

Technical Report

Nr. 5

hochschule 21 :

**Optimierung der
Nachbehandlungsdauer und der
Ausschalfrist
- Reifemonitoring von massigen
Betonbauteilen**

Heike Doll, Olaf Meister und Helmut Marquardt

**hochschule 21 - Technical Report, Nr. 5
2016**

hochschule 21- Technical report

Herausgeber:
hochschule 21 gemeinnützige GmbH
Staatlich anerkannte private Fachhochschule
Harburger Straße 6

21614 Buxtehude

Telefon: +49 4161 648 0
Fax: +49 4161 648 123
E-Mail: info@hs21.de
<http://www.hs21.de>

ISSN 2196-5153

Heike Doll, Olaf Meister, Helmut Marquardt *)

Optimierung der Nachbehandlungsdauer und der Ausschaftrist – Reifemonitoring von massigen Betonbauteilen

1	Einführung	3
2	Reifemonitoring des Betons	4
2.1	Reife und Frühfestigkeit des Betons	4
2.2	Rechnerische Ermittlung der Reife des Betons	6
2.3	Kalibrierung des Reifemonitorings anhand von Prüfkörpern	7
3	Mögliche Zeit- und Kostenersparnis	14
4	Zusammenfassung und Ausblick	15

*) Heike Doll M.Eng., E-Mail: heike.doll.hd@gmail.com

Geboren 1989 in Buchholz in der Nordheide. Duales Studium des Bauingenieurwesens an der hochschule 21 in Buxtehude in Kooperation mit AUG. PRIEN Bauunternehmung (GmbH & Co. KG), Dampfschiffsweg 3 – 9, 21079 Hamburg, 2014 Bachelor of Engineering. Aufbaustudium Management und Engineering im Bauwesen an der Jade Hochschule in Oldenburg, 2016 Master of Engineering.

Dipl.-Ing. Olaf Meister, Leiter der ständigen Betonprüfstelle, AUG. PRIEN Bauunternehmung (GmbH & Co. KG), Dampfschiffsweg 3 – 9, 21079 Hamburg, E-Mail: meister@augprien.de, www.augprien.de

Prof. Dr.-Ing. Helmut Marquardt, Harburger Str. 6, 21614 Buxtehude, E-Mail: marquardt@hs21.de, www.hmarquardt.de

Geboren 1956. Nach Studium des Bau- und Verkehrswesens an der TU Berlin in einem Ingenieurbüro für Tragwerksplanung tätig. 1984 bis 1989 wissenschaftlicher Mitarbeiter bei Prof. Cziesielski am Institut für Baukonstruktionen und Festigkeit der TU Berlin, nach Promotion 1990 bis 1993 dort in der Funktion eines Akademischen Rates. Seit 1993 Professor für Baukonstruktion, Bauphysik, Holzbau und Baustofflehre in Buxtehude, an der heutigen privaten hochschule 21.

Abstract

Dargestellt werden zum einen die theoretischen Zusammenhänge der Reifeberechnung von Beton; zum anderen werden für zwei Standardrezepturen Kalibrierkurven an massigen Baukörpern erstellt. Im Anschluss wird das so kalibrierte Reifemonitoring hinsichtlich Zeit- und Kostenersparnis anhand zweier Betonrezepturen ausgewertet:

- Bei Ansatz der Nachbehandlungsdauern entsprechend DIN 1045-3 wären
 - bei Rezeptur I (mit CEM III/A) nach minimal 3 Tagen und
 - bei Rezeptur II (mit CEM I) nach minimal 2 Tagen50 % der charakteristischen Festigkeit erreicht gewesen; die Außentemperaturen lagen dabei zwischen 10 und 20 °C.
- Beide Rezepturen erreichten jedoch bereits nach 2 Tagen mehr als 100 % der charakteristischen Festigkeit: In den gedämmten Probewürfeln von 1,00 m Kantenlänge wurden an Bohrkernen $41,4 \text{ N/mm}^2$ (Rezeptur I mit CEM III/A) bzw. $39,3 \text{ N/mm}^2$ (Rezeptur II mit CEM I) ermittelt und damit mehr als die in Festigkeitsklasse C 30/37 angestrebten mindestens 37 N/mm^2 .

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass ein kalibriertes Reifemonitoring eine Optimierung der Nachbehandlungsdauern und der Ausschalfristen zulässt.

1 Einführung

Nachbehandlung und Schalung kosten Geld, nicht ausgeschaltete Bauteile behindern den Baufortschritt und verschlechtern die Sichtbetonqualität; deshalb werden in der Praxis möglichst kurze Nachbehandlungsdauern und Ausschalfristen angestrebt. In den gütigen Normen bzw. Merkblättern finden sich jedoch – abhängig von den äußeren Temperaturverhältnissen und der erwarteten Festigkeitsentwicklung des Betons – nur starre Angaben zur notwendigen Nachbehandlungsdauer (Tabelle 1) bzw. Ausschalfrist (Tabelle 2); dabei wird davon ausgegangen, dass bis zum Ende der Nachbehandlungsdauer 50 % und für die Ausschalfrist 70 % der charakteristischen Festigkeit erreicht sein müssen.

Tabelle 1: Mindestdauer der Nachbehandlung bei allen Expositionsklassen außer X0, XC1 und XM nach DIN 1045-3 [1]

Oberflächen-temperatur θ	Mindestdauer der Nachbehandlung in Tagen			
	Festigkeitsentwicklung des Betons $r = f_{cm2} / f_{cm28}$			
	schnell $r \geq 0,50$	mittel $r \geq 0,30$	langsam $r \geq 0,15$	sehr langsam $r < 0,15$
$\theta \geq 25^\circ\text{C}$	1	2	2	3
$25^\circ\text{C} > \theta \geq 15^\circ\text{C}$	1	2	4	5
$15^\circ\text{C} > \theta \geq 10^\circ\text{C}$	2	4	7	10
$10^\circ\text{C} > \theta \geq 5^\circ\text{C}$	3	6	10	15

Tabelle 2: Anhaltswerte für Ausschalfristen gemäß DBV-Merkblatt „Betonschalungen und Ausschalfristen“ [2]

Bauteil-temperatur θ	Anhaltswerte für Ausschalfristen in Tagen			
	Festigkeitsentwicklung des Betons $r = f_{cm2} / f_{cm28}$			
	schnell $r \geq 0,50$	mittel $r \geq 0,30$	langsam $r \geq 0,15$	sehr langsam $r < 0,15$
$\theta \geq 15^\circ\text{C}$	4	8	14	–
$15^\circ\text{C} > \theta \geq 5^\circ\text{C}$	6	12	20	–

In der Praxis wird die für das Beenden der Nachbehandlung und das Ausschalen notwendige Mindestdruckfestigkeit häufig eher erreicht als die Normwerte vermuten lassen; das gilt erfahrungsgemäß insbesondere bei massigen Bauteilen. Werden hier die Festigkeiten an Probewürfeln geprüft, welche am Bauteil gelagert werden, fallen diese aufgrund der geringeren

Wärmeentwicklung in einem Würfel von nur 15 cm Kantenlänge allerdings geringer aus als die realen Festigkeiten im massigen Bauteil. Das Reifemonitoring bietet hier die Möglichkeit, die Nachbehandlungsdauer und die Ausschalfrist zu optimieren.

Im Folgenden werden zum einen die theoretischen Zusammenhänge der Reifeberechnung von Beton dargestellt; zum anderen werden für zwei Standardrezepturen Kalibrierkurven an massigen Baukörpern erstellt. Im Anschluss wird das Reifemonitoring hinsichtlich Zeit- und Kostenersparnis beispielhaft ausgewertet [3].

2 Reifemonitoring des Betons

2.1 Reife und Frühfestigkeit des Betons

Der zeitliche Fortschritt der stark temperaturabhängigen chemischen Reaktion zwischen Zement und Wasser (Hydratation) wird als Reifung des Betons bezeichnet. Die Reife ist ein Maß für den Erhärtungszustand in einem bestimmten Betonalter in Abhängigkeit von der Erhärtungsdauer und dem dazugehörigen Temperaturverlauf. Sie ist so definiert, dass ein unter verschiedenen Temperaturverläufen erhärtender Beton gleicher Zusammensetzung die gleiche Druckfestigkeit erreicht, wenn er die gleiche Reife hat [4] – d.h. Beton erlangt die gleiche Reife bei niedrigeren Temperaturen über einen langen Zeitraum oder bei höheren Temperaturen in einem kurzen Zeitraum.

Die bekannten Betondruckfestigkeitsklassen basieren auf den geprüften Festigkeiten nach 28 Tagen. In Sonderfällen können jedoch auch die sogenannten Frühfestigkeiten maßgebend sein, sie sind definiert als die Festigkeiten von Beton im Alter von einigen Stunden oder Tagen [4]. Bei der Prüfung von Druckfestigkeiten im jungen Alter wirken sich unterschiedliche Temperaturen am stärksten aus. Sogar Probewürfel in Kunststoffschalung ergeben aufgrund des geringeren Wärmeabflusses etwas höhere Festigkeiten als in Stahlschalungen.

Die Festigkeitsentwicklung des Betons lässt sich quantitativ über die Reife abschätzen. Da die Reife vom zeitlichen Temperaturverlauf abhängig ist, können gleiche Festigkeiten zweier Bauteile zu unterschiedlichen Zeitpunkten auftreten. Das Ableiten von Festigkeiten aus der Zeit- und Tem-

peraturgeschichte gilt allerdings nur für Betone gleicher Zusammensetzung, da die Aktivierungsenergie des Zements in die Reifeberechnung eingeht [5]. Für die Abschätzung von zu erwartenden Festigkeiten im Bauteil gibt es folgende vier Möglichkeiten [6]:

- Probewürfel mit vergleichbarer Frischbetontemperatur in einem heizbaren Wasserbad lagern, dessen Temperaturverlauf so gesteuert wird, dass er mit jenem im Bauteil übereinstimmt. Dazu sind Temperaturmessungen an geeigneter Stelle des Bauteils oder an vergleichbaren Proben nötig.
- Probewürfel mit vergleichbarer Frischbetontemperatur in einer der Dicke des Bauteils entsprechenden, wärmegedämmten Schalung erhärten lassen.
- Die Festigkeitsentwicklung in einem Bauteil mit vergleichbarem Temperaturverlauf mit einem Beton-Prüfhammer verfolgen. Dies ist allerdings nur in den oberflächennahen Bereichen möglich.
- Mit Reifeformeln und anderen rechnerischen Verfahren den Einfluss der Temperatur auf die Festigkeitsentwicklung abschätzen.

Für letztere Möglichkeit gibt es verschiedene Ansätze, s. den folgenden Abschnitt 2.2.

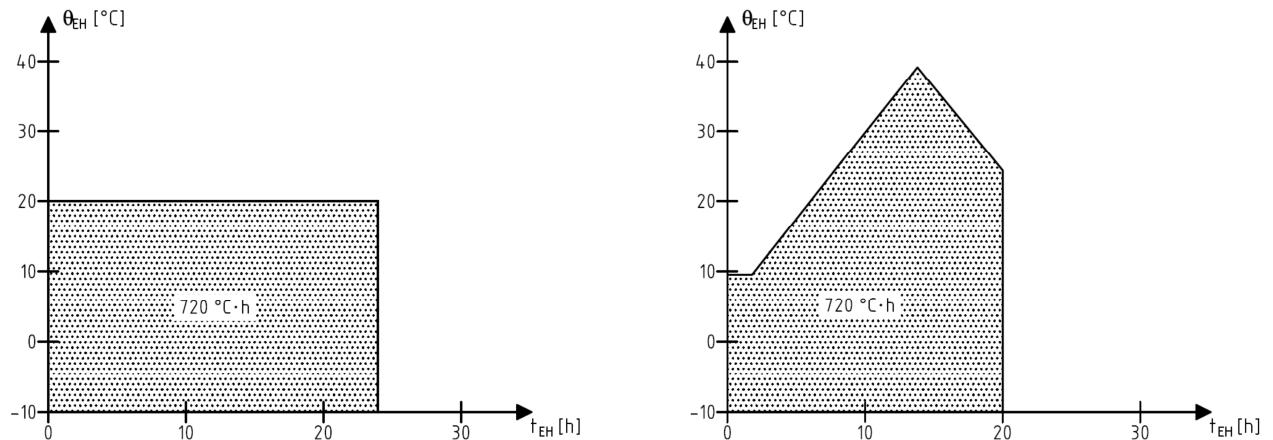


Bild 1: Zwei Erhärtungsbeispiele, dargestellt ist die Erhärzungstemperatur θ_{EH} über der Erhärzungsdauer t_{EH} , beide mit gleicher Reife nach Saul von $720 \text{ } ^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$ (nach [7])

2.2 Rechnerische Ermittlung der Reife des Betons

Die erste rechnerische Beziehung zur Bestimmung der Reife wurde Anfang der 50er Jahre von *Saul* aufgestellt: Die Bildung des Produkts aus Erhärtungszeit t_{EH} und Erhärtungstemperatur θ_{EH} ergibt gleiche Druckfestigkeiten (Bild 1). Die Abhängigkeiten zwischen Temperatur und Druckfestigkeit sind allerdings stark vereinfacht und der Einfluss von verschiedenen Zementarten auf die Druckfestigkeitsentwicklung wird vernachlässigt [7].

Die Reife nach *Saul* wurde von *Papadakis* und *Bresson* durch Einführung eines Faktors weiterentwickelt, welcher die Temperaturempfindlichkeit verschiedener Zemente berücksichtigt; damit erhält man die sogenannte ‚gewichtete Reife‘. Diese Methode kann allerdings nur auf Betontemperaturen von über 20 °C angewendet werden. Niedrigere Temperaturen haben theoretisch bei allen Zementen den gleichen Einfluss, was nicht der Praxis entspricht [7].

Gehalt an Portlandzementklinker	zementspezifischer Kennwert c
> 65 M-%	1,3
50 – 64 M-%	1,4
35 – 49 M-%	1,5
20 – 34 M-%	1,6

Tabelle 3: Zementspezifische Kennwerte (c-Werte) in Abhängigkeit vom Gehalt an Portlandzementklinker [7]

Der Ansatz von *Papadakis* und *Bresson* wurde von *de Vree* durch Einführung des c-Wertes so angepasst, dass die gewichtete Reife auch bei Temperaturen unter 20 °C angewendet werden kann [7]. Der c-Wert charakterisiert die Temperaturabhängigkeit der Festigkeitsentwicklung des betreffenden Zements. Er wird im Allgemeinen von Zementherstellern bestimmt und angegeben (Abschätzung s. Tabelle 3). Der gewichtete Reifezuwachs ΔR_g pro Stunde bei einer bestimmten Temperatur errechnet sich dann nach [7][8] zu:

$$\Delta R_g = \frac{10 \cdot (c^{0,1 \cdot \theta - 1,245} - c^{-2,245})}{\ln c} \quad [^{\circ}C \cdot h] \quad (1)$$

mit c = zementspezifischer Kennwert (c-Wert, vgl. Tabelle 3)
 θ = mittlere Betontemperatur in dieser Stunde [°C]

Zur Ermittlung der gewichteten Reife wird die Temperatur-Zeit-Kurve in Zeitintervalle $j = 1, 2, \dots n$ zerlegt. Für jedes gewählte Zeitintervall j wird die durchschnittliche Temperatur θ_j in einem Versuch gemessen und damit der gewichtete Reifezuwachs $\Delta R_{g,j}$ nach Gl. (1) berechnet. Daraus ergibt sich die gewichtete Reife R_g als Summe über alle Zeitintervalle j :

$$R_g = \sum_j \Delta R_{g,j} \cdot \frac{\Delta t_j}{1 \text{ h}} \quad [^\circ\text{C} \cdot \text{h}] \quad (2)$$

mit $\Delta R_{g,j} =$ Reifezuwachs in einer Stunde $\Delta t_j [^\circ\text{C} \cdot \text{h}]$
 $\Delta t_j =$ gewähltes Zeitintervall [h] (z.B. 2 Stunden)

2.3 Kalibrierung des Reifemonitorings anhand von Prüfkörpern

Durch ein Reifemonitoring, d.h. die Aufzeichnung der Betontemperatur über der Zeit, kann durch Auswertung dieser Daten entsprechend Gl. (1) und (2) die gewichtete Reife eines Betons in Abhängigkeit von der Zeit ermittelt werden. Dabei wird angenommen, dass Betone mit gleicher Zusammensetzung bei gleicher gewichteter Reife identische Druckfestigkeiten aufweisen [7].

Um aus der gewichteten Reife die (Früh-)Festigkeiten prognostizieren zu können, muss für jede Betonrezeptur im Vorfeld eine Kalibrierkurve erstellt werden. In dieser sind der Temperaturverlauf, die Reife und die damit zusammenhängenden Druckfestigkeiten dargestellt. Eine Kalibrierkurve wird erstellt, indem eine Reihe von Probewürfeln in einem Wasserbad bei 20 °C gelagert wird. Zu verschiedenen, aber definierten Zeitpunkten wird deren Druckfestigkeit bestimmt, dokumentiert und die dazugehörige gewichtete Reife berechnet. Diese Werte werden in einer Kalibriergrafik als Funktion dargestellt [7].

Zur Kalibrierung des Reifemonitorings erfolgte eine versuchstechnische Ermittlung der Reifebeziehungen für zwei gängige Betonrezepturen, nämlich

- Rezeptur I: C 30/37, CEM III/A 42,5 N + FA als langsame Rezeptur (Sommerrezeptur) und
- Rezeptur II: C 30/37, CEM I 42,5 R ohne FA als schnelle Rezeptur (Winterrezeptur).

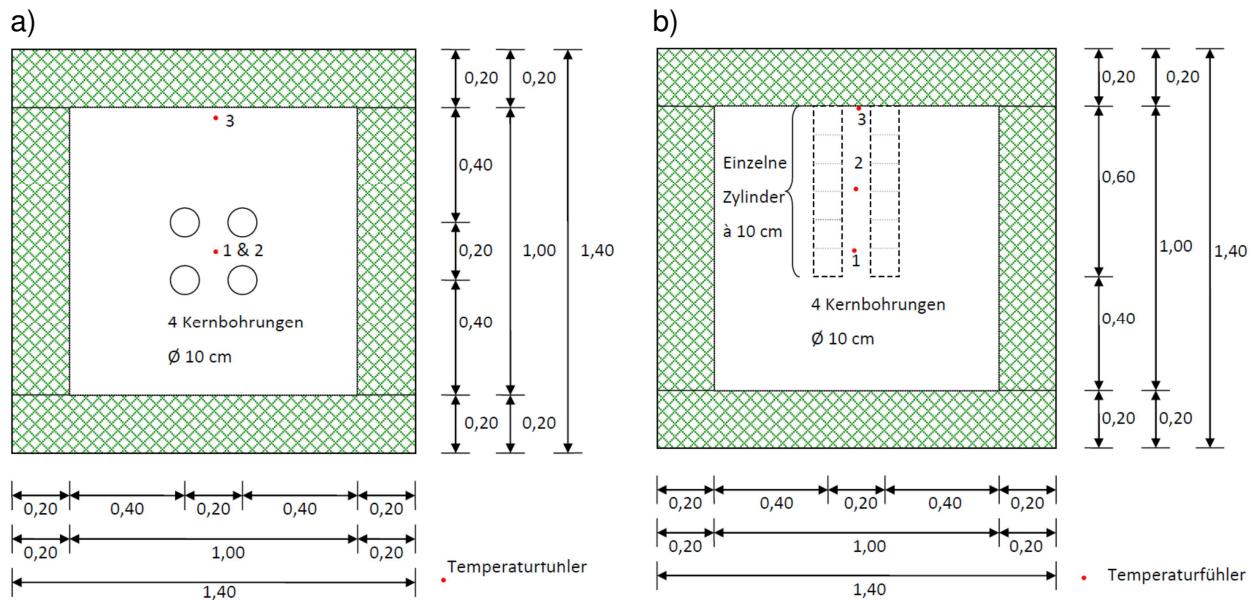


Bild 2: Aufbau der großformatigen Prüfkörper (Würfel, Maße in m) [3]

- a) Draufsicht
b) Vertikalschnitt

Hierfür wurden großformatige, mit umlaufend 20 cm dickem XPS-Hartschaum gut gedämmte Prüfkörper hergestellt (Würfel von 1,00 m Kantenlänge hergestellt, Bilder 2 und 3a), in denen die quasiadiabatische Temperaturerhöhung in Anlehnung an die ZTV-W (LB 215) [9] gemessen wurde. Dazu wurden mit den in Bild 2 dargestellten, einbetonierten Temperaturfühlern die Temperaturen in Intervallen von 15 Minuten kontinuierlich aufgezeichnet. Um die Betondruckfestigkeit mit der Temperaturentwicklung in Relation zu setzen, wurden die Festigkeiten im Alter von 2, 5, 7, 14, 21 und 28 Tagen – d.h. an 6 Prüftagen – bestimmt. Hierzu wurden Kernbohrungen nach EN 12504-1 [10] in Zentrumsnähe gebohrt; die Bohrkerne hatten einen Durchmesser von $d = 10$ cm und die abzuschneidende Höhe betrug $h = 10$ cm (Bild 3b, vgl. auch Bild 2). An jedem Prüftag wurden jeweils drei Kerne entnommen und auf Druckfestigkeit geprüft, der restliche Kern wurde in das Bohrloch zurückgesteckt und am nächsten Prüftag erneut entnommen. Somit wurden immer Zylinder geprüft, welche die Temperatur des Bauteilkerns angenommen hatten. Die geringfügigen Temperaturschwankungen durch die Herstellung der Kernbohrungen und durch die kurzzeitig entnommenen Kerne wurden vernachlässigt.

a)



b)



Bild 3: Großformatige Prüfkörper [3]

- a) Herstellung in auf der Innenseite gedämmter Schalung
- b) Herausgenommener Bohrkern von 0,60 m Länge

Zusätzlich wurden für jeden Prüftag 6 Probewürfel nach DIN EN 12390-2 [7] hergestellt, d.h. für insgesamt 7 Prüftage (zusätzlich wurde bereits nach 1 Tag geprüft) wurden je Betonsorte $7 \cdot 6 = 42$ Würfel benötigt. Drei – ebenfalls mit Temperaturfühlern versehenen – Würfel für jeden Prüftag wurden nach der Referenzlagerung der EN 12390-2 [11] bis zum Prüftag in Wasser bei 20 °C gelagert und drei Würfel für jeden Prüftag wurden bauteilnah mit gleichen Temperatur-einwirkungen neben den großformatigen Prüfkörpern gelagert.

Die gemessenen Temperaturen beider Rezepturen sind in Bild 4 ausgewertet. Bei den großformatigen gedämmten Prüfkörpern („Kern“, „Mitte“, „Rand“ in Bild 4) zeigt sich in den ersten Tagen ein typischer adiabatischer Temperaturverlauf; die ungedämmten kleinen Probewürfel („Würfel Normlagerung“ bzw. „Würfel Bauteillagerung“ in Bild 4) folgen nahezu ihrer Umgebungs-temperatur. Die daraus mit Gl. (1) und (2), d.h. nach de Vree, errechneten gewichteten Reifen der beiden Rezepturen sind in Bild 5 dargestellt – in beiden Fällen zeigt sich erwartungsgemäß

- die langsamste Reifeentwicklung bei den ungedämmten, am Bauteil im Freien gelagerten Würfeln („Würfel Bauteillagerung“ in Bild 5),
- eine etwas schnellere Reifeentwicklung bei den ungedämmten, aber bei 20 °C gelagerten Würfeln („Würfel Normlagerung“ in Bild 5) und
- die schnellste Reifeentwicklung bei den großformatigen gedämmten Prüfkörpern („Kern“, „Mitte“, „Rand“ in Bild 5).

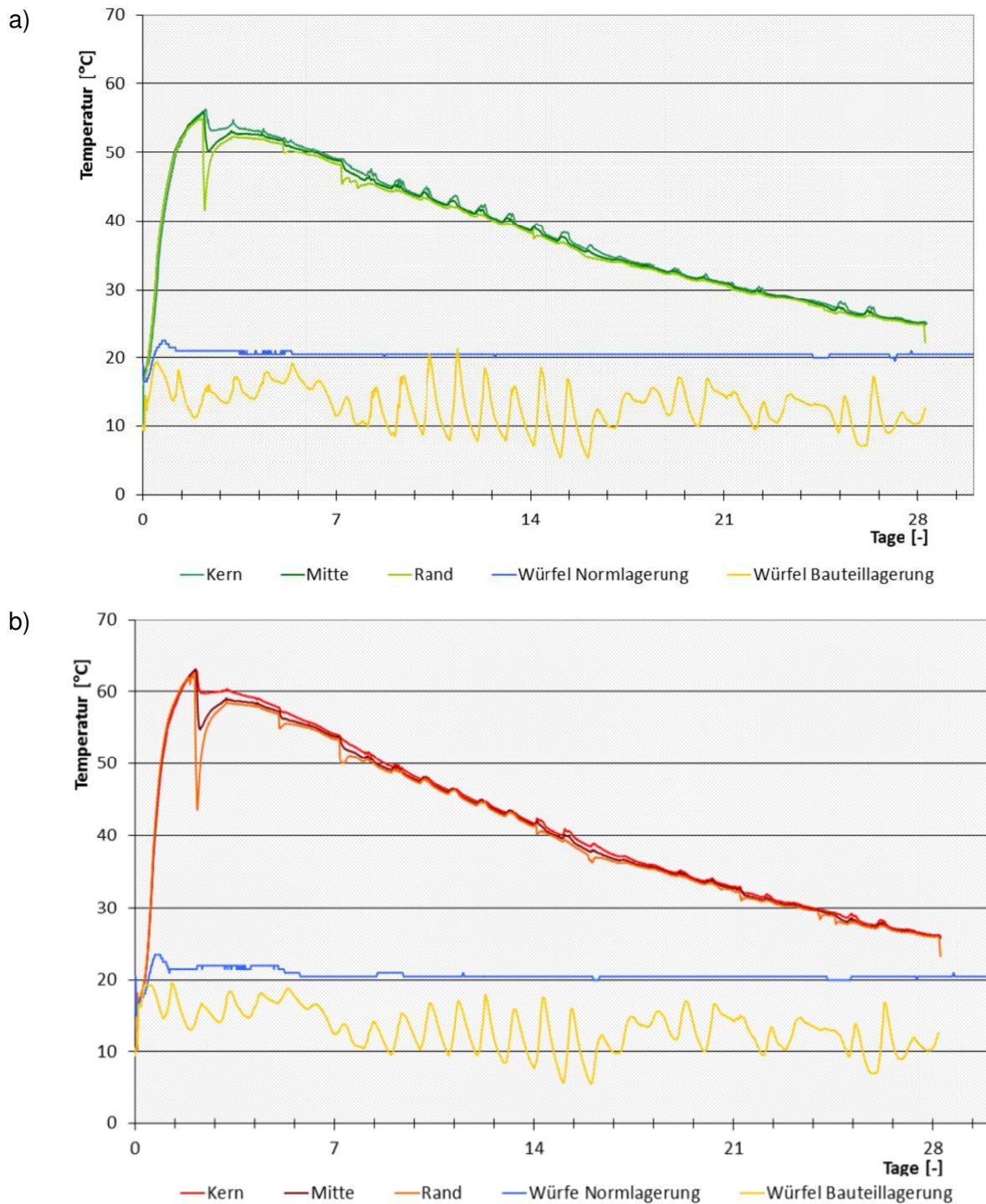


Bild 4: Temperaturrentwicklung [3] (,Kern‘, ,Mitte‘, ,Rand‘ der großformatigen Prüfkörper)

- Rezeptur I (C 30/37, CEM III/A 42,5 N + FA)
- Rezeptur II (C 30/37, CEM I 42,5 R ohne FA)

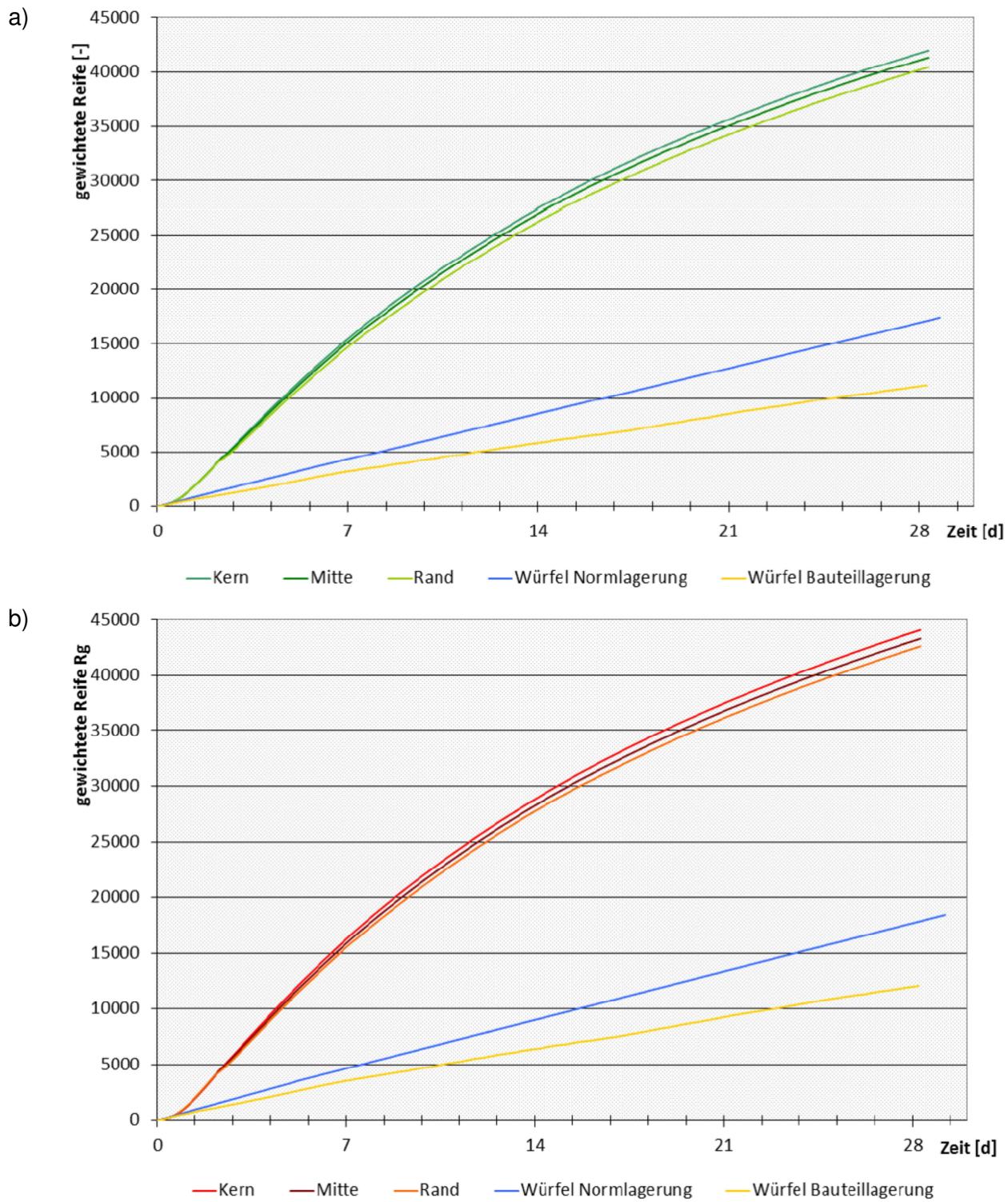


Bild 5: Gewichtete Reife über der Zeit [3] („Kern“, „Mitte“, „Rand“ der großformatigen Prüfkörper)
a) Rezeptur I (C 30/37, CEM III/A 42,5 N + FA)
b) Rezeptur II (C 30/37, CEM I 42,5 R ohne FA)

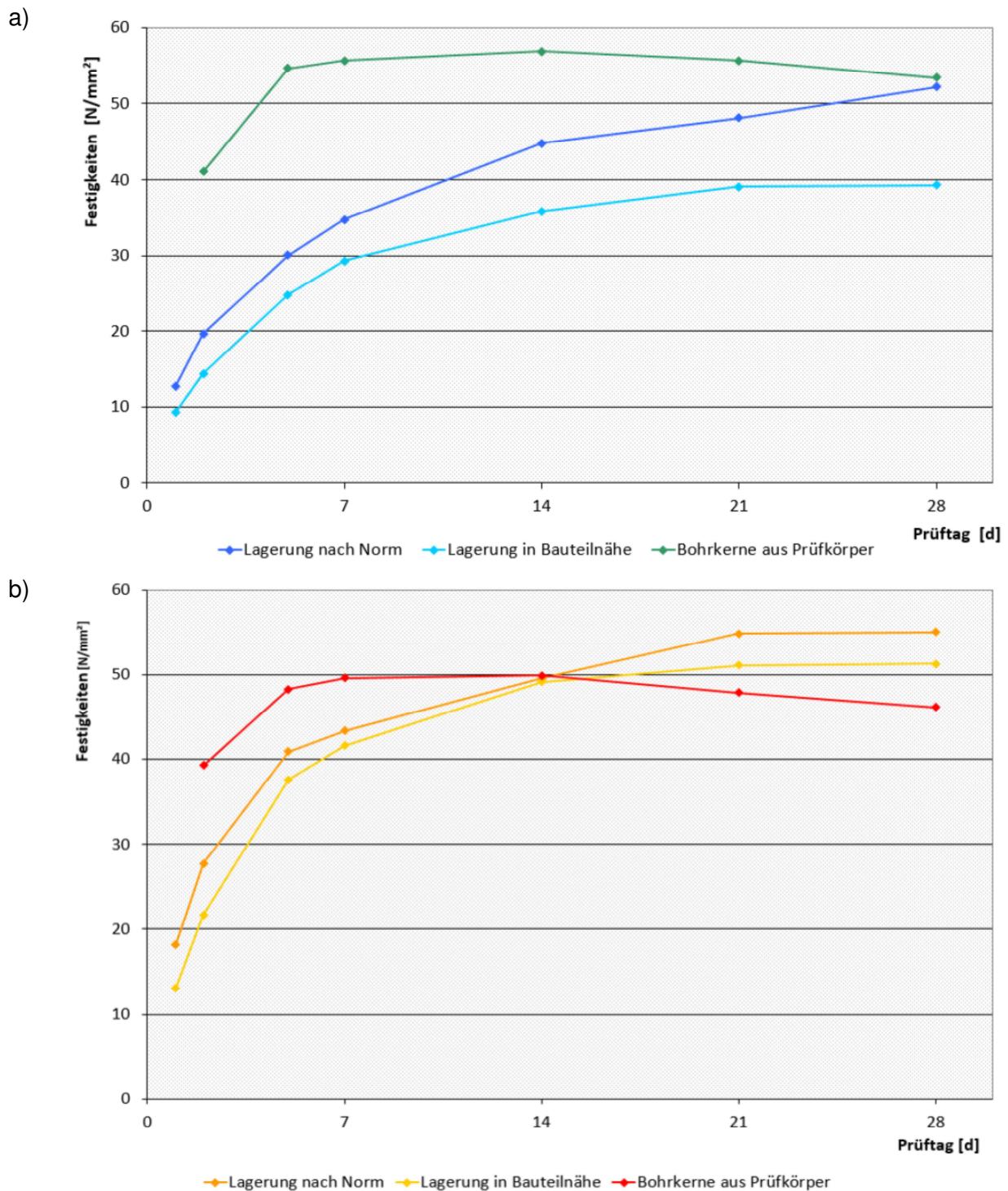


Bild 6: Festigkeitsentwicklung [3]

- a) Rezeptur I (C 30/37, CEM III/A 42,5 N + FA)
- b) Rezeptur II (C 30/37, CEM I 42,5 R ohne FA)

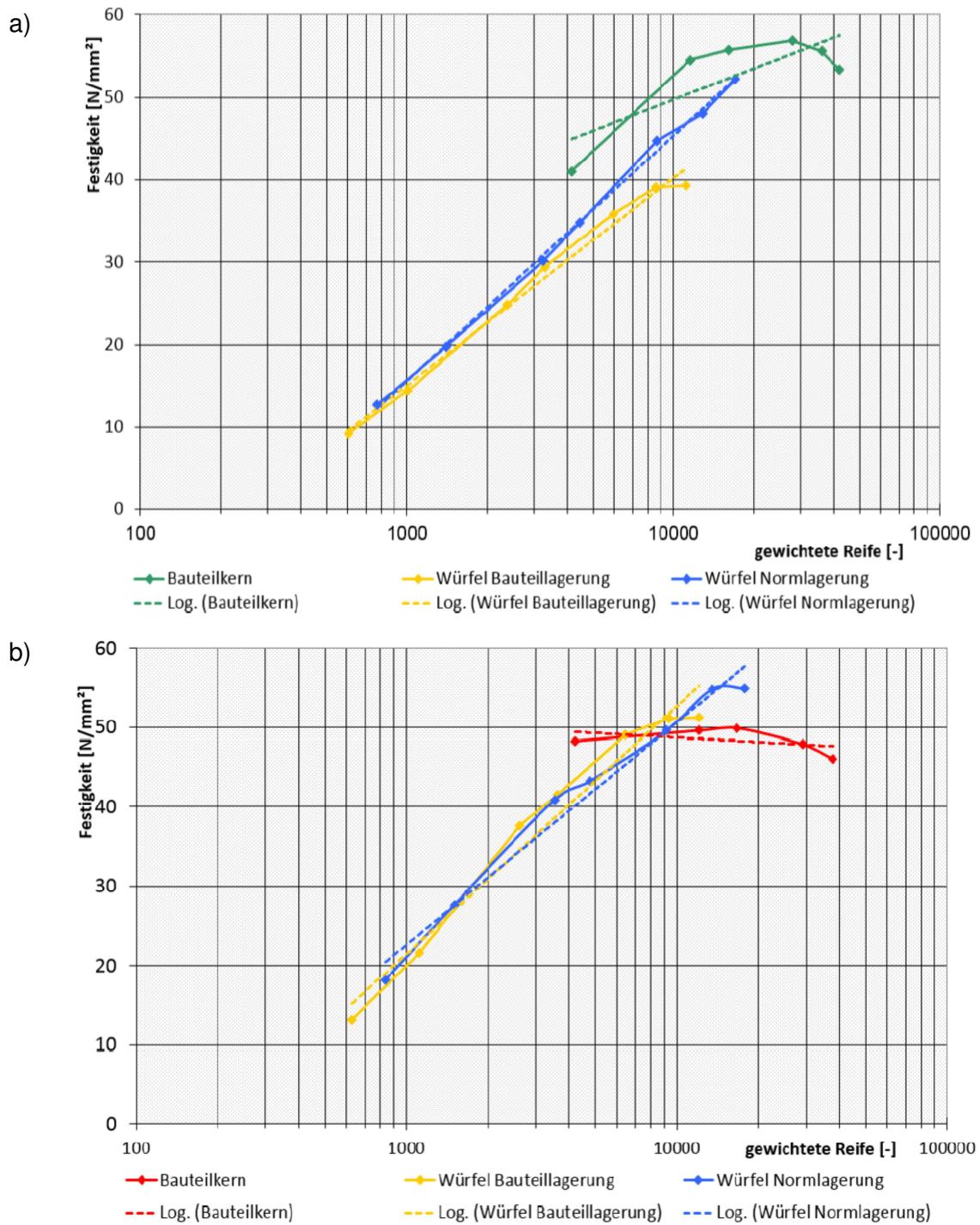


Bild 7: Reife-Festigkeits-Diagramme [3]

- a) Rezeptur I (C 30/37, CEM III/A 42,5 N + FA)
- b) Rezeptur II (C 30/37, CEM I 42,5 R ohne FA)

Die gemessenen Festigkeitsentwicklungen beider Rezepturen sind in Bild 6 aufgetragen. Hier zeigen sich bei den kleinen Probewürfeln („Lagerung nach Norm“ bzw. „Lagerung in Bauteilnähe“ in Bild 6) die typischen Kurven – bei Rezeptur I als mittlere Festigkeitsentwicklung ($r = 0,38$) und bei Rezeptur II als schnelle Festigkeitsentwicklung ($r = 0,49 \approx 0,50$, vgl. Tabellen 1 und 2). Bei den großformatigen gedämmten Prüfkörpern („Bohrkerne aus Prüfkörper“ in Bild 6) zeigen sich aufgrund der hohen Temperaturen sehr hohe Frühfestigkeiten – unerwartet ist jedoch der Festigkeitsabfall nach dem 14. Prüftag.

In Bild 7 finden sich die aus der Festigkeitsentwicklung abgeleiteten Reife-Festigkeits-Diagramme in logarithmischer Darstellung, ebenfalls für beide Rezepturen. Hier zeigen sich bei den kleinen Probewürfeln („Würfel Normlagerung“ bzw. „Würfel Bauteillagerung“ in Bild 7) die typischen Geraden in der logarithmischen Darstellung. Bei den großformatigen gedämmten Prüfkörpern („Bauteilkern“ in Bild 7) sind diese Geraden allerdings für die Kalibrierung des Reifemonitorings nicht verwendbar, da

- zum einen der Messwert am 1. Prüftag fehlt (es wurde von einer für die Kernbohrung noch nicht ausreichenden Festigkeit nach 1 Tag ausgegangen) und
- zum anderen der o.g. Festigkeitsabfall nach dem 14. Prüftag zu einer geringen oder gar abfallenden Steigung der Geraden in der logarithmischen Darstellung führt.

Es kann jedoch festgestellt werden, dass generell eine Kalibrierung des Reifemonitorings über die gewichtete Reife nach *de Vree* – auch bei massigen Baukörpern – möglich ist.

3 Mögliche Zeit- und Kostenersparnis

Bauvorhaben mit massigen Bauteilen fallen häufig unter die ZTV-ING [12] mit der Vorgabe, dass

- entweder 70 % der definierten Endfestigkeit erreicht sein müssen
- oder die Mindestdauer der Nachbehandlung aus Tabelle 1 verdoppelt werden muss,

um die Nachbehandlung beenden zu. Bei der Festigkeitsklasse C35/45 z.B. entspricht das entweder einer Festigkeit von $45 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,7 = 31,5 \text{ N/mm}^2$ oder dem doppelten von der Oberflächentemperatur abhängigen Wert aus Tabelle 1. Im Oktober 2013 z.B. herrschten Außenlufttemperaturen zwischen 10 und 15 °C; nimmt man diese vereinfacht als Oberflächentemperatur an, so liegt die erforderliche Nachbehandlungsdauer für z.B. eine massive Deckenplatte mit

mittlerer Festigkeitsentwicklung des Betons bei $2 \cdot 4 = 8$ Tagen. Das kalibrierte Reifemonitoring mit Berechnung der gewichteten Reife nach *de Vree* gemäß Abschnitt 2 ergab für das gleiche Bauteil eine Nachbehandlungsdauer von 2,7 Tagen (Tabelle 4 Mitte).

Im vorliegenden Beispiel wurde die *Ausschalfrist* indirekt vom Tragwerksplaner vorgegeben, der Beton musste zum Ausschalen die Festigkeit eines C30/37 erreicht haben. D.h. das Erreichen der Würfeldruckfestigkeit von 37 N/mm^2 im Bauteil wird i.d.R. dadurch festgestellt, dass Probewürfel in Bauteilnähe gelagert und geprüft werden. Dabei wurde nach 11 Tagen eine Festigkeit von $35 \text{ N/mm}^2 \approx 37 \text{ N/mm}^2$ erreicht. Aus dem kalibrierten Reifemonitoring mit Berechnung der gewichteten Reife nach *de Vree* gemäß Abschnitt 2 ergab sich eine Ausschalfrist von 4,5 Tagen (Tabelle 4 rechts).

Tabelle 4: Vergleich der Nachbehandlungsdauern und Ausschalfristen beispielhaft für eine massive Deckenplatte [3]

	Nachbehandlungsdauer	Ausschalfrist
nach ZTV-ING	8 Tage	–
aus der Tragwerksplanung	–	11 Tage
aus dem Reifemonitoring	2,7 Tage	4,5 Tage
Zeitersparnis:	5,3 Tage	6,5 Tage

Aus Tabelle 4 ergibt sich, dass durch ein kalibriertes Reifemonitoring eine erhebliche Zeit- und damit Kostensparnis erreichbar ist. Eine daraus abgeleitete Bauzeitverkürzung ist allerdings nur möglich, wenn die weiteren davon abhängigen Bauabläufe ebenfalls optimiert werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Nachbehandlung und Schalung kosten Geld, nicht ausgeschaltete Bauteile behindern den Baufortschritt und verschlechtern die Sichtbetonqualität. Deshalb werden in der Praxis möglichst kurze Nachbehandlungsdauern und Ausschalfristen angestrebt.

Dargestellt werden zum einen die theoretischen Zusammenhänge der Reifeberechnung von Beton; zum anderen werden für zwei Standardrezepturen Kalibrierkurven an massigen Bau-

körpern erstellt. Im Anschluss wird das so kalibrierte Reifemonitoring hinsichtlich Zeit- und Kostenersparnis anhand zweier Betonrezepturen ausgewertet:

- Bei Ansatz der Nachbehandlungsdauern entsprechend DIN 1045-3 wären
 - bei Rezeptur I (mit CEM III/A) nach minimal 3 Tagen und
 - bei Rezeptur II (mit CEM I) nach minimal 2 Tagen50 % der charakteristischen Festigkeit erreicht gewesen; die Außentemperaturen lagen dabei zwischen 10 und 20 °C.
- Beide Rezepturen erreichten jedoch bereits nach 2 Tagen mehr als 100 % der charakteristischen Festigkeit: In den gedämmten Probewürfeln von 1,00 m Kantenlänge wurden an Bohrkernen $41,4 \text{ N/mm}^2$ (Rezeptur I mit CEM III/A) bzw. $39,3 \text{ N/mm}^2$ (Rezeptur II mit CEM I) ermittelt und damit mehr als die in Festigkeitsklasse C 30/37 angestrebten mindestens 37 N/mm^2 .
- Die Druckfestigkeiten der Bohrkerne sinken allerdings ab dem 14. Prüftag wieder ab – ein Phänomen, das noch weiterer Untersuchungen bedarf.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass ein kalibriertes Reifemonitoring eine Optimierung der Nachbehandlungsdauern und der Ausschalfristen zulässt. Der anfängliche Aufwand für die Kalibrierung erweist sich bei größeren Bauvorhaben als gering im Vergleich zu den möglichen Zeit- und damit Kosteneinsparungen.

-
- [1] DIN 1045-3: 2012-03 (mit Berichtigung 1: 2013-07): Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 3: Bauausführung – Anwendungsregeln zu DIN EN 13670.
 - [2] Schwabach, E.: Ausführung von Tragwerken aus Beton. Konsolidierte und kommentierte Fassung von DIN EN 13670 und DIN 1045-3 für die Praxis. Hrsg. vom Deutschen Beton- und Bautechnik-Verein E.V. Berlin: Beuth 2012.
 - [3] Doll, H.: Bestimmung der Frühfestigkeit von Beton mittels Reifemonitoring zur Optimierung von Ausschalfristen. Bachelorarbeit an der hochschule 21, Studiengang Bauingenieurwesen. Buxtehude 2014 (unveröffentlicht).
 - [4] Zement Taschenbuch 2002, 50. Ausgabe. Hrsg. vom Verein Deutscher Zementwerke e.V. Düsseldorf: Bau+Technik 2002.
 - [5] Grübl, P.; Weigler, H; Karl, S.: Beton – Arten, Herstellung und Eigenschaften. Berlin: Ernst & Sohn 2001.
 - [6] Springenschmid, R.: Betontechnologie für die Praxis; Berlin: Bauwerk 2007.

- [7] de Vree, R. T.; Tegelaar, R. A.: Gewichtete Reife des Betons; beton 48 (1998) H. 11, S. 674 – 678.
- [8] Röhling, S.: Zwangsspannungen infolge Hydratationswärme, 2. Aufl. Düsseldorf: Bau+Technik 2009.
- [9] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV-W) für Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton (Leistungsbereich 215). Hrsg. vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Abteilung Wasserstraßen, Schifffahrt. Ausgabe 2012.
- [10] DIN EN 12504-1: 2009-07: Prüfung von Beton in Bauwerken – Teil 1: Bohrkernproben – Herstellung, Untersuchung und Prüfung der Druckfestigkeit.
- [11] DIN EN 12390-2: 2009-07: Prüfung von Festbeton – Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen.
- [12] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING) – Teil 3 Massivbau. Hrsg. von der Bundesanstalt für Straßenwesen; Ausgabe 12/2013.