DIN 1045-3: «Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton» (Februar 1999).
- [8] Entwurf NEN 5970: «Bepaling van de druksterkteontwikkeling van jong beton op basis van de gewogen rijpheid (Oktober 1999).
- [9] «Rijpheid in ontwikkeling» Betoniek **11** [19] (Oktober 1999).

Am Beispiel der in *Abbildung 4* dargestellten Abhängigkeit der Druckfestigkeit vom W/Z-Wert und der gewichteten Reife $cal R$ lässt sich dies gut zeigen: Bei einer gewichteten Reife $cal R = 900 \text{ h} \cdot \text{°C}$ beträgt die Druckfestigkeit bei diesem Beton unter 12 N/mm^2 ($W/Z = 0,55$) bzw. rund 16 N/mm^2 ($W/Z = 0,50$).

Messtechnisches

Auf dem Markt sind so genannte Reifecomputer erhältlich, die die gewichtete Reife eines Betonbauteils laufend berechnen. Ein oder meh-

rere Temperaturfühler werden an verschiedenen Orten des Bauteils entweder in einbetonierte Führungsrohre gesteckt oder direkt einbetoniert und nach der Messung einfach abgeschnitten. (Gegenwärtig werden in der TFB Versuche mit einem derartigen Gerät durchgeführt.)

Anwendungen

Die gewichtete Reife lässt sich für «junge» Betone im Druckfestigkeitsbereich zwischen 5 N/mm^2 und rund 75 % der 28-Tage-Druckfestigkeit einsetzen. Die wohl wichtigste Anwendung wurde bereits erwähnt: Sie besteht in der zerstörungsfreien,

kontinuierlichen Ermittlung der Druckfestigkeit eines jungen Betons, beispielsweise zum Festlegen des geeigneten Zeitpunkts fürs Ausschalen, Vorspannen oder Transportieren von Betonbauteilen.

Weitere Anwendungsmöglichkeiten sind unter anderem [2]:

- Festlegen der Mindestnachbehandlungsdauer, basierend auf der Druckfestigkeit
- Steuerung von Kühlanlagen in Massenbetonen (Beschränkung des Temperaturunterschieds zwischen Innen- und Randbeton)

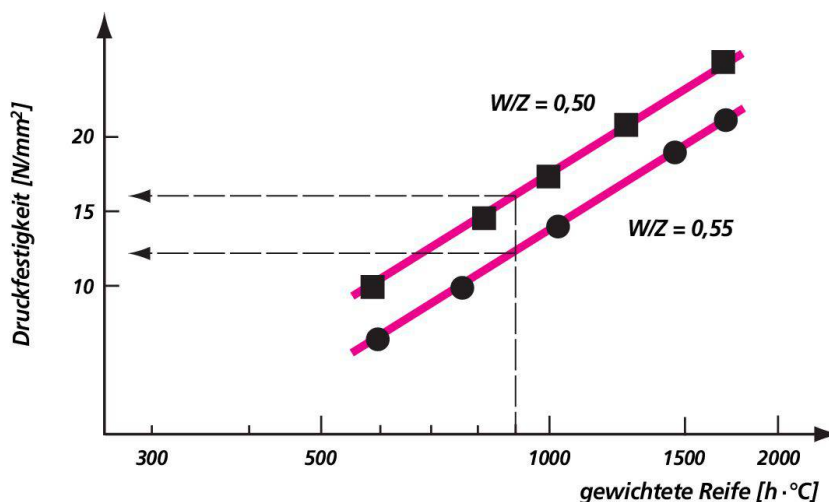


Abb. 4 Abhängigkeit der Druckfestigkeit eines Betons von der gewichteten Reife cal R und vom W/Z-Wert (nach [2]).

Grafik: [2]/TFB

Bestimmung des C-Werts [2]

Der C-Wert wird an einem nach EN 196-1 hergestellten Mörtel bzw. an einem anderen gut reproduzierbaren Beton oder Mörtel ermittelt. Es werden je drei Mörtelprismen oder je fünf 150-mm-Würfel hergestellt und in Wasserbädern von 20 bzw. 65 °C gelagert. An ihnen wird in geeigneten Zeitabständen die Druckfestigkeitsentwicklung ermittelt. Mittels angenommener C-Werte (z. B. C = 1,20, 1,25, 1,30...) werden die jeweiligen gewichteten Reife cal R berechnet. Diese werden in einem Diagramm gegen die dazugehörigen Druckfestigkeiten aufgetragen. Beim «richtigen» C-Wert überlagern sich die beiden Kurven weitestgehend.

- Steuerung von Heizanlagen im Betonfertigteilbau
 - Festlegen des Zeitpunkts zum Schneiden von Fugen in Betonbelägen
 - Festlegen der Verkehrsfreigabe nach Strassenreparaturen.
- Die gewichtete Reife lässt sich zudem auch für die quantitative Abschätzung anderer mechanischer Eigenschaften wie der Spaltzugfestigkeit oder des Elastizitätsmoduls nutzen [3].