

# Moderate Betontemperatur

Anwendungsbeispiele für Durabilo 4-SR  
und Flugasche als Ersatz für LH-Zement

Holcim (Süddeutschland) GmbH



# Moderate Betontemperatur

## Anwendungsbeispiele für Durabilo 4-SR und Flugasche als Ersatz für LH-Zement

Beton für langsame Wärmeentwicklung	3
Versuchsreihe: Beton für massige Bauteile	4
Versuchsreihe 1: Zement/Flugasche-Konzepte mit w/z 0,45	6
Versuchsreihe 2: Zement/Flugasche-Konzepte mit w/z 0,48	7
Versuchsreihe 3: Zement/Flugasche-Konzepte mit w/z 0,50	8
Versuchsreihe 4: Zement/Flugasche-Konzepte mit w/z 0,55	9
Versuchsreihe 5: Zement/Flugasche-Konzepte mit w/z 0,58	10
Vergleich der Hydratationswärmemessungen	11
Praxisbeispiel 1: Wand Kläranlage 0,60 m Stärke	12
Praxisbeispiel 2: Bodenplatte mit 35 m Durchmesser und 0,40–0,60 m Stärke	13
Praxisbeispiel 3: Bodenplatte mit 35 m Durchmesser und 0,50 m Stärke	14
Praxisbeispiel 4: Bodenplatte mit 35 m Durchmesser und 0,60 m Stärke	15
Praxisbeispiel 5: Fundament mit 22 m Durchmesser und 3 m Stärke	16
Praxisbeispiel 6: Fässer 0,9 x 0,6 m	17
Zusammenfassung	23

### Copyright

Holcim (Süddeutschland) GmbH  
72359 Dotternhausen

### Verfasser

Holcim (Süddeutschland) GmbH  
Horst Erler Produktmanagement

# Beton für langsame Wärmeentwicklung

**Bei großen Bauteilstärken wie Tunnelsohlen, Decken, massigen Bodenplatten oder dicken Unterkonstruktionen besteht immer ein erhöhtes Rissrisiko durch die Temperaturdifferenz zwischen Bauteilinnerem und der Bauteiloberfläche. Betonrezepturen mit niedriger Hydrationswärmeentwicklung sind die übliche Lösung für solche Fälle. In der Regel werden hierfür LH-Zemente (Low Heat – niedrige Wärmeentwicklung) eingesetzt. In vielen Fällen sind Betone mit Durabilo 4-SR (Schieferhochofenzement 42,5 N-SR) und Steinkohleflugasche ebenso oder gar besser geeignet.**

### Massige Bauteile

Für massige Bauteile eignen sich spezielle Betonrezepturen mit Durabilo 4-SR und Flugasche sehr gut, da die Wärmeentwicklung moderat und gleichmäßig verläuft. Einige Beispiele zeigen dies ganz deutlich. Nicht nur die Zementauswahl ist entscheidend, vielmehr steuert die Nachbehandlung des Betons die Temperatur im Bauteil. Somit ist selten ein Zement mit niedriger Wärmeentwicklung (LH-Zement) nötig, hingegen ist eine Mischung aus Durabilo 4-SR und Flugasche empfehlenswert. Der Schieferhochofenzement 42,5 N-SR (Durabilo 4-SR), der eine gleichmäßigere und langsamere Festigkeitsentwicklung aufweist als ein reiner Portlandzement, bewirkt eine deutlich geringere Temperaturentwicklung. Die Mischung aus Durabilo 4-SR und Flugasche tendiert bei der Wärmeentwicklung in Richtung LH-Zement.

Auch bei kühlen Außentemperaturen haben Mischungen mit Durabilo 4-SR und Flugasche den Vorteil, dass die Festigkeitsentwicklung spürbar schneller verläuft als bei einem Zement mit niedriger Wärme- und langsamer Festigkeitsentwicklung.

### Die Nachbehandlung ist entscheidend

Die Rissneigung, die in erster Linie von der Temperaturspannung im Bauteil abhängt, kann über die Nachbehandlung gesteuert werden. Wärmedämmmatten sind nicht nur in der kühlen Jahreszeit und im Winter vorteilhaft, auch im Sommer bei hohen Außentemperaturen lassen solche Maßnahmen die Temperatur im Bauteil langsam und gleichmäßig verlaufen und moderat abfließen, um die Rissneigung zu verringern.

Einige Beispiele zeigen, wie sich eine solche Nachbehandlung auf den Wärmefluss auswirkt. Speziell bei stark schwankenden Außentemperaturen ist die Auskühlung an der Oberfläche im Vergleich zum Kern deutlich stärker.

### Zemente im Vergleich

An unterschiedlichen Betonrezepturen mit unterschiedlichen Wasserzementwerten und unterschiedlichen Festigkeitsklassen werden Ergebnisse aus Laboruntersuchungen vorgestellt.

Die Resultate zeigen, dass die maximale Betontemperatur eines Betons mit Durabilo 4-SR und Flugasche ungefähr in dem Bereich eines Hochofenzementes (LH-Zement) liegt. Die Zementgehalte können reduziert werden, ohne die geforderte Festigkeitsklasse zu verlassen. Dadurch ist der Gesamtzementgehalt in der Betonmischung geringer und somit auch die Temperaturentwicklung im Beton.



Bild 1: Thermische Nachbehandlung

### Aufgabe

Durabilo 4-SR (Schieferhochofenzement 42,5 N-SR) mit Flugasche (FA) als langsame Betonrezeptur im Vergleich zu Modero 3B (CEM III/B 32,5 N-LH/HS/NA)

### Betonversuche im Labor Holcim Dotternhausen

Ermittlung der Frisch- und Festbetoneigenschaften sowie Temperaturentwicklung.

Ausbreitmaß und Ansteifverhalten über 60 Minuten, Druckfestigkeiten 1 Tag, 2 Tage, 7 Tage, 28 Tage und 56 Tage. Temperaturmessung im 200-mm-Styroporwürfel eingebettet in einer Kiste mit insgesamt 150-mm-Styroporwandung. Dadurch sehr geringer Temperaturverlust und somit Anhaltswerte für die Praxis.

## Versuchsreihe: Beton für massige Bauteile

### Versuchsdurchführung Temperaturmessung

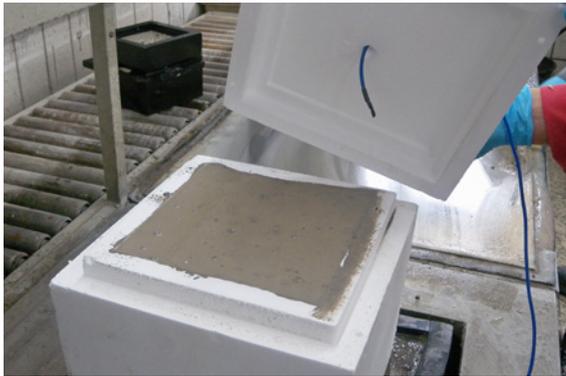


Bild 2: Styroporwürfel mit Beton gefüllt

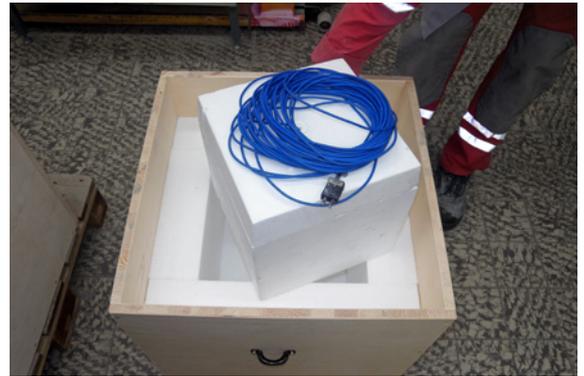


Bild 3: Temperaturmesskabel platziert

- Styroporwürfel 200 x 200 mm wird mit Frischbeton befüllt und verdichtet.
- Würfel wird mit Deckel verschlossen und Temperatur-Messfühler wird durch den Deckel in der Würfelmitte platziert.
- Würfel wird in einer Kiste mit zusätzlich 100 mm Styroporverkleidung gelagert.
- Insgesamt Dämmung 150 mm in der Holzkiste, an allen Seiten.



Bild 4: Styroporwürfel in Isolierbox



Bild 5: Messung läuft

- Würfel mittig in der Kiste platziert, 20 mm Luft und 100 mm Styropor umhüllen komplett den Würfel. Kiste wird mit Holzdeckel verschlossen und 7 Tage bei 22 °C gelagert.
- Temperaturmessung im Würfel mittig.

## Moderate Betontemperatur

Anwendungsbeispiele für Durabilo 4-SR und Flugasche als Ersatz für LH-Zement

### Ziel

Austausch von teuren Hochofenzementen gegen Normalzement mit Flugasche, um die Wärmeentwicklung im Beton zu reduzieren. Durch Zugabe von Flugasche und Reduzierung des Zementgehaltes wird die Hydratationswärme verringert, ohne die Endfestigkeit zu schwächen. LH-Zemente sind in Süddeutschland nur in geringer Auswahl vorhanden, dies wirkt sich dementsprechend auf den Preis aus. Ein Zement/Flugaschekonzept ist in der Regel deutlich günstiger.

Die Praxistauglichkeit einer solchen Rezeptur wird in den nächsten Beispielen mit unterschiedlichen Wasserzementwerten und Druckfestigkeitsklassen verdeutlicht. Um die Laborergebnisse zu unterstützen, sind im zweiten Teil der Broschüre tatsächliche Baustellenversuche dokumentiert.

### Laborversuche

Die folgenden Laborversuche im ersten Teil zeigen immer den Vergleich zwischen Hochofenzement mit der Bezeichnung LH und dem Zement/Flugasche-Gemisch.

Die Festigkeitsentwicklung von Durabilo 4-SR und Flugasche ist gleichmäßiger und moderater als die von LH-Zementen. Die Frühfestigkeiten sind etwas höher, dadurch werden die Ausschulfristen nicht verzögert. Außerdem verbessert die höhere Frühfestigkeit in der kühlen Jahreszeit die Gefrierbeständigkeit des Betons. Die gleichmäßige Festigkeitsentwicklung von Durabilo 4-SR und Flugasche verringert die Rissneigung bei annähernd gleicher Endfestigkeit.

Bei Glättbetonen verschiebt sich der Glättzeitpunkt mit Durabilo 4-SR und Flugasche deutlich nach vorne. Dadurch kann der Glätter früher mit der Oberflächenbearbeitung beginnen und die Zeit, in der der Beton nahezu ungeschützt ist, verringert sich erheblich. Durch diese Maßnahmen verringern sich die Ausschulfristen und der Bauablauf geht deutlich zügiger voran.

Untersuchungen der MPA Stuttgart untermauern die Erkenntnisse aus den Versuchsreihen und den Baustellenbeispielen.

Durch eine unabhängige Prüfstelle wurden ebenfalls Versuche mit Zement-Flugaschemischungen im Vergleich zu LH-Zement durchgeführt. Die Ergebnisse sind im hinteren Teil der Broschüre in Kurzfassung dargestellt. Bei Bedarf kann jederzeit der gesamte Prüfbericht der MPA Stuttgart zur Verfügung gestellt werden.

Hier wird ersichtlich, dass eine Zement-Flugaschemischung vergleichbar mit einem LH-Zement niedrigere Temperaturentwicklungen im Beton aufweist und mit deutlich geringerem Zementgehalt gute Frühfestigkeiten und ausreichende Endfestigkeiten erbringt.

Anhand dieser Ergebnisse zeigt sich ganz deutlich, dass das Zement/Flugaschekonzept sehr gut funktioniert.



Bild 6: Kläranlage – Massiges Bauteil



Bild 7: Becken einer Kläranlage

## Moderate Betontemperatur

Anwendungsbeispiele für Durabilo 4-SR und Flugasche als Ersatz für LH-Zement

# Versuchsreihe 1: Zement/Flugasche-Konzepte mit w/z 0,45

### Rezeptur

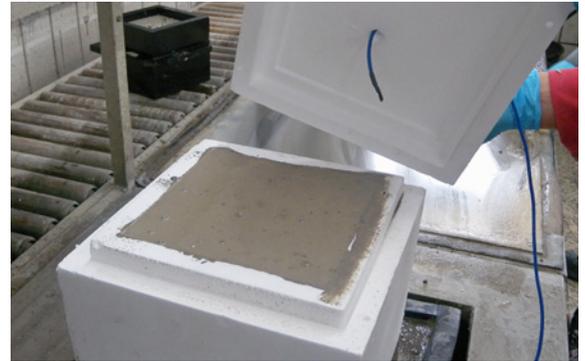
LH-Zement/Schieferhochofenzement  
42,5 N-SR (Durabilo 4-SR)  
C35/45, A/B 16 mm, w/z-Wert 0,45, F5

### Druckfestigkeitsentwicklung

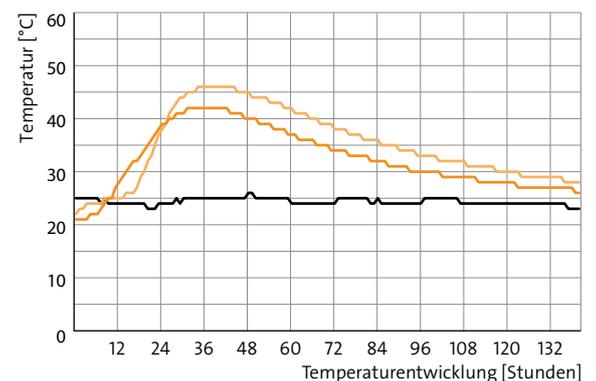
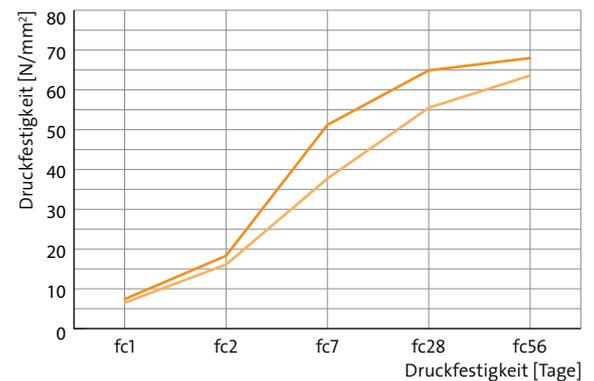
Durabilo 4-SR zeigt in den ersten beiden Tagen annähernd gleiche Anfangsfestigkeiten wie der LH-Zement, wird dann aber etwas moderater und langsamer, was die Rissneigung deutlich verringert. Die Endfestigkeit wird zielsicher erreicht. Der  $r$ -Wert liegt bei Durabilo 4-SR in dieser Rezeptur bei 0,29, er ist somit unter 0,3 und kann als „langsame Festigkeitsentwicklung“ eingestuft werden.

### Temperaturverlauf

Der Temperaturverlauf von Beton mit Durabilo 4-SR ist anfangs etwas flacher und moderater, dann steigt die Maximaltemperatur im Beton mit Durabilo 4-SR um nur 4°C über der Maximaltemperatur des LH-Zementes. Der Temperaturverlauf ist nahezu identisch und unwesentlich höher.



w/z 0,45



— Ausgangsbeton: Rezeptur pur mit LH-Zement 360 kg/m<sup>3</sup>  
- - Optimierung: Rezeptur mit 320 kg/m<sup>3</sup> Durabilo 4-SR + 60 kg/m<sup>3</sup> FA  
— Lufttemperatur

Abbildung 1: Druckfestigkeitsentwicklung im Beton (oben) und Temperaturverlauf im Beton (unten)

## Moderate Betontemperatur

Anwendungsbeispiele für Durabilo 4-SR und Flugasche als Ersatz für LH-Zement

# Versuchsreihe 2: Zement/Flugasche-Konzepte mit w/z 0,48

### Rezeptur

LH-Zement/Schieferhochofenzement  
42,5 N-SR (Durabilo 4-SR)  
C35/45, A/B 16 mm, w/z-Wert 0,48, F5

### Druckfestigkeitsentwicklung

Durabilo 4-SR zeigt eine langsamere und moderatere Festigkeitsentwicklung als der LH-Zement, dadurch ergibt sich ein r-Wert von 0,3 und somit die Einstufung in „langsame Festigkeitsentwicklung“ im Beton mit Durabilo 4-SR. Die Endfestigkeiten werden zielsicher erreicht.

### Temperaturverlauf

Die Maximaltemperatur im Beton kann durch Zugabe von Flugasche deutlich reduziert werden. Sie liegt mit den Durabilo-4-SR-Rezepturen im Bereich eines LH-Zementes und weist nahezu denselben geringen Temperaturverlauf vor. Mit höherem Flugaschegehalt und geringerem Zementanteil liegt die Maximaltemperatur sogar unter der des LH-Zementes.



w/z 0,48

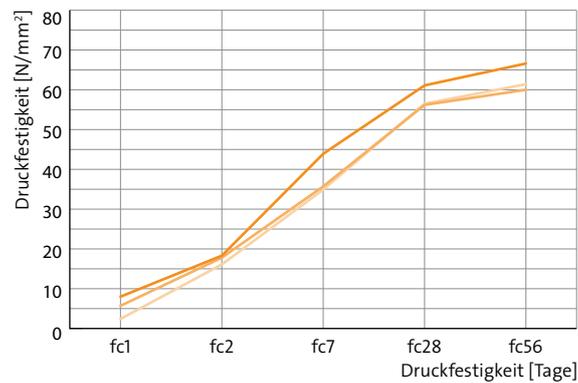
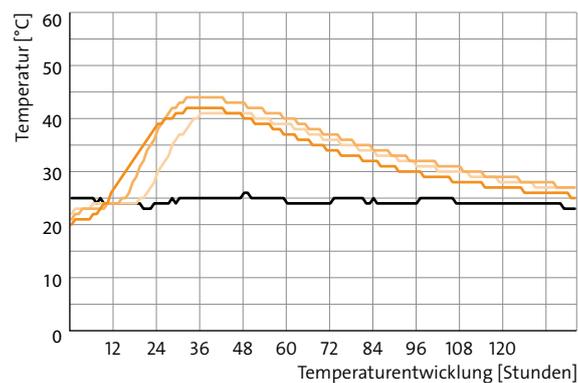


Abbildung 2: Druckfestigkeitsentwicklung im Beton (oben) und Temperaturverlauf im Beton (unten)



— Ausgangsbeton: Rezeptur pur mit LH-Zement 360 kg/m<sup>3</sup>  
— Optimierung: Rezeptur mit 320 kg/m<sup>3</sup> Durabilo 4-SR + 60 kg/m<sup>3</sup> FA  
— Optimierung: Rezeptur mit 300 kg/m<sup>3</sup> Durabilo 4-SR + 60 kg/m<sup>3</sup> FA  
— Lufttemperatur

## Moderate Betontemperatur

Anwendungsbeispiele für Durabilo 4-SR und Flugasche als Ersatz für LH-Zement

# Versuchsreihe 3: Zement/Flugasche-Konzepte mit $w/z$ 0,50

### Rezeptur

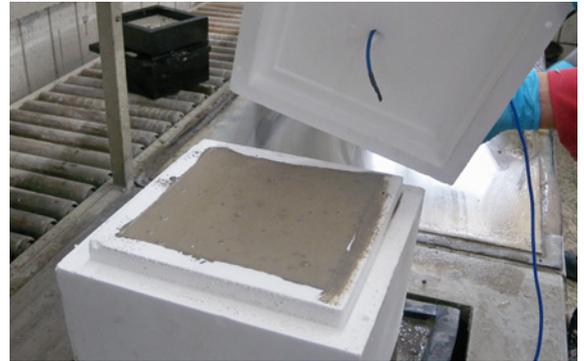
LH-Zement/Schieferhochofenzement  
42,5 N-SR (Durabilo 4-SR)  
C30/37, A/B 16 mm,  $w/z$ -Wert 0,50, F5

### Druckfestigkeitsentwicklung

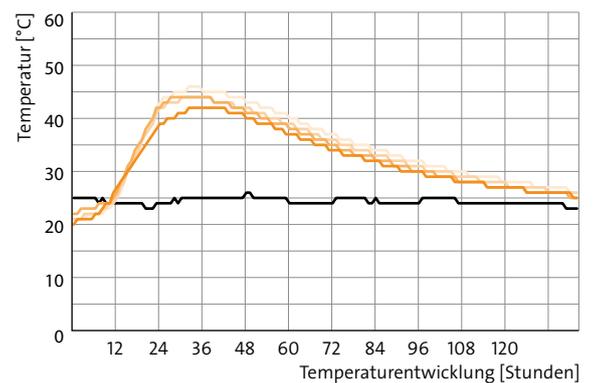
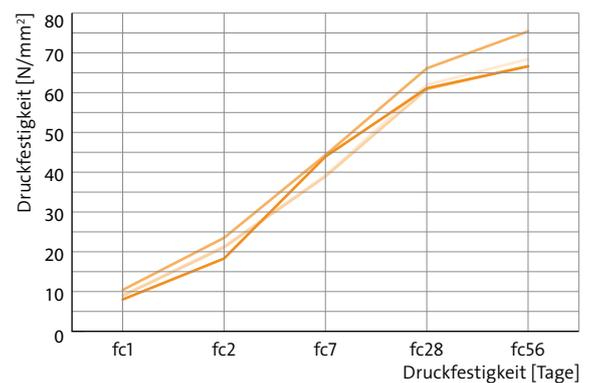
Der Druckfestigkeitsverlauf zeigt keine großen Unterschiede zwischen dem LH-Zement und den Durabilo-4-SR-Abmischungen. Die Werte sind nahezu identisch. Die Endfestigkeiten werden zielsicher erreicht.

### Temperaturverlauf

Beim Temperaturverlauf und bei der Maximaltemperatur liegen die Durabilo 4-SR Flugascheabmischungen nur  $2^{\circ}\text{C}$ – $3^{\circ}\text{C}$  über der des LH-Zementes. Die Temperaturkurven sind durchaus vergleichbar.



$w/z$  0,50



- Ausgangsbeton: Rezeptur pur mit LH-Zement  $360 \text{ kg/m}^3$
- Optimierung: Rezeptur mit  $320 \text{ kg/m}^3$  Durabilo 4-SR +  $60 \text{ kg/m}^3$  FA
- Optimierung: Rezeptur mit  $330 \text{ kg/m}^3$  Durabilo 4-SR +  $40 \text{ kg/m}^3$  FA
- Optimierung: Rezeptur mit  $340 \text{ kg/m}^3$  Durabilo 4-SR +  $30 \text{ kg/m}^3$  FA
- Lufttemperatur

Abbildung 3: Druckfestigkeitsentwicklung im Beton (oben) und Temperaturverlauf im Beton (unten)

# Versuchsreihe 4: Zement/Flugasche-Konzepte mit w/z 0,55

### Rezeptur

LH-Zement/Schieferhochofenzement  
42,5 N-SR (Durabilo 4-SR)  
C30/37, A/B 16 mm, w/z-Wert 0,55, F5

### Druckfestigkeitsentwicklung

Die Druckfestigkeitsentwicklung mit Durabilo 4-SR ist nur ganz gering über der des LH-Zementes. Der Verlauf ist nahezu vergleichbar. Der r-Wert liegt bei den Betonen mit Durabilo 4-SR um die 0,3 und kann als „langsame Festigkeitsentwicklung“ eingestuft werden.

### Temperaturverlauf

Der Temperaturverlauf aller Betone ist nahezu identisch und zeigt keine höheren Maximaltemperaturen bei Beton mit Durabilo 4-SR.



w/z 0,55

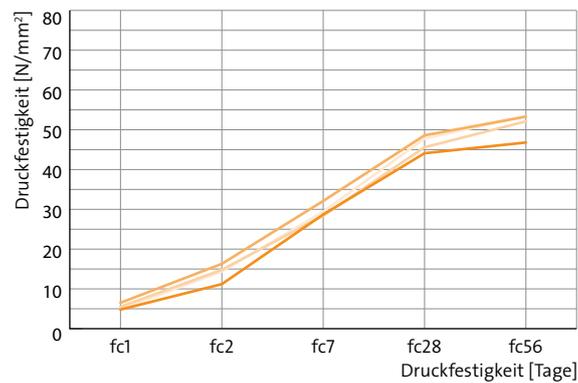
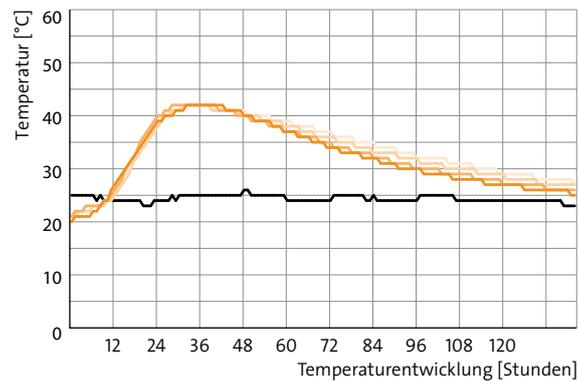


Abbildung 4: Druckfestigkeitsentwicklung im Beton (oben) und Temperaturverlauf im Beton (unten)



- Ausgangsbeton: Rezeptur pur mit LH-Zement 360 kg/m³
- Optimierung: Rezeptur mit 320 kg/m³ Durabilo 4-SR
- Optimierung: Rezeptur mit 300 kg/m³ Durabilo 4-SR + 40 kg/m³ FA
- Optimierung: Rezeptur mit 280 kg/m³ Durabilo 4-SR + 80 kg/m³ FA
- Lufttemperatur

## Versuchsreihe 5: Zement/Flugasche-Konzepte mit w/z 0,58

### Rezeptur

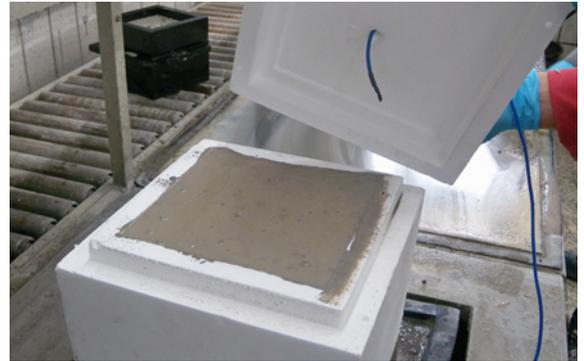
LH-Zement/Schieferhochofenzement  
42,5 N-SR (Durabilo 4-SR)  
C30/37, A/B 16 mm, w/z-Wert 0,58, F5

### Druckfestigkeitsentwicklung

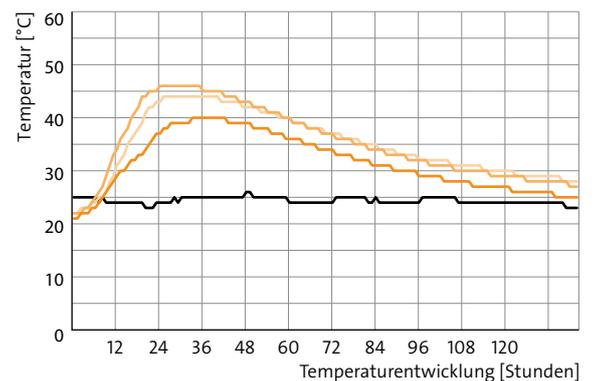
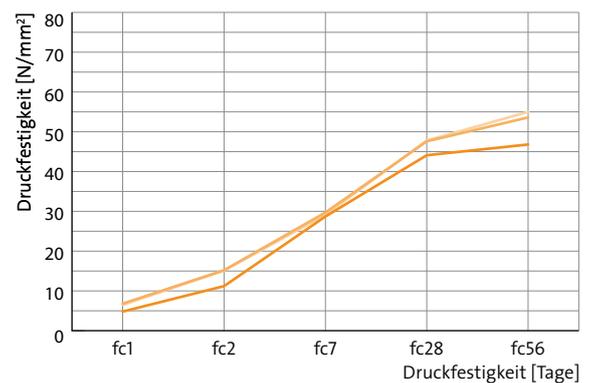
Die Durabilo-4-SR-Flugascherezeptur bringt ähnliche Druckfestigkeiten und einen ähnlichen Festigkeitsverlauf wie LH-Zement. Der r-Wert liegt knapp über 0,3 und wird als „mittlere Festigkeitsentwicklung eingestuft. Anhand der Kurven zeigt sich aber, dass Durabilo 4-SR jederzeit als Ersatz für LH-Zement eingesetzt werden kann.

### Temperaturverlauf

Die Maximaltemperatur bei Beton mit Durabilo 4-SR liegt ca. 4 °C höher als bei dem LH-Zement. Da die Maximaltemperatur sehr gering ausfällt, ist mit einer Rissbildung durch zu hohe Hydratationswärme nicht zu rechnen.



w/z 0,58



— Ausgangsbeton: Rezeptur pur mit LH-Zement 360 kg/m<sup>3</sup>  
— Optimierung: Rezeptur mit 320 kg/m<sup>3</sup> Durabilo 4-SR + 60 kg/m<sup>3</sup> FA  
— Optimierung: Rezeptur mit 280 kg/m<sup>3</sup> Durabilo 4-SR + 80 kg/m<sup>3</sup> FA  
— Lufttemperatur

Abbildung 5: Druckfestigkeitsentwicklung im Beton (oben) und Temperaturverlauf im Beton (unten)

# Vergleich der Hydratationswärmemessungen

## Hydratationswärme

Das Diagramm zeigt deutlich, wie die Hydratationswärmeentwicklung durch Zugabe von Flugasche reduziert werden kann. Durabilo 4-SR ohne Flugasche zeigt eine maximale Hydratationswärme von 308 J/g, Modero 3B hingegen hat eine maximale Hydratationswärme von 251 J/g. Die maximal zulässige Hydratationswärme bei LH-Zementen beträgt 270 J/g. Durch Zugabe von Flugasche kann die Hydratationswärme von Durabilo 4-SR auf weniger als 270 J/g gesenkt werden. Dadurch entsteht ein Beton mit langsamer Festigkeitsentwicklung und einer Hydratationswärme ähnlich der eines LH-Zementes.

## Erklärung

In der Ansicht wird der Vergleich der Hydratationswärmemessungen von Pur-Zement zu Abmischungen Zement und Flugasche dargestellt.

So kann durch Zugabe von Flugasche und Reduzierung des Zementgehalts ein Beton hergestellt werden, der ein ähnliches Temperaturverhalten wie ein LH-Zement aufweist.

Der so hergestellte Beton zeigt dann eine mittlere bis langsame Festigkeitsentwicklung. Dieser Beton ist auch dementsprechend nachzubehandeln.

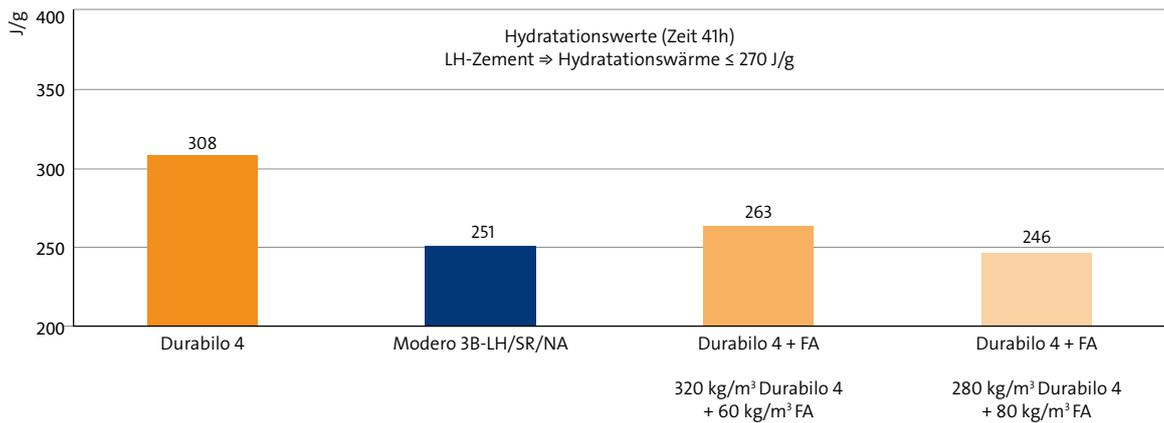


Abbildung 6: Hydratationswärmeentwicklung im Vergleich

## Moderate Betontemperatur

Anwendungsbeispiele für Durabilo 4-SR und Flugasche als Ersatz für LH-Zement

# Praxisbeispiel 1: Kläranlage

Wand Kläranlage Neufra mit 60 cm Stärke

### Beton

C35/45

Zementsorte: Durabilo 4-SR

(Schieferhochofenzement 42,5 N-SR)

360 kg/m<sup>3</sup> Durabilo 4-SR + 50 kg/m<sup>3</sup> FA

w/z-Wert: 0,43; Konsistenz F3; Sieblinie: A/B 22

### Betoneinbau

Frischbetonkonsistenz Betonwerk 480 bis 520 mm.

Druckfestigkeit im Durchschnitt 65 N/mm<sup>2</sup>.

Die Wände wurden erst nach 2 Tagen entschalt.

### Nachbehandlung

Belassen in der Schalung.

### Temperaturmessung

Temperaturmessung in einer Wand mit 60 cm Breite

am Fuß und 40 cm Breite in der aufgehenden Wand.

Drei Messfühler wurden an unterschiedlichen Stellen platziert.

### Auswertung

Der Temperaturverlauf in der Wand ist an allen Messstellen gleichmäßig und moderat. Die Maximaltemperatur liegt bei 44 °C und ist bei allen Messpunkten identisch. Erst ab einer Temperaturdifferenz von ca. 20 °C ist mit Rissen infolge von Temperaturspannung zu rechnen. Bei dieser Wand sind keine Risse entstanden.



Bild 8: Wandfluss Kläranlage



Bild 9: Wand Kläranlage

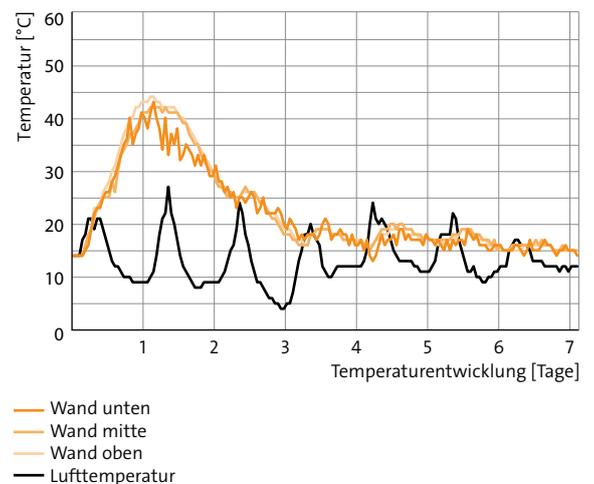


Abbildung 7: Wand Kläranlage mit 60 cm Stärke

## Moderate Betontemperatur

Anwendungsbeispiele für Durabilo 4-SR und Flugasche als Ersatz für LH-Zement

# Praxisbeispiel 2: Massige Bodenplatte

Bodenplatte Kläranlage Lahr,  
Durchmesser 35 m, Stärke 40 bis 60 cm

### Beton

C35/45

Zementsorte: Durabilo 4-SR

(Schieferhochofenzement 42,5 N-SR)

350 kg/m<sup>3</sup> Durabilo 4-SR + 30 kg/m<sup>3</sup> FA

w/z-Wert: 0,48; Konsistenz F3; Sieblinie: A/B 32

### Betoneinbau

Frischbetonkonsistenz Betonwerk 450 bis 500 mm.

Druckfestigkeit im Durchschnitt 60 N/mm<sup>2</sup>.

Zwischen Betoneinbau und Oberflächenbearbeitung keine Zwischennachbehandlung.

### Nachbehandlung

Nachbehandlung durch Auflegen von Folien nach Abschluss der Oberflächenbearbeitung. Keine weiteren Maßnahmen zum Schutz des Betons.

### Temperaturmessung

Temperaturmessung in der Bodenplatte mit einer Stärke von 40–60 cm. Die Temperaturfühler wurden im Bauteil, an der Unterseite, in der Mitte und an der Oberseite eingebaut. Parallel dazu wurde die Lufttemperatur gemessen.

Es zeigt sich eine sehr geringe Temperaturentwicklung im Beton, die Maximaltemperatur beträgt 34°C. Die Temperaturdifferenz zwischen den Messpunkten ist sehr gering.

### Auswertung

Der Temperaturverlauf in der Bodenplatte zeigt einen gleichmäßigen Temperaturanstieg der Messfühler „Unten“ und „Mitte“ bis zur Maximaltemperatur von 34°C im Kern. Nach dem Einbringen und Bearbeiten des Betons wurde die Betonoberfläche geglättet. Durch Auflegen von Folie erfolgte die Nachbehandlung. Bei Temperaturunterschieden von ca. 20°C kann es zu Spannungsrissen kommen. Im Bauteil konnten die Temperaturunterschiede weit unter 20°C gehalten werden. Mit Rissen infolge Temperaturspannung ist nicht zu rechnen.



Bild 10: Kläranlage



Bild 11: Kläranlage

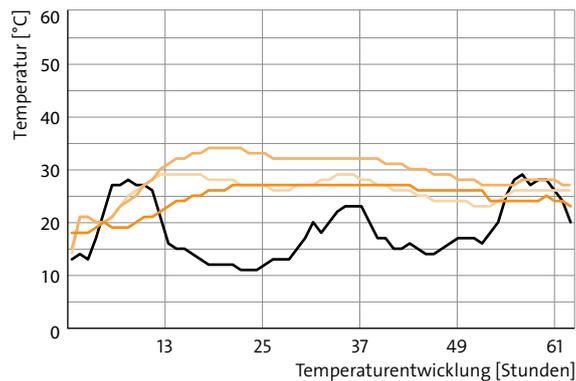


Abbildung 8:  
Bodenplatte mit  
60 cm Stärke

## Moderate Betontemperatur

Anwendungsbeispiele für Durabilo 4-SR und Flugasche als Ersatz für LH-Zement

# Praxisbeispiel 3: Bodenplatte Kläranlage

Bodenplatte Kläranlage Rottweil,  
Durchmesser 35 m, Stärke 50 cm

### Beton

C35/45

Zementsorte: Durabilo 4-SR

(Schieferhochofenzement 42,5 N-SR)

360 kg/m<sup>3</sup> Durabilo 4-SR + 50 kg/m<sup>3</sup> FA

w/z-Wert: 0,43; Konsistenz F3; Sieblinie: A/B 22

### Betoneinbau

Frischbetonkonsistenz Betonwerk 500 bis 530 mm

Druckfestigkeit im Durchschnitt 66,5 N/mm<sup>2</sup>.

Der Beton wurde bei sehr heißen Außentemperaturen eingebaut.

Zwischen Betoneinbau und Oberflächenbearbeitung  
keine Zwischennachbehandlung

### Nachbehandlung

Nachbehandlung durch Auflegen von Folien nach  
Abschluss der Oberflächenbearbeitung. Keine weiteren  
Maßnahmen zum Schutz des Betons.

### Temperaturmessung

Temperaturmessung im Fundament mit einer Stärke von  
0,5 m. Die Temperaturfühler wurden im Bauteil, an der  
Unterseite, in der Mitte und an der Oberseite eingebaut.  
Parallel dazu wurde die Lufttemperatur gemessen.

### Auswertung

Der Temperaturverlauf in der Bodenplatte zeigt einen  
gleichmäßigen Temperaturanstieg der Messfühler  
„unten“ und „mitte“ bis zur Maximaltemperatur von  
52°C im Kern.

Nach dem Einbringen und Bearbeiten des Betons wurde  
die Betonoberfläche geglättet. Durch Auflegen von  
Folie erfolgte die Nachbehandlung (die allerdings den  
Witterungsbedingungen nicht entsprechend war).

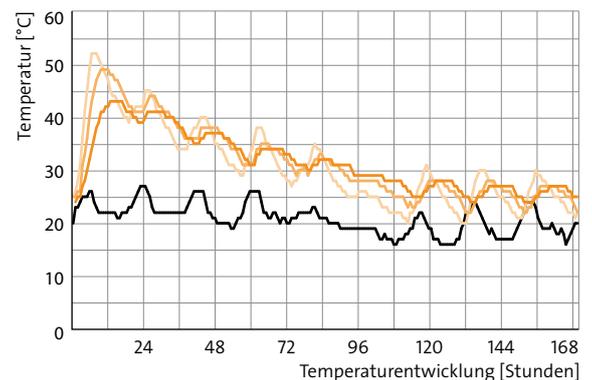
Bei Temperaturunterschieden von ca. 20°C kann es  
zu Spannungsrissen kommen. Im Bauteil konnten die  
Temperaturunterschiede deutlich unter 20°C gehalten  
werden. Entstandene Risse in der Bodenplatte sind eine  
Folge des Austrocknens wegen zu geringer bzw. zu  
später Nachbehandlung.



Bild 12: Bodenplatte Kläranlage



Bild 13: Betoneinbau



— Durabilo 4 unten  
— Durabilo 4 mitte  
— Durabilo 4 oben  
— Lufttemperatur

Abbildung 9: Bodenplatte mit 50 cm Stärke

## Moderate Betontemperatur

Anwendungsbeispiele für Durabilo 4-SR und Flugasche als Ersatz für LH-Zement

# Praxisbeispiel 4: Bodenplatte Kläranlage

Klärwerk Nellingen,  
Bodenplatte mit 60cm Stärke

### Beton

C35/45

Zementsorte: Durabilo 4-SR

(Schieferhochofenzement 42,5 N-SR)

370 kg/m<sup>3</sup> Durabilo 4-SR + 20 kg/m<sup>3</sup> FA

w/z-Wert: 0,48; Konsistenz F4; Sieblinie: A/B 32

### Betoneinbau

Die Betonoberfläche wurde mit dem Flügelglätter geglättet. Zwischen Betoneinbau und Oberflächenbearbeitung keine Zwischennachbehandlung.

### Nachbehandlung

Nachbehandlung durch Auflegen von Folien nach Abschluss der Oberflächenbearbeitung. Keine weiteren Maßnahmen zum Schutz des Betons.

### Temperaturmessung

Temperaturmessung in der Bodenplatte mit einer Stärke von 60 cm. Die Temperaturfühler wurden im Bauteil, an der Unterseite, in der Mitte und an der Oberseite eingebaut. Parallel dazu wurde die Lufttemperatur gemessen.

### Auswertung

Der Temperaturverlauf in der Bodenplatte zeigt einen gleichmäßigen Temperaturanstieg der Messfühler „unten“ und „mitte“, bis zur Maximaltemperatur von 45°C im Kern.

Nach dem Einbringen und Bearbeiten des Betons wurde die Betonoberfläche geglättet. Durch Auflegen von Folie erfolgte die Nachbehandlung. Bei Temperaturunterschieden von ca. 20°C kann es zu Spannungsrissen kommen. Im Bauteil konnten die Temperaturunterschiede weit unter 20°C gehalten werden.



Bild 14: Kläranlage



Bild 15: Kläranlage

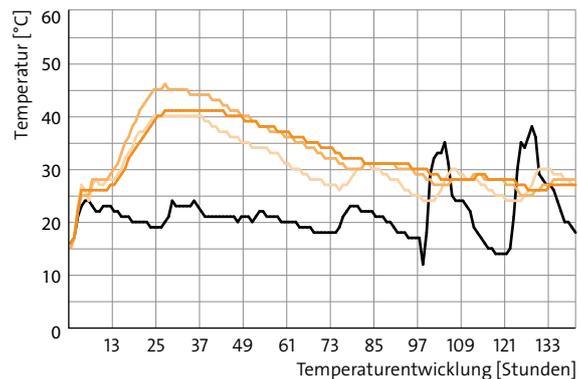


Abbildung 10:  
Bodenplatte  
Kläranlage mit  
60 cm Stärke

— unten  
— mitte  
— oben  
— Lufttemperatur

## Moderate Betontemperatur

Anwendungsbeispiele für Durabilo 4-SR und Flugasche als Ersatz für LH-Zement

# Praxisbeispiel 5: Fundament Windkraftanlage

Fundament mit 22 m Durchmesser und 3 m Stärke

### Beton

C30/37

Zementsorte: Durabilo 4-SR

(Schieferhochofenzement 42,5 N-SR)

290 kg/m<sup>3</sup> Durabilo 4-SR + 60 kg/m<sup>3</sup> FA, A/B 16 mm

280 kg/m<sup>3</sup> Durabilo 4-SR + 60 kg/m<sup>3</sup> FA, A/B 32 mm

w/z-Wert: 0,54; Konsistenz F3

### Betoneinbau

Der Beton wurde mit der Pumpe eingebaut. Im unteren Bereich mit 32er Körnung, oben mit 16er Körnung, da eine schräge Oberfläche hergestellt werden musste.

### Nachbehandlung

Nachbehandlung durch Auflegen von Folien und Dämmmatten.

### Temperaturmessung

Temperaturmessung im Fundament mit einer Stärke von 3 m und einem Durchmesser von 22 m. Die Temperaturfühler wurden im Bauteil, an der Unterseite, in der Mitte und an der Oberseite eingebaut.

### Auswertung

Der Temperaturverlauf in der Bodenplatte zeigt einen gleichmäßigen Temperaturanstieg der Messfühler „unten“, „mitte“ und „oben“ bis zur Maximaltemperatur von 45°C im Kern.

Nach dem Einbringen und Bearbeiten des Betons wurde die Betonoberfläche bearbeitet. Durch Auflegen von Folien und Dämmmatten erfolgte die Nachbehandlung. Temperaturdifferenz 39°C bis 45°C zwischen außen und Kern.

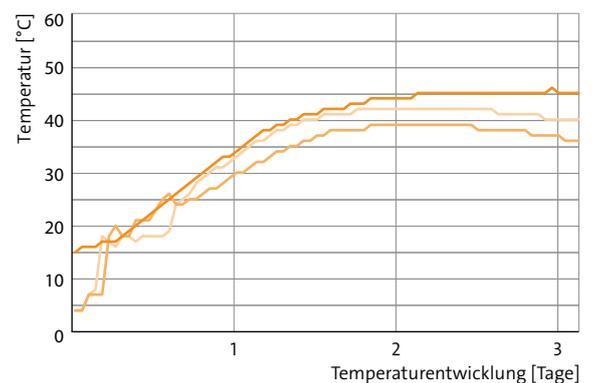
Bei Temperaturunterschieden von ca. 20°C kann es zu Spannungsriszen kommen. Im Bauteil konnten die Temperaturunterschiede weit unter 20°C gehalten werden. Somit ist nicht mit Spannungsriszen zu rechnen.



Bild 16: Fundament Windkraftanlage



Bild 17: Fundament Windkraftanlage



— Fundament unten (30 cm vom Boden)  
— Fundament mitte (1,5 m vom Boden)  
— Fundament oben (30 cm unter Oberkante)

Abbildung 11: Fundament Windkraftanlage mit 3 m Stärke

## Moderate Betontemperatur

Anwendungsbeispiele für Durabilo 4-SR und Flugasche als Ersatz für LH-Zement

# Praxisbeispiel 6: Systemblöcke-Vergleich

Blöcke mit 0,70 x 0,70 x 1,40 m

### Beton

C35/45

Zementsorte: Durabilo 4-SR

(Schieferhochofenzement 42,5 N-SR)

375 kg/m<sup>3</sup> Durabilo 4-SR

320 kg/m<sup>3</sup> Durabilo 4-SR + 80 kg/m<sup>3</sup> FA

w/z-Wert: 0,43; Konsistenz F5; A/B 22 mm

### Betoneinbau

Die Blöcke wurden direkt aus dem Fahrmischer gegossen.

### Nachbehandlung

Es erfolgte keine Nachbehandlung der Betonoberfläche.

### Temperaturmessung

Temperaturmessung im Systemblock mit 0,70 x 0,7 x 1,4 m. Die Messfühler wurden in der Mitte des Blocks positioniert. Parallel wurde die Lufttemperatur gemessen.

### Auswertung

Es wurden zwei Betone mit Durabilo 4-SR hergestellt. Die Rezeptur war beim ersten Block mit 375 kg/m<sup>3</sup> Durabilo ohne FA und beim zweiten Block mit 320 kg/m<sup>3</sup> Durabilo 4-SR + 80 kg/m<sup>3</sup> FA eingestellt worden. Im Versuch zeigt sich eine Verlangsamung des Temperaturanstiegs und eine Verringerung der Maximaltemperatur von 44°C auf 39°C im Block durch Reduzierung des Zementgehalts und Zugabe von Flugasche. Insgesamt verhält sich dieser Beton sehr moderat und relativ langsam.



Bild 17:  
Systemblock nach



Bild 18:  
Systemblock  
entschalt

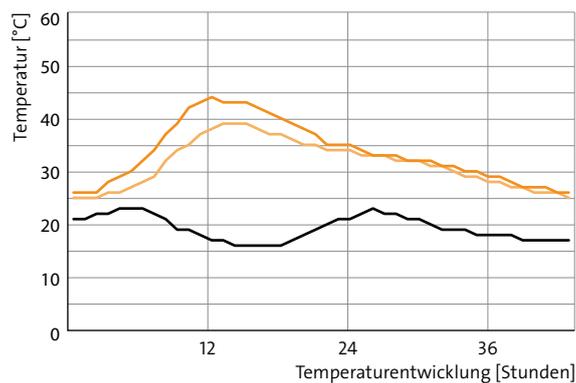


Abbildung 12:  
Temperatur-  
entwicklung in  
Systemblöcken  
0,70 x 0,70 x 1,40 m

— C35/45 // 375 kg/m<sup>3</sup> Durabilo  
— C35/45 // 320 kg/m<sup>3</sup> Durabilo + 80 FA  
— Lufttemperatur

## Kurzfassung der Untersuchungen

Kurzfassung der Untersuchungsergebnisse aus dem Bericht Nr. 903 2158 000 vom  
24.10.2016

Berichts-Nr.:	903 2158 000/Kurzfassung
Auftraggeber:	Holcim (Schweiz) AG Technical Expert Center Zementweg 1 CH- 5303 Würenlingen
Auftrags-Nr. (Kunde):	Auftrag vom 01.07.2016
<b>Auftrags-Nr. (MPA):</b>	<b>903 2158 000 /Bj</b>
<b>Prüfgegenstand:</b>	<b>siehe Seite 2</b>
Prüfspezifikation mit Ausgabedatum:	siehe Seite 2
Eingangsdatum des Prüfgegenstandes:	21.06.2016
Datum der Prüfung:	01.07.2016 - 20.09.2016
Datum des Berichts:	09.01.2017
Seite 1 von	3 Textseiten
Beilagen:	2
Anlagen:	-
Gesamtseitenzahl:	5
Anzahl der Ausfertigungen:	2x Kunde (Original und pdf) 1x Bearbeiter 1x Archiv

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die Prüfgegenstände.

Veröffentlichung des vorliegenden Berichtes (auch auszugsweise) ist nur mit schriftlicher Genehmigung der MPA Universität Stuttgart zulässig.

## 1 Aufgabenstellung

In Rahmen der Untersuchungen wurden Messungen der Hydrationswärme an insgesamt sieben Zementen bzw. Zement-Flugasche-Gemischen durchgeführt, sowie Messungen der Wärmeentwicklung und der Betoneigenschaften an fünf Betonen. Die Untersuchungen erfolgten einerseits an Zementproben (Lösungsverfahren – Hydrationswärme im Alter von 7 Tagen nach DIN EN 196-08) und andererseits an Betonprüfkörpern (teiladiabatischer Versuch). Es wurden drei verschiedene Zemente eingesetzt, nämlich LH-Zement des Typs Modero 3B (Hochofenzement), Portlandkompositzement des Typs Optimo 4 und Schieferhochofenzement des Typs Durabilo 4. Eine Übersicht der verwendeten Zemente und Betone ist in Tabelle 1, Beilage 1, dargestellt. Zum Vergleich der Ergebnisse wurden bei den Betonen ein äquivalenter w/z-Wert von 0,45 und eine weiche Frischbetonkonsistenz (F3) festgelegt. Die Prüfkörper zur Messung der Temperaturentwicklung an Betonproben (teiladiabatischer Versuch) wurden in einer Würfelform (Innenkantenlänge 30 cm), bestehend aus einer Holzschalung (Dicke rd. 1 cm) mit einer 10 cm dicken Schicht aus XPS hergestellt. Die Temperaturen wurden in der Würfelmittle, an der Außenseite der Dämmung und im Lagerraum über einen Zeitraum von 10 Tagen minütlich gemessen.

## 2 Prüfergebnisse

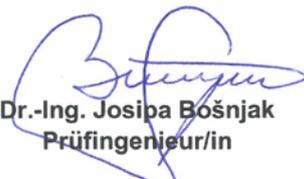
Die Hydrationswärme der untersuchten Zemente (Doppelbestimmung nach DIN EN 196-08) ist in Abbildung 1, Beilage 1, dargestellt. Die Ergebnisse zeigen deutliche Tendenzen mit einer akzeptablen Streuung der Einzelwerte. Der Referenzzement (Modero 3B) liegt deutlich unter dem Grenzwert von 270 J/g für die maximale zulässige Hydrationswärme von LH-Zementen, wobei die zwei anderen Zemente erwartungsgemäß höhere Hydrationswärmen aufweisen. Der Portlandkompositzement Optimo 4 liegt mit 295 J/g deutlich über dem Grenzwert und der Schieferhochofenzement Durabilo 4 mit 275 J/g liegt nur leicht über dem Grenzwert. Wenn die Zemente teilweise durch Flugasche ersetzt werden, kommt es zu einer deutlichen Abnahme der Hydrationswärme. Bei höherem Anteil der Flugasche im Bindemittelgemisch wird eine geringere Hydrationswärme gemessen. Wenn 22,2 M.-% des Zements durch Flugasche ersetzt werden, weisen die beiden untersuchten Gemische niedrigere Hydrationswärmen als der Referenzzement auf. Die Ergebnisse bestätigen den bekannten positiven Effekt der Flugaschezugabe auf die Begrenzung der Hydrationswärme in massigen Bauteilen.

Die Entwicklung der Druckfestigkeiten der untersuchten Betone zeigt Abbildung 2, Beilage 2. Die Temperaturentwicklung der fünf untersuchten Betonrezepturen ist in Abbildung 3, Beilage 2, graphisch dargestellt. Die Temperaturentwicklungen weisen auf ein ähnliches Verhalten aller untersuchten Betone hin. Der Referenzbeton mit dem LH-Zement erfährt das Maximum von rd. 47 °C

nach etwa 1,5 Tagen, die Betone mit dem Gemisch aus Schieferhochofenzement und Flugasche liegen etwas höher in der Maximaltemperatur bei rd. 48 °C nach etwa 1,4 Tagen und die Betone mit dem Gemisch aus Portlandkompositzement und Flugasche weisen eine Maximaltemperatur von 52 °C bereits nach etwa 1,2 Tagen auf. Auffällig ist der etwas steilere anfängliche Temperaturanstieg bei Optimo 4 als bei Betonen mit dem Referenzzement und Durabilo 4. Etwa 15 Stunden nach der Herstellung beträgt die Temperatur von beiden Betonen mit Optimo 4 über 44 °C, wobei die restlichen Betone unter 35 °C liegen. Der Beton mit dem Durabilo 4 weist eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Referenzbeton aus LH-Zement auf, insbesondere bei den höheren Anteilen an Flugasche. Die Temperaturverläufe bei der Abkühlung sind für alle untersuchten Betone nahezu identisch und verlaufen sehr gleichmäßig.

Die Ergebnisse der Druckfestigkeit verdeutlichen die Vorteile der untersuchten Betone im Vergleich zum Referenzbeton. Diese weisen eine vergleichsweise schnelle Festigkeitsentwicklung auf, mit r-Werten bis zu 0,53. Der Referenzbeton dahingegen fällt in die Kategorie der langsamen Festigkeitsentwicklung mit einem r-Wert von 0,19. Im Alter von einem Tag weist der Referenzbeton eine Druckfestigkeit von 5,3 MPa auf. Die Betone aus Zement-Flugasche-Gemischen weisen im gleichen Alter deutlich höhere Druckfestigkeiten zwischen etwa 10 und etwa 20 MPa auf. Somit ist die Rissneigung infolge der thermischen Spannungen wesentlich geringer, ausgehend von der gleichen Temperaturverteilung. Die 56-Tagesfestigkeiten der Betone aus Zement-Flugasche-Gemischen sind im Vergleich zum Referenzbeton um rd. 20% höher. Die höheren Frühfestigkeiten sind ein wesentlicher Aspekt in der Baupraxis, beispielweise bei der Einhaltung von Ausschallfristen. Weiter trägt die höhere Festigkeit zum verbesserten Frostwiderstand von Beton bei. Trotz des relativen steilen Anstiegs der Druckfestigkeit bei Betonen mit Optimo 4 und Durabilo 4, sind die Auswirkungen auf die Wärmeentwicklung vergleichsmäßig gering.

Anhand der dargestellten Versuchsergebnisse wird festgestellt, dass die untersuchten Betone aus Zement-Flugasche-Gemischen eine gute Alternative zu dem Referenzbeton aus Hochofenzement darstellen. Da der maximale Temperaturunterschied zwischen Betonrandzone und Betonkern die vorgeschriebenen Werte nicht übersteigen soll, sind im Bedarfsfall entsprechende thermische Nachbehandlungsmethoden zu ergreifen.

  
**Dr.-Ing. Josipa Bošnjak**  
Prüfingenieur/in

  
**Dr.-Ing. Christian Öttl**  
Referatsleiter Betontechnologie

Tabelle 1. Übersicht der untersuchten Zement-Flugasche-Gemische und Betone

Bez.	Untersuchte Zement-Flugasche-Gemische			Untersuchte Betone		
	Zementart [-]	Zementmenge [kg/m <sup>3</sup> ]	Flugaschezugabe [kg/m <sup>3</sup> ]	Zementart [-]	Zementmenge [kg/m <sup>3</sup> ]	Flugaschezugabe [kg/m <sup>3</sup> ]
Mo	Modero 3B	360	-	Modero 3B	360	-
Op	Optimo 4	360	-	-	-	-
Op60	Optimo 4 + FA	300	60	Optimo 4 + FA	300	60
Op80	Optimo 4 + FA	280	80	Optimo 4 + FA	280	80
Du	Durabilo 4	360	-	-	-	-
Du60	Durabilo 4 + FA	300	60	Durabilo 4 + FA	300	60
Du80	Durabilo 4 + FA	280	80	Durabilo 4 + FA	280	80

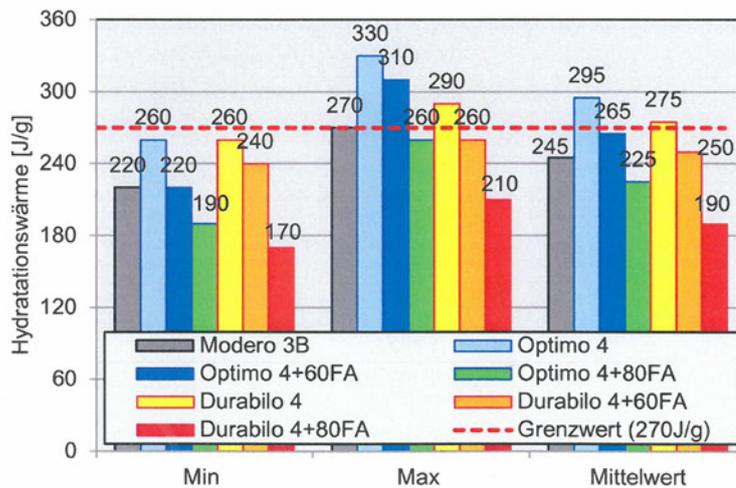


Abbildung 1. Hydratationswärme (Lösungsverfahren nach DIN EN 196-08) der untersuchten Zemente und Zement-Flugasche-Gemische

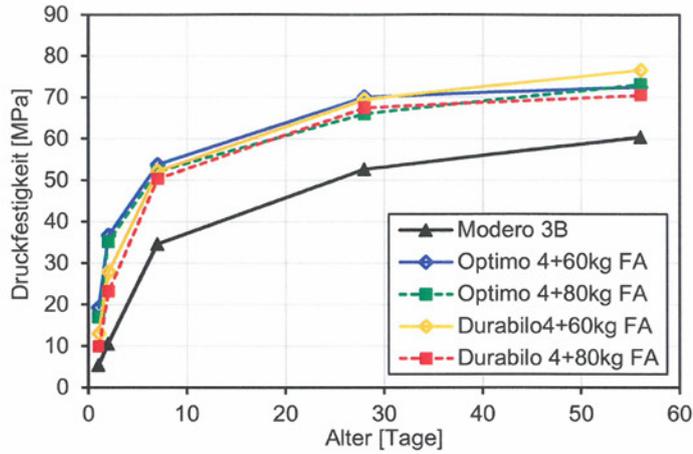


Abbildung 2. Entwicklung der Druckfestigkeit der untersuchten Betone

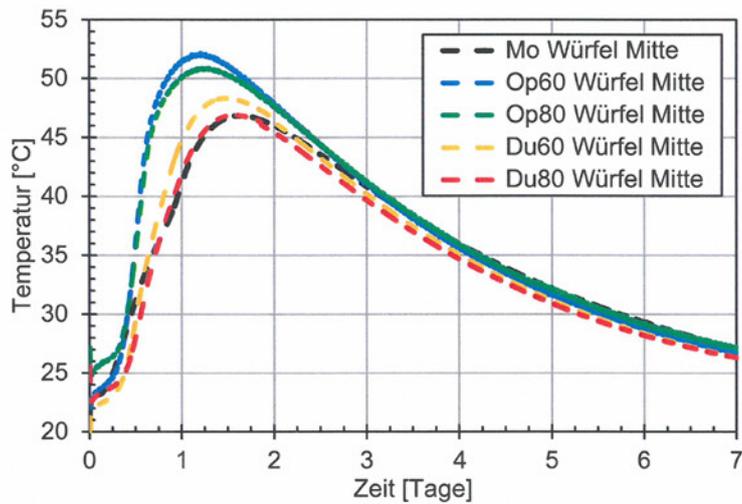


Abbildung 3. Vergleich der Temperaturentwicklung in der Würfelmitte für die fünf untersuchten Betonrezepturen in den ersten 7 Tagen nach der Herstellung

## Moderate Betontemperatur

Anwendungsbeispiele für Durabilo 4-SR und Flugasche als Ersatz für LH-Zement

# Zusammenfassung

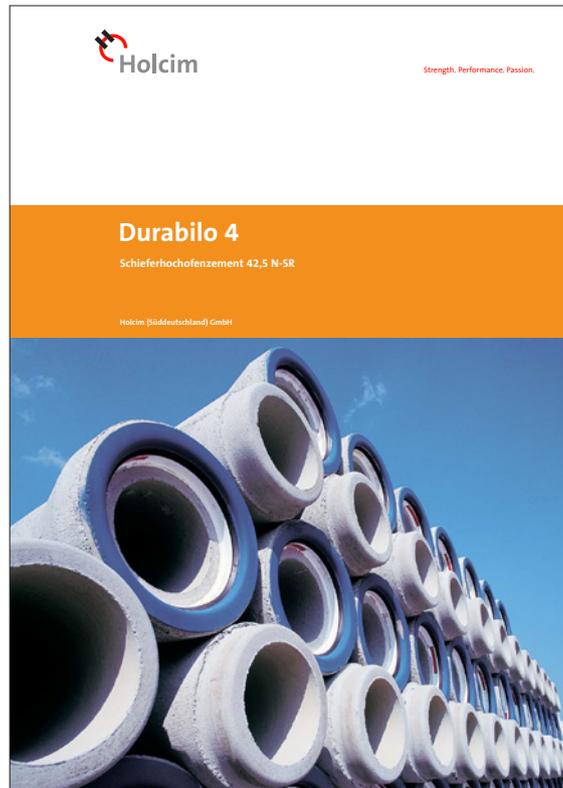
Die Versuche zeigen alle, dass Durabilo 4-SR ähnliche Festigkeitsentwicklungen aufweist wie ein LH-Zement (Modero 3B). Die Wärmeentwicklung und die Maximaltemperatur im Beton liegen bei Durabilo 4-SR unwesentlich höher als beim LH-Zement.

Durch Anpassung der Rezeptur und durch Zugabe von Flugasche und Reduzierung des Zementgehalts kann der Beton mit Durabilo 4-SR in der Wärmeentwicklung gesenkt werden und liegt im günstigsten Fall sogar unter der Maximaltemperatur von einem Beton mit LH-Zement (Modero 3B).

Der r-Wert, der den Beton in die Festigkeitsentwicklung einstuft, liegt bei einem LH-Zement unter 0,3 und wird somit als „langsam“ bezeichnet. Mit Durabilo 4-SR kommen wir mit ähnlichen r-Werten um die 0,3 in denselben „langsamen“ Bereich.

Auch ohne Abminderung vom Zementgehalt und somit ohne Flugasche kann dieser Zement in vielen Rezepturen als „langsam“ eingesetzt werden.

Durch die moderate Festigkeitsentwicklung und die relativ geringe Wärmeentwicklung von Durabilo 4-SR kann im Normalfall auf LH-Zement verzichtet werden.





**Holcim (Süddeutschland) GmbH**  
72359 Dotternhausen  
Telefon +49 7427 79 300  
Telefax +49 7427 79 248  
[info-sueddeutschland@holcim.com](mailto:info-sueddeutschland@holcim.com)  
[www.holcim-sued.de](http://www.holcim-sued.de)

