

Fugenlose Bodenplatte für ein Hochregallager

1.900 m³ Beton aus einem Guss

Von Werner Rothenbacher, Ulm

1 Projekt

Im Zuge von Expansionsmaßnahmen eines Versandhandels für Lehrmittel in Ellwangen wurde die Erweiterung der Lagerkapazitäten notwendig. Das Kernstück des daraufhin geplanten Neubaus ist eine Hochregalanlage mit Versandgebäude. Das Hochregallager sollte eine Länge von 100 m bei 23 m Breite und 30 m Höhe erhalten. Infolge der hohen statischen Lasten ergab sich für die Bodenplatte des Hochregallagers eine Dicke von 0,80 m. Aus betrieblichen Überlegungen heraus sollte die Bodenplatte fugenlos erstellt werden. Aufgrund der

Dimensionen handelt es sich hier um ein „massiges Bauteil“, dessen Herstellung nicht alltäglich ist und eine große Herausforderung darstellt.

2 Vorbereitungen

Die Herstellung von Bauteilen der erforderlichen Abmessungen macht eine rechtzeitige und gründliche Vorbereitung der Baumaßnahmen unabdingbar. Deshalb fanden im Vorfeld bereits frühzeitig Gespräche zwischen Architekt, Statiker, Bau-firma und Betonhersteller einschließlich Betontechnologen statt.

Dabei wurden die Anforderungen der Planungs- und Ausführungs-seite an die massive Betonplatte dargelegt.

Folgende Parameter wurden definiert:

- Betondruckfestigkeitsklasse C20/25
- Expositionsklasse XC3
- Größtkorn 22 mm
- Einbaukonsistenz unterer Bereich F4
- möglichst geringe Wärmeentwicklung
- Oberfläche maschinell abscheiben
- erhöhte Ebenheitsanforderungen (auf 10 m Länge maximal 0,5 cm Abweichung)
- schwindarmer Beton
- kein Entmischen
- Ausführungszeit im Juni

Die Bewehrung wurde in einer oberen und unteren Lage in die Bodenplatte eingebracht. Im Bereich der oberen Mattenlage waren zusätzliche Kunststoffrohre für eine Betonkernaktivierung vorgesehen (Bild 1). Die Betondeckung sollte an der Oberseite 3,5 cm betragen und nicht unter- bzw. überschritten werden. Um Verformungen der Platte weitestgehend zwangungsfrei zu ermöglichen, wurde die Sauberkeitsschicht maschinell geglättet und mit zweilagiger Folie belegt. Insgesamt wurden in der Bodenplatte 161 t Matten- und Stabstahlbewehrung verlegt.

Während der Ausführung wurden die Baumaßnahmen durch das Betonlabor technologisch betreut. Mit Hilfe eingebauter Temperaturfühler konnte dabei die Temperaturentwicklung im Beton der Bodenplatte dokumentiert werden (Bild 2). Damit wurde überprüft, ob sich die prognostizierten Wärmeentwicklungen und die damit verbundenen Annahmen auch tatsächlich einstellten.



Bild 1: Obere Bewehrungslage und Installationen zur Betonkernaktivierung



Bild 2: An der Schalung montierter Datenlogger

3 Regelwerke

Grundsätzlich waren für die Zusammensetzung des Betons DIN EN 206-1 [1] und DIN 1045-2 [2] zu beachten. Da es sich bei der Bodenplatte um ein „massiges Bauteil“ handelt, war zusätzlich die Richtlinie „Massige Bauteile aus Beton“ des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) [3] von Bedeutung. Diese erlaubt Abweichungen von der DIN 1045-2, beispielsweise bei dem Zeitpunkt der Druckfestigkeitsbestimmung. Außerdem sind bei bestimmten Expositionsklassen Reduzierungen des Zementgehalts zur Senkung der Hydrationswärme möglich. Dabei ist im Regelfall eine verlängerte Nachbehandlung erforderlich. Die Mindestdauer der Nachbehandlung wird durch den Verhältniswert der Druckfestigkeit nach 2 Tagen zu dem gewählten Zeitpunkt der Bestimmung der Druckfestigkeit (56 oder 91 Tage) geregelt.

Bei massigen Bauteilen werden in aller Regel große Betonmengen verarbeitet. Deswegen ist es grundsätzlich erforderlich, einen entsprechenden Qualitätssicherungsplan zur zielsicheren Herstellung, zum Einbau und zur Nachbehandlung des Betons zu erstellen. Alle Maßnahmen sollten mit einem erfahrenen Betontechnologen abgestimmt werden.

4 Entwicklung der Betonzusammensetzung

Der Transportbetonlieferant konnte bereits viel Erfahrung bei der Herstellung von massigen Bauteilen, z.B. bei Fundamenten für Windkraftanlagen, sammeln. Daher empfahl er für die Erstellung der großen, massigen und fugenlosen Bodenplatte die Verwendung eines Zements mit der Eigenschaft „LH“ – niedrige Hydrationswärmeentwicklung (früher NW-Zement), bei dem die Hydrationswärme 270 J/g nach 7 Tagen nicht überschreitet. Im vorliegenden Fall wurde als Zement ein CEM III/A 32,5 N-LH vorgeschlagen. Für die Zusammensetzung des Betons legten die Betontechnologen das Hauptaugenmerk auf die Wärmeentwicklung sowie das Schwindmaß; die Anforderungen an die Expositions- und Festigkeitsklasse waren nicht ausschlaggebend.

Aus den Anforderungen an das geringe Schwindmaß ergab sich der geringe Wassergehalt. Außerdem sollte so die Neigung des Betons zum Bluten reduziert werden. Die Zugabe der Flugasche verbesserte die Verarbeit-

barkeit und die Pumpfähigkeit des Betons und trug zur Festigkeitsentwicklung, allerdings nicht zur Wärmeentwicklung im Frühstadium bei. Die Druckfestigkeit sollte nach 56 Tagen geprüft werden.

Nach Springenschmid [4] ist in Abhängigkeit von w/z-Wert und Zementgehalt mit einem Schwindmaß von weniger als 0,3 mm/m zu rechnen. Das Schwindmaß wurde bei einem Laborversuch mittels Schwindrinne mit etwa 0,25 mm/m nach 28 Tagen ermittelt. Die Erstprüfung im Labor hatte die geforderten Eigenschaften bestätigt. Die Neigung des Betons zum Bluten war nicht allzu groß und die geforderte Festigkeit wurde bereits nach 28 Tagen erreicht.

Interessant waren Überlegungen bezüglich der zu erwartenden Wärmeentwicklung im Bauteil. Über folgende Näherungsformel konnte die Temperaturerhöhung abgeschätzt werden:

$$\Delta T = \frac{z \cdot H_{\text{Zement}}}{Q_{\text{Beton}}} \text{ [K]}$$

$$= \frac{260 \cdot 150}{2.590} = 15 \text{ K}$$

Tafel 1: Betonzusammensetzung

Betondruckfestigkeitsklasse		C20/25
Ausbreitmaßklasse		F4
Zementart und Zementfestigkeitsklasse		CEM III/A 32,5 N-LH
Zementgehalt z	kg/m ³	260
Wassergehalt (w/z)	kg/m ³	155 0,55
Gesteinskörnung		
Sand 0/2 mm	kg/m ³	658
Kies 2/8 mm	kg/m ³	285
Kies 8/16 mm	kg/m ³	571
Kies 16/22 mm	kg/m ³	380
Gesamtgehalt	kg/m ³	1.894
Zusatzmittel		
Art		Fließmittel
Gehalt	M.-% v. z	0,5
Zusatzstoff		
Art		Flugasche
Gehalt	kg/m ³	50

z = Zementgehalt in kg/m^3
 H_{Zement} = Hydrationswärme in kJ/kg
 zum Zeitpunkt der erwarteten maximalen Bauteiltemperatur (geschätzt 2 Tage) [5]
 Q_{Beton} = Wärmekapazität des Betons in $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ – Rohdichte $2.350 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot 1,1 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
 = $2.590 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$

Das bedeutet, dass bei einer erwarteten Frischbetontemperatur von $22 \text{ }^\circ\text{C}$ die maximale Temperatur im Kern nach folgender Formel errechnet werden kann:

$$T_{\text{max}} = 22 + 15 = 37 \text{ }^\circ\text{C}$$

Somit durfte davon ausgegangen werden, dass keine kritischen Werte erreicht wurden. Die maximale Temperatur im Bauteil sollte weniger als $50 \text{ }^\circ\text{C}$ betragen. Darüber hinaus sollte die Temperaturdifferenz zwischen Betonkern und Randzone der Bodenplatte 20 K nicht überschreiten.

5 Ausführung

Die Ausführung der Bodenplatte erfolgte Anfang Juni 2009.

Der Betoneinbau wurde mit zwei 36-m-Betonpumpen (Bild 3) bei



Bild 3: Betoneinbau für die Bodenplatte mit zwei Betonpumpen

einer Betonlieferungsmenge von ca. $122 \text{ m}^3/\text{h}$ sichergestellt. Das Ausbreitmaß des Frischbetons wurde auf 500 mm festgelegt. Der Frischbeton wurde im Transportbetonwerk so eingestellt, dass eine Zugabe von Fließmittel auf der Baustelle entfallen konnte.

Der Betoneinbau erfolgte lagenweise in Dicken von 30 cm (Bild 4). Die einzelnen Lagen wurden miteinander vernäht.

Die Betonierarbeiten der Bodenplatte verliefen zügig und zeitgerecht. Die insgesamt 1.844 m^3 Transportbeton wurden in ca. 15 Stunden ein-

gebracht. Nach dem Einbau wurde die Oberfläche des Betons zügig abgezogen. Abschließend erfolgte das Abschieben und die Nachbehandlung mittels Abdecken mit Folien (Bild 5).

Nach DIN 1045-3 [6] ergab sich eine Nachbehandlungsdauer von mindestens 4 Tagen – in Abhängigkeit von der Festigkeitsentwicklung des Betons und der Temperatur.

Bild 6 zeigt den Verlauf der Wärmeentwicklung in der Bodenplatte – oben, unten und in der Mitte. Die maximale Kerntemperatur wurde mit $35 \text{ }^\circ\text{C}$ nach 63 Stunden erreicht. Die



Bild 4: Einbau des Betons, Verdichten und Abziehen



Bild 5: Nachbehandlung der betonierten Bodenplatte mittels Folie und durch Feuchthalten

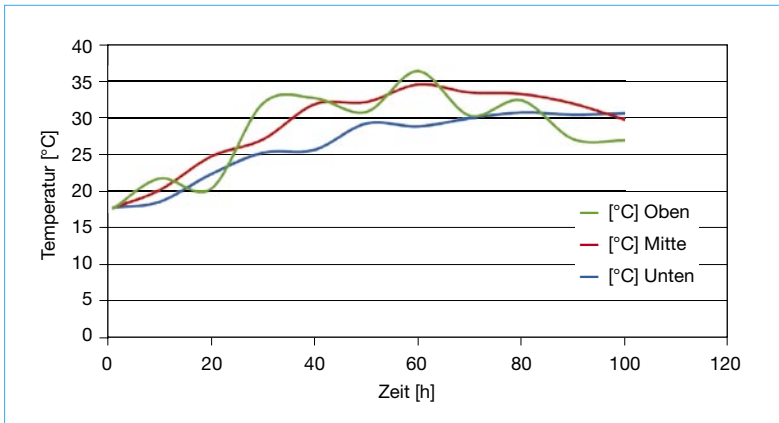


Bild 6: Entwicklung der Temperatur in der Bodenplatte in den ersten 4 Tagen nach dem Betonieren

Schwankungen an der Oberseite (grüne Linie) sind durch den Einfluss der Lufttemperaturen und Sonneneinstrahlung zu erklären.

Unter Berücksichtigung der aus Eigenüberwachungen des Zements

gewonnenen Gesamthydratationswärme nach 63 Stunden H_{Zement} (ermittelt durch isotherme Wärmeflusskalorimetrie (TAMAIR)), ergibt sich mit der oben angegebenen Näherungsformel eine Temperaturzunahme der Bodenplatte von:

$$\Delta T = \frac{z \cdot H_{\text{Zement}}}{O_{\text{Beton}}} \text{ [K]}$$

$$= \frac{260 \cdot 170}{2.590} = 17 \text{ K}$$

Demnach war bei einer Frischbetontemperatur von 21 °C im Kern der massigen Bodenplatte eine maximale Temperatur von:

$$T_{\text{max}} = 21 + 17 = 38 \text{ °C}$$

zu erwarten.

Der gemessene Wert liegt mit 35 °C also sehr nah am errechneten. Die Differenz des errechneten Werts zum tatsächlich gemessenen Wert lässt sich durch die endliche Dicke der Bodenplatte erklären, die von den adiabatischen Randbedingungen des Rechenmodells abweicht. Kritische Temperaturdifferenzen zwischen Kern und Randzone der Bodenplatte wurden ebenfalls nicht erreicht. Hier wurden Temperaturdifferenzen von maximal 10 K gemessen.

Bei der Besichtigung der Bodenplatte nach einigen Wochen wurden lediglich geringfügige Haarrisse im Bereich von Einbauteilen festgestellt. Größere Risse waren nicht erkennbar.

6 Zusammenfassung

Durch entsprechende Vorplanung ließ sich das anspruchsvolle Bauprojekt zielsicher und erfolgreich durchführen, Bild 8.

Durch Vorgespräche mit allen am Bau Beteiligten konnte die Betonzusammensetzung zielsicher auf die Anforderungen abgestimmt werden. Somit war es möglich, die massive und große Bodenplatte fugenlos herzustellen. Die Verwendung des



Bild 7: Hochregallager im Aufbau



Bild 8: Fertiges Hochregallager mit Versandgebäude

CEM III/A 32,5 N-LH hat sich bei dieser und damit auch für ähnliche Bauaufgaben bewährt.

Die bezüglich der Wärmeentwicklung und Betondruckfestigkeit getroffenen Abschätzungen haben sich bei der Ausführung in der Praxis bestätigt. Somit hat sich gezeigt, dass sich mit Hilfe der Näherungsformel bei massigen Bauteilen die Wärmeentwicklung gut und praxisgerecht abschätzen lässt.

Die Anforderungen an die Beton-eigenschaften wurden alle erfüllt (Tafel 2), so dass dem Bauherrn ein gelungenes Bauteil übergeben werden konnte.

Bauschild

Bauherr	Arnulf Betzold GmbH Lehrmittelverlag, Ellwangen
Architekten	Romer Architekten, Ellwangen
Tragwerksplanung	Ingenieurbüro Rieger, Ellwangen
Bauausführung	Franz Traub Bauunternehmen, Aalen-Ebnat
Transportbeton	TBR Transportbeton Ostalb GmbH & Co KG, Werk Aalen, Werk Ellwangen
Betontechnologische Beratung	Schwenk Zement KG, Ulm

Tafel 2: Ergebnisse der Güteprüfungen

Lufttemperatur	°C	12–25
Betontemperatur	°C	17–21
Frischbetonrohddichte	kg/dm ³	2,37
Ausbreitmaß		F4
Druckfestigkeit nach		
3 Tagen	N/mm ²	9
7 Tagen	N/mm ²	18
28 Tagen	N/mm ²	35
56 Tagen	N/mm ²	43

Für die in diesem Objekt erfolgte Betonkernaktivierung sind besonders massige Bodenplatten hervorragend geeignet. Durch die Wärmespeicherkapazität des Betons kann diese Gebäudetechnik zum Heizen und Kühlen genutzt werden. Damit wird ein

wichtiger ökologischer Beitrag zum Schutz natürlicher Ressourcen geleistet.

7 Literatur

- [1] DIN EN 206-1:2001-07 Beton. Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
- [2] DIN 1045-2:2008-08 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 2: Beton, Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
- [3] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): Richtlinie „Massige Bauteile für Beton“. Ausgabe 03/2005
- [4] Springenschmid, R.: Betontechnologie für die Praxis. Berlin 2007, S. 110
- [5] Basalla, A.: Wärmeentwicklung im Beton. Zement-Taschenbuch 1964/65. Herausgeber: Verein Deutscher Zementwerke, Düsseldorf 1963, S. 275–304
- [6] DIN 1045-3:2008-08 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 3: Bauausführung