

Neubau des Lobdeburg-Tunnels bei Jena

Zementauswahl, Betonkonzept, Bauausführung und Qualitätssicherung

Von Karsten Siewert, Weimar, Ditmar Hornung, Wiesbaden, Peter Fitzenreiter, Erfurt, Walter Kranert, Deuna, und Bernt Hochhausen, Leipzig

1 Einleitung

Im Rahmen des Verkehrsprojekts Deutsche Einheit Nr. 15 entstanden im Abschnitt Jena im Verlauf der BAB A 4 interessante Verkehrsbauwerke: Die südliche Saaletalbrücke mit einer Gesamtstützweite von 724 m, der Lobdeburg-Tunnel in offener Bauweise in einer Länge von 600 m und, nicht zu vergessen, der Umbau und die Instandsetzung der alten nördlichen Saaletalbrücke mit einer Gesamtlänge von 726 m. In westliche Richtung entsteht zurzeit der Jagdberg-Tunnel im bergmännischen Vortrieb, der 2012 für den Verkehr freigegeben werden soll.

Im Beitrag wird auf den Lobdeburg-Tunnel eingegangen. Für die Baumaßnahme wurden ca. 15.500 m³ Beton der Überwachungsklasse 1 und ca. 61.000 m³ Beton der Über-

wachungsklasse 2 eingebaut. Das Betonkonzept, im Wesentlichen die Forderung nach einem hellen Sichtbeton, nach hoher Frühfestigkeit und gleichzeitig niedriger Hydratationswärme des Betons, und die Abstimmung des Betonkonzepts auf den technologischen Ablauf führten zum erfolgreichen Einsatz eines Portlandkompositzements CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R-AZ.

2 Überblick über die Gesamtmaßnahme

Das tägliche Verkehrsaufkommen auf der BAB A 4 im Bereich Jena wird drastisch zunehmen. Wurden 1993 noch 45.000 Kfz/24 h gezählt, waren es 1998 bereits 55.000 Kfz/24 h. Die Prognose für 2015 geht von 85.000 Kfz/24 h aus. Der Bundesgesetzgeber hat durch das Fernstra-

Benausbaugesetz in der Fassung vom 15.11.1993 den Ausbau der BAB A 4 im Bedarfsplan für die Bundesfernstraßen als vordringlichen Bedarf eingestuft. Der sechsstreifige Ausbau der BAB A 4 im Teilabschnitt Jena ist Bestandteil des Verkehrsprojekts Deutsche Einheit Nr. 15.

Die starke Verflechtung des Autobahnverkehrs mit dem Verkehr zur Stadt Jena und die unmittelbar an die Autobahn angrenzende Wohnbebauung (Bild 1) waren der Grund für die Kopplung folgender vier Einzelmaßnahmen in einem Planfeststellungsverfahren:

- Sechsstreifiger Ausbau der BAB A 4,
- Neubau der L 1077 mit Beseitigung des Bahnübergangs „Neue Schenke“,
- Ausbau der B 88 im Bereich der Anschlussstelle Jena-Göschwitz und
- Neubau der Gewerbeerschließungsstraße Göschwitz.

Die Baumaßnahmen im Teilabschnitt Jena begannen 2003 mit dem Neubau der Saaletalbrücke. Im unmittelbaren Anschluss in östlicher Richtung wird die BAB A 4 auf einer Länge von 600 m durch den Lobdeburg-Tunnel geführt und dabei um maximal 7 m abgesenkt. Der Lobdeburg-Tunnel wurde mit einer variab-



Bild 1: Modellfoto des sechsstreifigen Ausbaus der BAB A 4 – Teilabschnitt Jena

Grafik: Ingenieurgruppe BEB GmbH und Freistaat Thüringen/Landesamt für Straßenbau

len Höhe von 2 m bis 4 m überschüttet und landschaftspflegerisch gestaltet (Bild 2). Damit verbesserten sich der Lärmschutz und das Wohnumfeld des Wohngebiets Jena-Lobeda-West erheblich.

Beide Tunnelröhren des Lobdeburg-Tunnels wurden zeitlich versetzt hergestellt, da während der Baumaßnahmen zwei Spuren je Richtungsfahrbahn der BAB A 4 zur Verfügung stehen mussten. Die Betonierarbeiten begannen an der Südröhre Anfang 2005 (Bild 3) und endeten im Juli 2006. Nach deren vollständiger Fertigstellung und Umverlegung des Verkehrs auf die fertig gestellte Richtungsfahrbahn Eisenach–Dresden im Mai 2007 wurde mit den Betonierarbeiten an der Nordröhre begonnen. Der letzte Betongang erfolgte dort nach einer Bauzeit von nur 18 Monaten zum Bogenschluss am 14.11.2008 (Bild 4).



Bild 2: Überschütteter Lobdeburg-Tunnel im Februar 2010

In dem Abschnitt befinden sich weitere Ingenieurbauwerke. Erwähnenswert ist hier vor allem die Geh- und Radwegbrücke am Lobe-Center, eine Einstabbogenbrücke aus einem Stahlhohlkasten mit einer Gesamtstützweite von 59 m (Bild 5). Ein weiteres größeres Bauwerk ist das Überführungsbauwerk an der Anschlussstelle Jena-Zentrum, eine Zweifeldbrücke in Verbundfertigteile (VFT-)Bauweise mit einer Spannweite von 85,9 m.

Im östlichen Bauabschnitt befanden sich drei Autobahnbauwerke, die abgebrochen und entsprechend den veränderten Anforderungen neu gebaut werden mussten. Im Zuge des Neubaus der L 1077 wurden ebenfalls zwei Bauwerke neu errichtet.

Zwischen den Anschlussstellen Jena-Zentrum und Jena-Göschwitz befinden sich mit den beiden Saaletal-



Bild 3: Betonierarbeiten an der Südröhre 2005



Bild 4: Letzter Betongang an der nördlichen Röhre des Lobdeburg-Tunnels zum Bogenschluss am 14.11.2008



Bild 5: Geh- und Radwegbrücke am Lobe-Center als Ein-stabbogenbrücke mit einer Gesamtstützweite von 59 m

brücken und dem Lobdeburg-Tunnel die größten Bauwerke des Projekts. Südlich der alten Saaletalbrücke erfolgte mit einem lichten Abstand von 5 m der Neubau der neuen 724 m langen Saaletalbrücke im Taktchiebeverfahren. Sie nimmt die Richtungsfahrbahn Dresden mit vier Fahrspuren auf. Der Überbau ist ein zweistegiger Spannbetonplattenbalcken mit torsionssteifen Hauptträgern und verdeckten Zugbändern. Von Süden aus gesehen übernimmt der Umriss der neuen Brücke die Gleichmäßigkeit und Rhythmik der alten Saaletalbrücke (Bild 6). Die

alte Saaletalbrücke ist mit 726 m die längste Gewölbereihenbrücke in Deutschland im Zuge einer Autobahn. Sie wurde in den Jahren 1937 bis 1941 aus Natursteinen errichtet, steht unter Denkmalschutz und beheimatet darüber hinaus die größte Dohlenkolonie in Thüringen. Die alte Saaletalbrücke wurde instand gesetzt und saniert. Für den Ausbau wurde die bestehende Mittelkappe zurückgebaut, der vorhandene Fahrbahnbelag entfernt und eine neue lastverteilende Platte mit Abdichtung und Fahrbahnbelag aufgebracht. Damit stehen für den Ver-

kehr der Richtungsfahrbahn Eisenach jetzt vier Fahrspuren zur Verfügung.

Der Vollständigkeit halber sei noch eine Maßnahme im westlichen Anschluss an das Saaletal genannt: der Bau des Jagdberg-Tunnels im Leutratl zwischen den Anschlussstellen Jena-Göschwitz und Schorba/Bucha. Das Tunnelbauwerk mit zwei getrennten Röhren je Richtungsfahrbahn wird rund 3 km lang sein. Der Verkehr könnte dann 2012 über den gesamten neuen Streckenabschnitt rollen.



Bild 6: Blick von Süden auf die beiden Saaletalbrücken: Neu- und Altbau sind harmonisch aufeinander abgestimmt

3 Von der Leistungsbeschreibung zum Betonkonzept

Für die Baumaßnahme Lobdeburg-Tunnel Jena wurden ca. 15.500 m³ Beton der Überwachungsklasse 1 und ca. 61.000 m³ Beton der Überwachungsklasse 2 eingebaut. Das größte Betonvolumen nahmen folgende Bauteile ein:

- Fundamente	15.800 m ³
- Portalwände, Portaldeckengewölbe und Portalkranz	1.700 m ³
- Wände und Deckengewölbe	37.500 m ³
- Kappen der Notgehwege	500 m ³

Jede der beiden Tunnelröhren mit einer lichten Weite von jeweils 18,25 m wurde als ein unten offenes Rahmenbauwerk ausgebildet, das aus den Rahmenwänden und dem biegesteif angeschlossenen Halbkreisgewölbe der Tunneldecke besteht. Die innen liegenden Wände der beiden Röhren ruhen bei 15 der 60 Blöcke auf einem gemeinsamen Fundament. Neben der damals aktu-

ellen DIN 1045 mussten also auch die speziellen Anforderungen der Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING) [1] beachtet und umgesetzt werden.

Die Herstellung erfolgte als wasserundurchlässige Betonkonstruktion ohne zusätzliche Abdichtung. Die einzelnen Tunnelblöcke wurden durch Raumbaugen getrennt. In der Bauwerksmitte befindet sich ein Querstollen zur Fluchtverbindung der beiden Röhren.

3.1 Betontechnische Anforderungen

Die Anforderungen aus der Leistungsbeschreibung an den Beton des Lobdeburg-Tunnels gibt **Tafel 1** wieder.

Zu den detailliert angegebenen Anforderungen an den Beton kam eine weitere Anforderung an den Wand- und Deckenbeton aus der Leistungsbeschreibung hinzu: „Die gesamten Wand- und Deckenflächen der Tunnelröhren sind in einem hellen Sichtbeton herzustellen.“ Diese nicht

quantifizierte Anforderung hat aber durchaus ihre Berechtigung. Wenn der Fahrer eines Pkw oder Lkw in das Portal des Tunnels einfährt, sollte der Hell-Dunkel-Kontrast für das Auge möglichst gering sein. Hinzu kommen langfristige Einsparungen bei der Unterhaltung (Beleuchtung) des Bauwerks.

Aus Sicht eines zügigen Bauablaufs sollte der Beton eine hohe Frühfestigkeit aufweisen. Dafür sind die Absenkung des w/z-Werts, die Erhöhung des Zementgehalts, die Wahl einer höheren Zementfestigkeitsklasse oder der Einsatz von Portlandzement übliche Maßnahmen. Gleichzeitig waren die Abmessungen der einzelnen Bauteile zu beachten. Die Dicke des Deckengewölbes beträgt im Scheitelpunkt 0,55 m und 1,35 m im Knotenpunkt Wand/Deckengewölbe (Kämpfer). Die Fundamente der Mittelachse, auf denen jeweils eine Wand der Tunnelröhre Nord und der Tunnelröhre Süd aufsitzen, sind bis zu 8,25 m breit und 1,39 m hoch. Es wurden jeweils Blöcke von 10,00 m Länge betoniert, so dass für einen Mittelachsenfundamentblock 115 m³, für einen Wandblock 65 m³ und für einen Gewölbeblock 180 m³ Beton pro Betongang benötigt wurden. Aufgrund einer solchen Kubatur werden – um das Rissrisiko infolge hoher Temperaturgradienten im Beton zu minimieren – üblicherweise Zemente mit niedriger Hydratationswärme ausgewählt, z.B. Hochofenzemente. Die Forderungen nach hoher Frühfestigkeit und nach gleichzeitig niedriger Wärmeentwicklung des Betons schienen nicht vereinbar zu sein. Als Kompromiss wurde ein neu entwickelter Portlandkompositzement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R-AZ vorgeschlagen, der in der Summe die einzelnen teilweise gegenläufigen Anforderungen am besten erfüllte.

Tafel 1: Anforderungen an den Beton des Lobdeburg-Tunnels nach Leistungsbeschreibung

Beton für ...	Druckfestigkeitsklasse	Expositionsklasse
Verfüllung als Bodenersatz	C16/20	X0
Sauberkeitsschicht	C12/15	X0
Fundamente	C25/30	XC2, XF1
Portalwände, Portaldeckengewölbe, Portalkranz	C30/37	XC4, XD2, XF2
Wände und Deckengewölbe	C30/37	XC3, XD2, XF2
Kappen der Notgehwege	C25/30 mit LP	XC4, XD3, XF4
Rahmen Fluchtstollen	C25/30	XC2
Trogwände, Fluchtstollen und Gesims	C25/30	XC4

3.2 Zementauswahl

3.2.1 Untersuchung grundlegender Eigenschaften von Portlandkompositzementen

Bereits seit Mitte der 90er Jahre ist die Minderung der CO₂-Emission ein zentrales Thema bei der Herstellung von leistungsfähigen Zementen. Neben der Senkung des elektrischen und thermischen Energieverbrauchs kann dazu auch der gezielte Einsatz von weiteren Hauptbestandteilen in Zementen, z.B. gemahlener Kalkstein und Hüttensand, beitragen.

In verschiedenen Forschungsprojekten wurden Abläufe der Zementhydratation mit Zugabe von Hüttensand- und Kalksteinmehlen untersucht. Aus den Erfahrungen beim Einsatz von hüttensandhaltigen Zementen (Portlandhütten- und Hochofenzementen) ist der Einfluss des Hüttensands auf den Hydratationsverlauf hinreichend bekannt. In Abhängigkeit von dem Hüttensandgehalt im Zement kann insbesondere die Hydratationswärme gesenkt und so das Nacherhärtungspotenzial im Stoffsystem verbessert werden.

Durch den Einsatz von speziell aufbereiteten Kalkstein- und Hüttensandmehlen, die separat gemahlen werden, kann der Hydratationsverlauf im frühen Stadium beeinflusst werden (Bild 7). Die Ergebnisse der Differential-Kalorimeter-Analysen (DCA-Analysen) zeigen, dass beim Einsatz von Kalksteinmehlen mit hoher Feinheit die Wärmeentwicklung bei der Zementhydratation im frühen Stadium verstärkt wird, auch wenn durch die inerte Kalksteinmehlkomponente eine Verdünnung der Bindemittelmatrix erfolgt. Durch begleitende Untersuchungen mit einem Rasterelektronenmikroskop mit einer gasförmigen Umgebung in der Probenkammer (ESEM) in Ver-

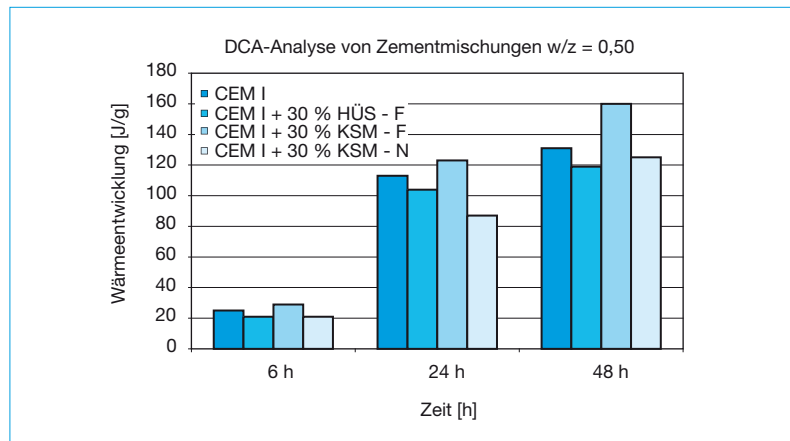


Bild 7: Einfluss von speziell aufbereiteten Kalkstein- und Hüttensandmehlen auf die Wärmeentwicklung im frühen Stadium der Zementhydratation

bindung mit Differential-Thermo-Analysen (DTA-Analysen) und Röntgendiffraktometrie (XRD) konnte dieser Zusammenhang bestätigt werden. Aufgrund ihrer großen spezifischen Oberfläche wirken die hochfeinen Kalksteinmehlpartikel als Kristallisationskeime für die entstehenden CSH-Phasen. In weiteren Untersuchungen von Abmischungen auf der Grundlage von reinem Alit (Tricalciumsilicat, Kurzbezeichnung C₃S) mit Kalksteinmehl konnte eine

Erhöhung der Wärmeentwicklung im Frühstadium ebenfalls nachgewiesen werden (Bild 8).

Zum Thema Dauerhaftigkeit von Betonen wurden komplexe Untersuchungen über den Einfluss des Portlandkompositzements CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R in Bezug auf den Ablauf einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) im Beton durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgten mit vier verschiedenen Gesteinsarten (zwei

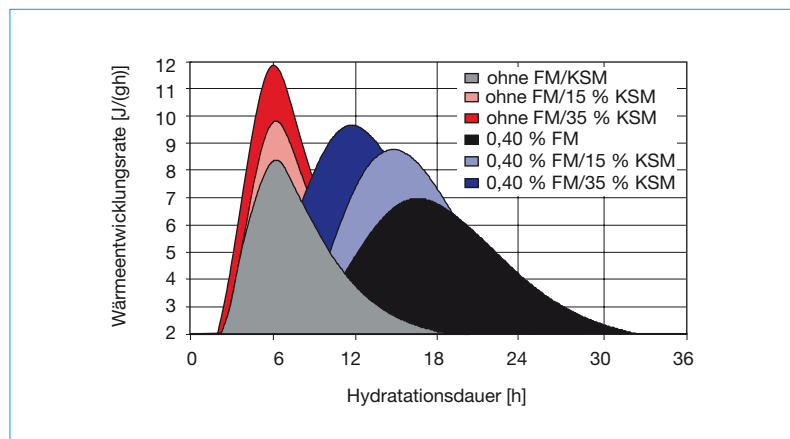


Bild 8: Einfluss von speziell aufbereitetem Kalksteinmehl bzw. der Fließmitteldosierung auf die Wärmeentwicklung im frühen Stadium der Hydratation von reinem Alit (C₃S)

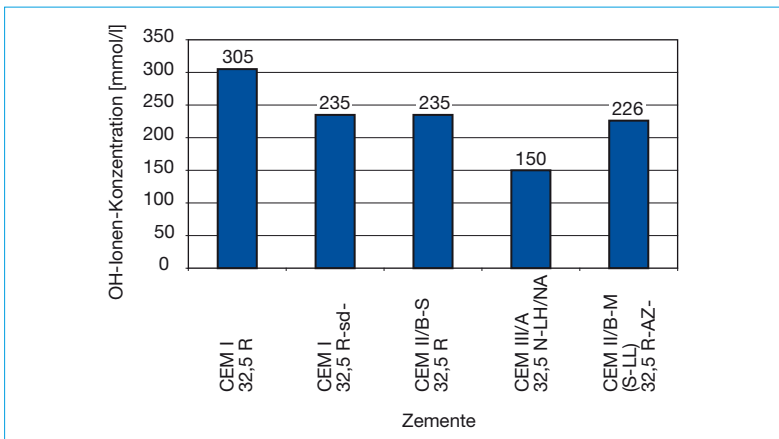


Bild 9: Porenlösung bei Verwendung unterschiedlicher Zementarten

Kiese, eine Grauwacke, ein Diabas) mit CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R im Vergleich zu CEM I 32,5 R und CEM II/B-S 32,5 R der gleichen Klinkerbasis. Zur Beurteilung der Wirksamkeit der drei ausgewählten Zementarten hinsichtlich der Vermeidung einer betonschädigenden AKR wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Betonversuche (FIB-Klimawechsellaagerung und Freilandlagerung),
- Mörtelschnelltests mit den vier ausgewählten Gesteinskörnungen,
- Porenlösungsanalysen (Bild 9) und
- Festbetonuntersuchungen an Dünnschliffen und mittels Rasterelektronenmikroskop (REM) einschließlich EDX-Element- bzw. Oxidanalyse (EDX: Energy Dispersive X-ray Analysis).

Aus den Ergebnissen der Untersuchungen kann abgeleitet werden, dass sich der Portlandkompositzement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R hinsichtlich der Vermeidung einer betonschädigenden AKR vorteilhaft im Vergleich zu dem untersuchten Portlandzement CEM I und dem Portlandhüttenzement CEM II/B-S

mit der jeweils gleichen Klinkerbasis verhält.

3.2.2 Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für den Portlandkompositzement

Im Mai 2004 wurde von dem Zementhersteller beim Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) Berlin der Antrag auf eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für einen Portlandkompositzement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R bzw. 42,5 R „Deuna“ mit dem Ziel gestellt, diesen Zement abweichend von DIN 1045-2 [2] Tabelle F.3.2 zusätzlich auch für Betone in den Expositionsklassen XC3, XC4, XD1 bis XD3, XS1 bis XS3, XF1 bis XF4, XA1 bis XA3 und XM1 bis XM3 verwenden zu dürfen.

Die Hauptbestandteile des Portlandkompositzements CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R bzw. 42,5 R „Deuna“ sind neben Portlandzementklinker Hütten sandmehl (max. 20 M.-%) und Kalksteinmehl (max. 20 M.-%). Der Gehalt an Hütten sand- und Kalksteinmehl im Zement darf in der Summe 35 M.-% nicht überschreiten. Durch eine getrennte Mahlung der Hauptbestandteile ist der Zement hinsichtlich seiner Korngrößenverteilung optimiert. Der Kalkstein und der

Hütten sand sind sehr fein gemahlen. Dadurch ergibt sich trotz der relativ hohen spezifischen Oberfläche immer noch ein niedriger Kennwert des Wassergehalts für die Normsteife. Die Erklärung hierfür ist die Ausfüllung der Zwischenräume mit Kalksteinmehlparkeln, die das dort sonst befindliche Wasser verdrängen.

Die Zulassungsprüfung gemäß Prüfplan des DIBt erfolgte an der MFFPA Weimar. Nach der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Z-3.17-1864 vom 21.12.2004 (aktuell gültige Zulassung vom 07.12.2009) kann der Portlandkompositzement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R-AZ bzw. 42,5 R-AZ „Deuna“ für alle Expositionsklassen eingesetzt werden.

3.2.3 Zementkenngrößen des verwendeten Portlandkompositzements

Die chemischen und physikalischen Kennwerte des Portlandkompositzements CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R-AZ „Deuna“ sind in den Tabellen 2 und 3 angegeben.

Tafel 2: Chemische Kennwerte CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R-AZ „Deuna“

Kennwert		Istwerte
SiO ₂	M.-%	19,3
Al ₂ O ₃	M.-%	4,9
Fe ₂ O ₃	M.-%	1,9
CaO	M.-%	59,1
MgO	M.-%	2,8
Sulfatgehalt als SO ₃	M.-%	2,9
Na ₂ O-Äquivalent	M.-%	0,85
Kalkstandard		94,3
Silicatmodul		2,8
Tonerdemodul		2,5

Tafel 3: Physikalische Kennwerte CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R-AZ „Deuna“

Kennwert		Istwerte
spezifische Oberfläche S	cm ² /g	4.750
Wassergehalt für Normsteife	M.-%	28,0
Erstarrungsbeginn	min	185
Druckfestigkeit nach		
1 Tag	N/mm ²	12,2
2 Tagen	N/mm ²	25,4
7 Tagen	N/mm ²	38,8
28 Tagen	N/mm ²	49,5
56 Tagen	N/mm ²	52,8
Hydratationswärme nach 7 Tagen	J/g	285



Bild 12: Eigenfarben der Zemente (oben: CEM I 32,5 R, rechts: CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R-AZ, unten: CEM III/A 32,5 N-LH/NA, links: CEM II/B-S 32,5 R)

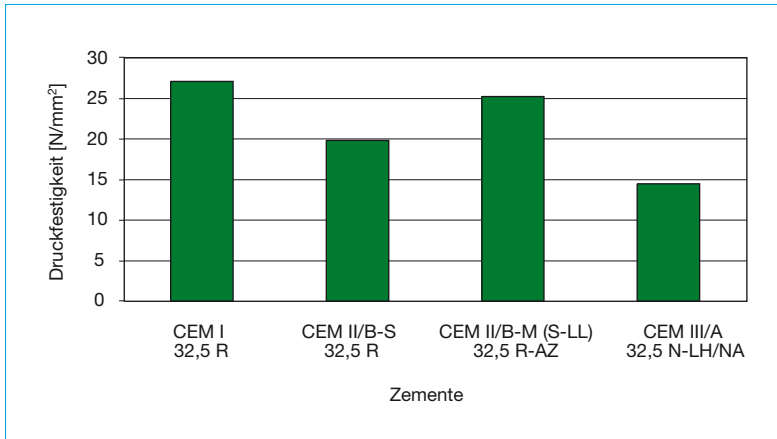


Bild 10: Zementdruckfestigkeit untersuchter Zemente nach zwei Tagen

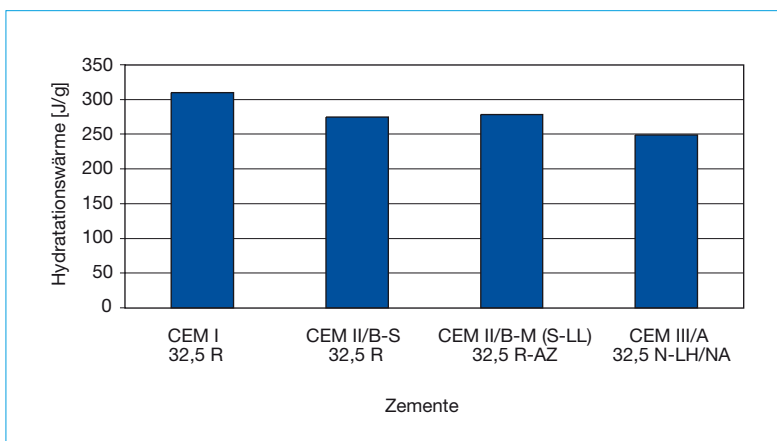


Bild 11: Hydratationswärme untersuchter Zemente nach sieben Tagen

In den Bildern 10 und 11 werden die Zementdruckfestigkeiten nach zwei Tagen und die Hydratationswärmern nach sieben Tagen von den Zementen CEM I 32,5 R, CEM II/B-S 32,5 R, CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R-AZ und CEM III/A 32,5 N-LH/NA des gleichen Herstellwerks in Deuna dargestellt. Daraus kann abgeleitet werden, dass der ausgewählte Portlandkompositzement einen optimalen Kompromiss zwischen hoher Frühfestigkeit und moderater Wärmeentwicklung des Betons darstellt. Aufgrund der hellen Eigenfarbe erfüllt er auch die Forderung nach einem „hellen Sichtbeton“ in ausreichendem Maße (Bild 12).

3.3 Eignungsversuche mit objektspezifischer Betonzusammensetzung

Für den Beton der Druckfestigkeitsklasse C30/37 wurden mit dem Portlandkompositzement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R-AZ Eignungstests durchgeführt, um Anhaltswerte für die Frühfestigkeit des Betons zu erhalten. In der Leistungsbeschreibung ist für die Wände und die Decken-

Tafel 4: Vorschlag für die Zusammensetzung eines Betons der Druckfestigkeitsklasse C30/37 (Wände und Deckengewölbe, nach ZTV-ING)

Kennwert		Istwerte
Expositionsklassen		XC4, XD2, XF2, XF3, XA2
Konsistenzklasse		F3 (weich)
Zementart		CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R-AZ
Zementgehalt	kg/m ³	340
Wassergehalt	kg/m ³	170
Gesteinskörnungen (A16/B16)		
Sand 0/2	M.-%	36
Kies 2/8	M.-%	25
Kies 8/16	M.-%	39
Zusatzmittel: Betonverflüssiger	M.-% v.z	0,53
Frischbetontemperatur	°C	19,4
Ausbreitmaß		
10 min nach Mischende		490
30 min nach Mischende		450
45 min nach Mischende	mm	430
Luftgehalt des Frischbetons	Vol.-%	1,7
Frischbetonrohddichte	kg/m ³	2.360
Festbetonrohddichte	kg/m ³	2.330

gewölbe ein Beton der Druckfestigkeitsklasse C30/37 und der Expositionsklassen XC3, XD2, XF2 (Vorschlag für die Betonzusammensetzung s. Tafel 4) und für die Portalwände, das Portaldeckengewölbe und den Portalkranz ein Beton der Druckfestigkeitsklasse C30/37 und der Expositionsklassen XC4, XD2, XF2 vorgehen.

Bereits der erste Eignungstest bestätigte, dass die geforderte Betondruckfestigkeit von 27,0 N/mm² nach drei Tagen mit der Betonzusammensetzung sicher erreicht werden kann (Bild 13).

Der Beton ließ sich gut verarbeiten und verdichten. Mit dem Wasserzementwert von 0,50 wurden die

erforderlichen Festigkeiten der Druckfestigkeitsklasse C30/37 sicher erfüllt (Bild 14). Die oben beschriebene Optimierung der Korngrößenverteilung des Portlandkompositzements CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R-AZ führt für den Verwender des Betons zu einem äußerst geringen und somit nicht nachteiligen Bluten des Betons (Bild 15).

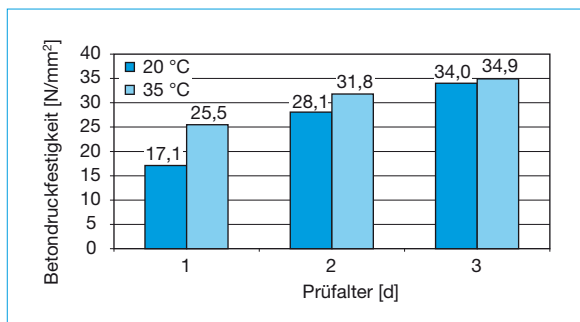


Bild 13: Frühfestigkeitsentwicklung des Betons in Abhängigkeit von der Lagerungstemperatur

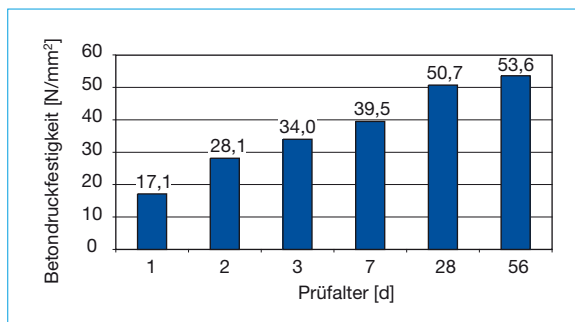


Bild 14: Festigkeitsentwicklung des Betons bei 20 °C Lagerungstemperatur

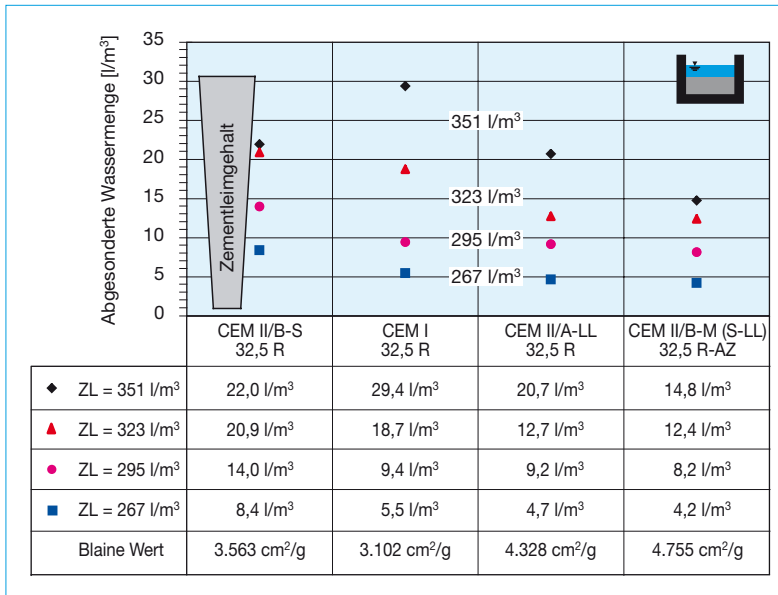


Bild 15: Vergleich des Blutens von Beton mit unterschiedlichen Zementen und unterschiedlichen Zementleimgehalten bei konstantem Wasserzementwert von 0,60

Aufgrund der positiven Ergebnisse des Eignungstests für den Beton der Wände und des Deckengewölbes sowie der Portalwände, des Portaldeckengewölbes und des Portal Kranztes wurde für den Fundamentbeton eine Betonzusammensetzung mit dem Portlandkompositzement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R-AZ entwickelt.

3.4 Betonzusammensetzungen für die Bauteile des Lobdeburg-Tunnels

Die Eignungstests waren Grundlage für die Erstellung der Betonzusammensetzungen für die Erstprüfung. In Tafel 5 sind die Betonzusammensetzungen für die Fundamente, die Wände und Deckengewölbe sowie die Kappen zusammengestellt. Für diese Betonzusammensetzungen wurden keine Zusatzstoffe eingesetzt.

Für die Betonzusammensetzung der Wände und des Deckengewölbes

wurden Gesteinskörnungen mit einem Größtkorn von 16 mm verwendet. Damit konnte der Beton trotz des hohen Bewehrungsgrads gut eingebracht und verdichtet werden (Bild 16).



Bild 16: Vorbereitungen zur Betonage eines Gewölbeblocks

Bei den Fundamenten, Wänden und Deckengewölben handelt es sich um massive Bauteile aus Beton im Sinne der DAfStb-Richtlinie „Massige Bauteile aus Beton“ [3]. Gemäß dieser Richtlinie ist ein möglichst langsamer Temperaturanstieg infolge Hydratationswärme anzustreben. Die Höchsttemperatur und der Temperaturunterschied zwischen Kern- und Randzone im Bauteil sind gering zu halten. Im Allgemeinen sollen 15 K Temperaturdifferenz nicht überschritten werden.

Die Temperaturentwicklung der ausgewählten Betonsorte für das Deckengewölbe wurde auch unter konkreten Bedingungen vor Ort ermittelt. Dazu wurde ein Fundamentblock mit den Abmessungen 10,00 m x 5,00 m x 1,10/1,20 m mit dieser Betonsorte betoniert und der Temperaturverlauf in der Kern- und Randzone ermittelt (Bild 17).

Die Ergebnisse zeigten, dass die maximale Temperatur sowohl im Kern- als auch im Randbereich nach ca. 30 Stunden erreicht wird. Die größ-

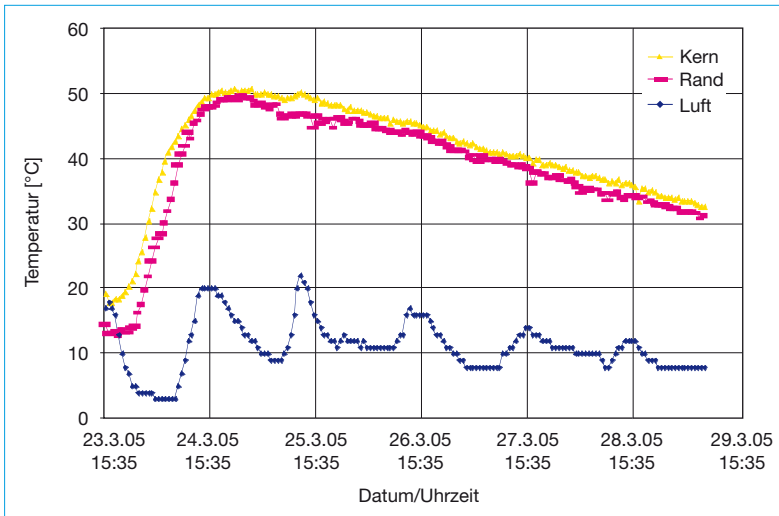


Bild 17: Temperaturverlauf in einem Fundamentblock, der mit der Betonsorte für den Beton des Deckengewölbes betoniert wurde

te Temperaturdifferenz von 9,7 K tritt schon wesentlich früher nach knapp 13 Stunden auf. Eine visuelle Begutachtung der Betonoberfläche ergab keinerlei Beanstandungen hinsichtlich so genannter „Temperaturrisse“.

4 Baukonzept des Lobdeburg-Tunnels

Der Lobdeburg-Tunnel Jena hat zwei separate Tunnelröhren. Jede Röhre besteht aus 60 Blöcken à 10 m Länge, was eine Gesamtlänge des Tunnels von 600 m ergibt.

Tafel 5: Übersicht über die zur Anwendung gekommenen Betonzusammensetzungen (nach ZTV-ING)

Kennwert		Bauteil		
		Fundament	Wand, Gewölbe	Kappe
Druckfestigkeitsklasse		C25/30	C30/37	C25/30 LP
Expositionsklassen		XC4, XF1, XA1	XC4, XD2, XF2, XF3, XA2	XC4, XD3, XF4, XA1
Konsistenzklasse		F2 (plastisch)		
Zementart		CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R-AZ		
Zementgehalt	kg/m ³	305	340	353
Wassergehalt	kg/m ³	165	166	174
Wasserzementwert		0,54	0,49	0,49
Gesteinskörnungen (Sieblinie A/B)				
Sand 0/2	M.-%	36	40	35
Kies 2/8	M.-%	12	25	29
Kies 8/16	M.-%	27	35	36
Kies 16/32	M.-%	25	–	–
Zusatzmittel	M.-% v.z	BV: 0,70	FM: 1,50	LP: 0,25
Ausbreitmaß				
10 min nach Mischende		440	480	420
45 min nach Mischende	mm	410	450	400
Luftgehalt des Frischbetons	Vol.-%	–	1,8	5,3
Frischbetonrohddichte	kg/m ³	2.340	2.340	2.240
Festbetondruckfestigkeit f_{cm} nach				
1 Tag		–	9,5	–
2 Tagen		12,5	22,0	17,0
3 Tagen		–	28,5	–
7 Tagen		–	38,5	25,5
28 Tagen	N/mm ²	38,0	49,0	39,5
Wassereindringtiefe	mm	19	–	18
Festbetonrohddichte	kg/m ³	2.320	2.300	2.230

Der Betonierablauf sollte so organisiert werden, dass jede Woche ein kompletter Block betoniert werden konnte. Um dieses hohe Bautempo erreichen zu können, wurde vom Auftragnehmer ein Schalwagen (fahrbares Bogengerüst) für die Herstellung des Bogens eingesetzt (Bild 18 bis 21). Die Schalhaut bestand dabei aus Stahl. Trotz der hohen Investition überwogen die Vorteile: schnelle Handhabung und kurze Umsetzzeiten, selbst fahrender Wagen sowie verschleißfreie Schalhaut. Unabhängig von der Linienführung im Grundriss konnte der Schalwagen in der Geraden, der

Klothoide und im Bogen eingesetzt werden.

Sinnvollerweise erfolgte die Betonage freitags. Für einen effektiven Ablauf und die Vorbereitung der Betonage des nächsten Gewölbeblocks sollte montags entschalt, d.h. der Schalwagen abgesenkt und verfahren werden. Die verbleibende Zeit bis zum folgenden Freitag wurde für die Einrichtung des Schalwagens, das Verlegen der Bewehrung und andere Arbeiten genutzt.

Für das Absenken und Verfahren des Schalwagens musste aus statischer

Sicht der Beton eine Druckfestigkeit von mindestens $26,0 \text{ N/mm}^2$ erreicht haben. Versuche ergaben, dass bei einer Betonage am Freitag diese Festigkeit am darauf folgenden Montag sicher erreicht wurde. Danach wurde untersucht, ob ein Belassen im Schalwagen als Nachbehandlungsmaßnahme ausreicht. Gemäß ZTV-ING [2] Teil 3 „Massivbau“, Abschnitt 2 „Bauausführung“ muss der Beton bei Umweltbedingungen, die den Expositionsclassen XC3, XC4, XF, XD und XA entsprechen, so lange nachbehandelt werden, bis die Festigkeit des oberflächennahen Betons 70 % der charakteristischen Festigkeit des



Bild 18: Aufbau des Schalwagens



Bild 19: Räder und Hydraulik ermöglichen ein Verfahren des Schalwagens



Bild 20: Schalwagen vor der Betonage eines Gewölbeblocks (180 m^3)



Bild 21: Schalwagen nach der Betonage eines Gewölbeblocks (180 m^3)

verwendeten Betons erreicht hat. Für den Beton des Deckengewölbes in der Festigkeitsklasse C30/37 konnte also auf weitere Nachbehandlungsmaßnahmen verzichtet werden, wenn der Beton zum Zeitpunkt des Absenkens des Schalwagens mindestens $26,0 \text{ N/mm}^2$ (70 % von $37,0 \text{ N/mm}^2$) aufwies.

Um diesen Wert auch bei ungünstiger Witterung sicher zu erreichen, wurde die Wandschalung zusätzlich mit Hartschaumstoff gedämmt und der Schalwagen gegebenenfalls beheizt. Die Seitenteile des Bogens waren durch die Konterschaltung geschützt und die frei liegende Oberseite wurde mit einer Folie abgedeckt.

Der Bauablauf wurde so gestaltet, dass freitags früh jeweils ein Block des Deckengewölbes betoniert wurde. Montags früh wurde die Betondruckfestigkeit der auf dem Bauwerk gelagerte Probewürfel ermittelt. Wurden mindestens $27,0 \text{ N/mm}^2$ erreicht – 1 N/mm^2 wurde als zusätzliche Sicherheit auf den erforderlichen Wert von $26,0 \text{ N/mm}^2$ aufgeschlagen – wurde der Schalwagen abgesenkt. Die ermittelten Prüfwerte zeigten, dass die Druckfestigkeiten drei Tage nach der Betonage des Gewölbeblocks der Südröhre im Mittel $32,5 \text{ N/mm}^2$ erreichten (Bild 22). Mit dem Belassen des Betons im Schalwagen konnte somit eine ausreichende Nachbehandlung gewährleistet werden.

5 Kontrollprüfungen

Aufgrund der besonderen Bedeutung für die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere die mögliche Gefährdung von Leben und Gesundheit, gibt es neben dem dualen System der Eigen- und Fremdüberwachung bei Verkehrsbauten

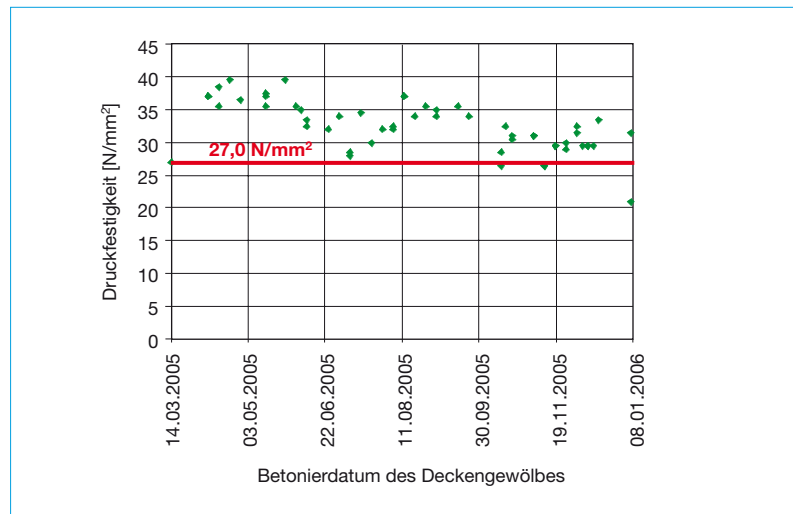


Bild 22: Erhärtungsprüfung an Probekörpern (Würfel mit 150 mm Kantenlänge) ca. drei Tage nach Betonierbeginn. Die Würfel wurden auf dem Gewölbe der Südröhre gelagert.

zusätzlich Kontrollprüfungen. Diese Kontrollprüfungen werden vom Auftraggeber der Baumaßnahme veranlasst. Für den Lobdeburg-Tunnel Jena gelten die Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING) [2]. In Teil 1 „Allgemeines“, Abschnitt 1 „Grundsätzliches“ ist die Überwachung der Ausführung und Prüfung der fertigen Leistung in Zusammenspiel von Eigen- und

Fremdüberwachung sowie Kontrollprüfungen beschrieben.

Die MFPA Weimar wurde mit der Durchführung von Kontrollprüfungen beauftragt. Zusätzlich wurde der Auftraggeber bzw. sein Bauüberwacher hinsichtlich der zum Einsatz kommenden Betonzusammensetzungen beraten. Der Prüfplan über Art, Häufigkeit und Nachweisbedingungen der Kontrollprüfungen wur-

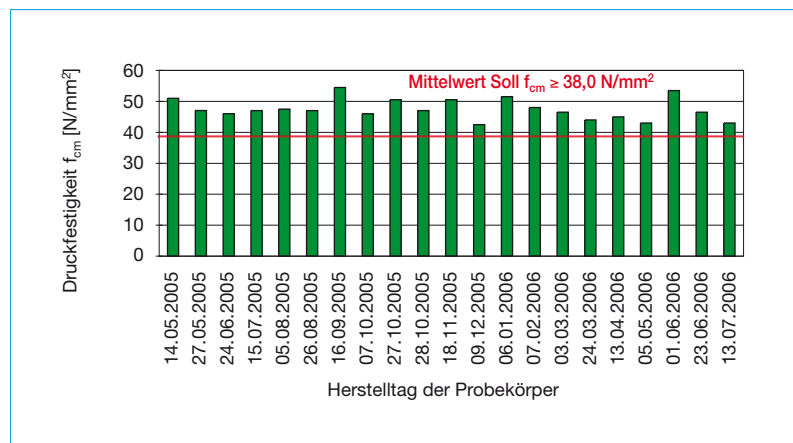


Bild 23: Ergebnisse der Kontrollprüfungen über die Druckfestigkeit des Betons für das Deckengewölbe der Südröhre (Druckfestigkeitsklasse C30/37)

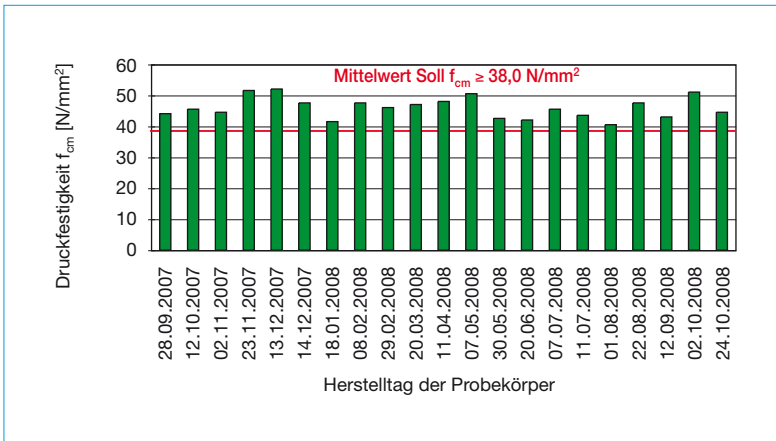


Bild 24: Ergebnisse der Kontrollprüfungen über die Druckfestigkeit des Betons für das Deckengewölbe der Nordröhre (Druckfestigkeitsklasse C30/37)

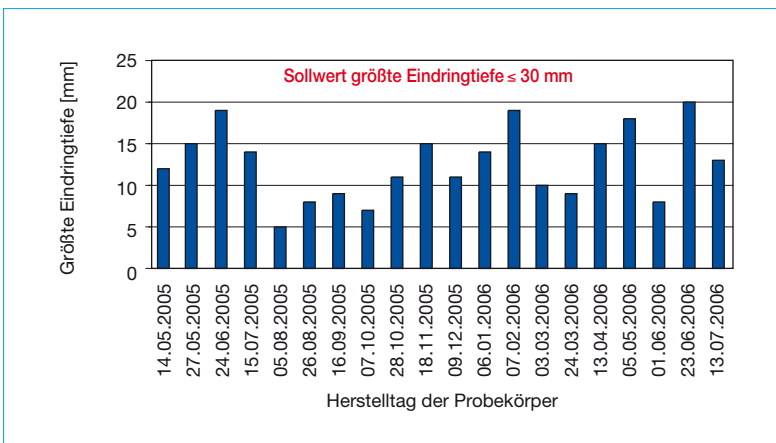


Bild 25: Ergebnisse der Kontrollprüfungen über den Wassereindringwiderstand des Betons für das Deckengewölbe der Südröhre

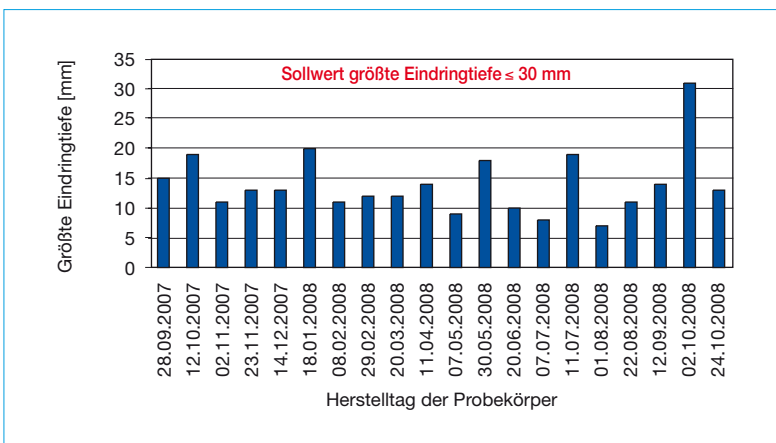


Bild 26: Ergebnisse der Kontrollprüfungen über den Wassereindringwiderstand des Betons für das Deckengewölbe der Nordröhre

de gemeinsam zwischen Auftraggeber, Bauüberwacher und Auftragnehmer abgestimmt.

Im Rahmen der Kontrollprüfungen wurden an den eingesetzten Betonsorten für die Fundamente, die Wände, das Deckengewölbe, die Notgehwege, die Portalwände, den Portalkragen, den Querstollen und den Revisionskanal die Druckfestigkeit und die Wassereindringtiefe des Betons bestimmt. Bis auf zwei geringfügige Überschreitungen des Sollwerts für die größte Eindringtiefe erfüllten alle Prüfergebnisse die Anforderungen. Stellvertretend dafür werden die am Beton für das Deckengewölbe ermittelten Prüfergebnisse für die Süd- und die Nordröhre in den Bildern 23 bis 26 dargestellt.

Für den Beton des Deckengewölbes darf gemäß ZTV-ING [2] Teil 5 „Tunnelbau“, Abschnitt 2 „Offene Bauweise“ die Wassereindringtiefe höchstens 30 mm betragen.

6 Einschätzung der Betonflächen aus Sicht des Auftraggebers

Die im Frühjahr 2005 begonnenen Betonierarbeiten an Fundamenten, Wänden und dem Deckengewölbe bestätigen eindrucksvoll die Ergebnisse aus den Voruntersuchungen und den Erstprüfungen. Der Beton mit dem gewählten Portlandkompositement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R-AZ besitzt ein sehr gutes Zusammenhaltvermögen, ist ausgezeichnet verdichtbar und führt zu einem äußerst geringen und somit nicht nachteiligen Bluten.

Der vom Auftraggeber geforderte helle Sichtbeton wurde erreicht. Lunker und Kiesnester sind praktisch nicht vorhanden.

Die vom Auftraggeber vorgegebene Rissbreitenbeschränkung wurde eingehalten.

7 Zusammenfassung

Bei der Baumaßnahme Lobdeburg-Tunnel hat das Zusammenspiel der Beteiligten hervorragend funktioniert. Das Betonkonzept wurde bereits in die Planung des Auftraggebers einbezogen und später während der Baudurchführung mit dem Auftragnehmer, dem Zementhersteller und der MFPA Weimar feinabgestimmt und den Baubedingungen angepasst.

Die Suche nach einem optimalen Kompromiss zwischen den Forderungen nach einem hellen Sichtbeton, nach hoher Frühfestigkeit und gleichzeitig niedriger Hydratationswärme des Betons ist durch den Einsatz eines Portlandkompositzements CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R-AZ gelungen. Besonders hervorzuheben ist, dass eine Reihe von Vorversuchen im Vorlauf der Betonage des Bauwerks offene Fragen geklärt hat. Bei der eigentlichen Bauausführung brauchte nicht mehr experimentiert zu werden. Von den Beteiligten wird eingeschätzt, dass zwar in der Vor-



Bild 27: Westportal der Süd- und Nord-tubes des Lobdeburg-Tunnels

bereitung der Baumaßnahme ein hoher Aufwand betrieben wurde, letztendlich eine solche Vorgehensweise aber Geld und Zeit spart und ein „ungestörtes“ Bauen ermöglicht.

Die Verkehrsfreigabe für die Nordröhre erfolgte am 24.09.2009. Bild 27 zeigt das Westportal der Süd- und Nord-tubes des Lobdeburgtunnels.

8 Literatur

- [1] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING), 2003.
- [2] DIN 1045:2008-08 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teile 1-4
- [3] Richtlinie Massige Bauteile aus Beton. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 2005.

Bei den gezeigten Fotos handelt es sich um Baustellenfotos der Hochtief Construction AG und der Deuna Zement GmbH.

Bauschild

Zementhersteller	Deuna Zement GmbH
Wissenschaftliche Betreuung	F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde an der Bauhaus Universität Weimar
Transportbeton	Liefergemeinschaft „BAB A 4 Einhausung Tunnel Jena“
Bauausführung	Hochtief Construction AG, Niederlassung Leipzig
Bauherr	Thüringer Landesamt für Bau und Verkehr, Abteilung Autobahnen