

Neubau des Tunnels Bebenroth

Erfolgreicher Einsatz von CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R-AZ für den Ausbau der Tunnelinnenschale

Von Walter Kranert, Wiesbaden, Steffen Walther, Ebersbach-Neugersdorf, und Mario Fankhauser, Innsbruck

1 Einleitung

Der Neubau des Bebenroth-Tunnels ist eine der umfangreichen Baumaßnahmen im Bereich der DB-Strecke 3600, Frankfurt–Fulda–Bebra–Göttingen, um den Bahnverkehr für die Zukunft leistungsfähiger zu gestalten. Aktuell wird der Bahnverkehr über eine Länge von 935 m durch den in den Jahren 1872 bis 1875 erbauten Bebenroth-Tunnel geleitet, der sich zwischen den Bahnhöfen Oberrieden und Eichenberg in der Gemarkung Witzenhausen befindet.

Unmittelbar neben dem alten Bebenroth-Tunnel entstand eine neue Tunnelröhre mit einer Gesamtlänge von 1.030 m (Bild 1). Über die hierzu durchgeführten Baumaßnahmen, die noch nicht abgeschlossen sind, wird nachfolgend berichtet.

Bereits Ende 2012 soll der neue Tunnel in Betrieb gehen. Die umfangreichen Erneuerungsarbeiten am Alten Tunnel werden voraussichtlich 2014 beginnen. Nach Abschluss aller Arbeiten werden ab 2016 beide Tunnelröhren nur noch eingeleisig betrieben.

2 Überblick zur Baumaßnahme Neubau Tunnel Bebenroth

Am 5. Januar 2010 wurde der Auftrag zum Bau des neuen Bebenroth-Tunnels an die ARGE Neuer Bebenroth-Tunnel erteilt. Der Baubeginn des neuen Bebenroth-Tunnels erfolgte im März 2010 mit folgendem Leistungsumfang für Tunnel und Erdbau:

■ Oberbodenabtrag	7.000 m ³
■ Bodenabtrag	65.000 m ³
■ Tunnelausbruch	76.000 m ³
■ Asphaltarbeiten für Zufahrten und Befestigungsmaßnahmen	13.000 m ²
■ Spritzbeton	18.600 m ³
■ Konstruktionsbeton	17.600 m ³
■ Gleisbauarbeiten	

Die Versorgung der Baustelle mit Beton erfolgte über eine mobile Mischanlage, die unmittelbar am Tunnelportal errichtet wurde.

3 Vortrieb und Sicherungsmaßnahmen mit Spritzbeton

Am 8. Juli 2010 erfolgte der Anschlag am Haupttunnel im Voreinschnitt Nord mit den Arbeiten im bergmännischen Vortrieb und den Sicherungsmaßnahmen mit Spritzbeton. In einer Feierstunde am 30. Juli 2010 wurde der Tunnelanschlag am Tunnel Bebenroth offiziell begangen.

Der Tunnelvortrieb erfolgte nach der „Neuen Österreichischen Tunnelbauweise“.

Für das verwendete Bereitstellungs-gemisch wurde ein spezieller Zement für Spritzbetonanwendungen mit alkalifreien Beschleunigern in Kombination mit Kalksteinmehl erfolgreich eingesetzt.



Foto: Jochen Schmidt / Deutsche Bahn AG

Bild 1: Alter und Neuer Bebenrothtunnel

Die Betonzusammensetzung der Spritzbetone (Bereitstellungsmische) für Gewölbe und Sohle sind in **Tafel 1** dargestellt. In **Tafel 2** sind die wesentlichen Zementparameter des verwendeten Spritzbetonzements CEM I 52,5 R-sb- enthalten.

Für den am Tunnel Bebenroth eingesetzten Spritzbeton wurde ein Beschleuniger verwendet. Mit dem leistungsfähigen Bereitstellungsmisch konnte im Bereich der Kalotte ein qualitativ hochwertiger Leistungsvortrieb ermöglicht werden. Die prognostizierte Vortriebsbauzeit

wurde innerhalb der Vorgaben des Auftraggebers zielsicher realisiert.

In Abhängigkeit von den geologischen Verhältnissen wurden in der Kalotte Abschlagslängen von 1 m bis 1,7 m realisiert. Im Bereich der Strosse/Sohle waren Anschlaglängen bis zu 3,4 m möglich. Die bewehrte Spritzbeton-Außenschale wurde in der Betondruckfestigkeitsklasse C25/30 in einer Dicke von 20 cm bis 35 cm ausgeführt.

Die Spritzbetonarbeiten am Tunnel Bebenroth konnten bereits im März 2011 abgeschlossen werden.

Tafel 1: Betonzusammensetzung des Bereitstellungsmischs für Spritzbeton

Kennwerte		Spritzbeton für Gewölbe	Spritzbeton für Sohle
Expositionsklassen		XC4, XF1, XA1	XC4, XF1, XA1
Konsistenzklasse		F5/6	F5
Betondruckfestigkeitsklasse		C25/30	C25/30
Zementart		CEM I 52,5 R-sb-	CEM I 52,5 R-sb-
Zementgehalt	kg/m ³	380	360
Wassergehalt	kg/m ³	190	180
w/z-Wert		0,5	0,5
Gesteinskörnung ges.	kg/m ³	1.608	1.632
	Sand 0/2 kg/m ³	714	725
	Kies 2/8 kg/m ³	894	907
Zusatzstoff Art		Kalksteinmehl	Kalksteinmehl
Gehalt	kg/m ³	20	40
Zusatzmittel Art		BV	BV
Gehalt	M.-% v.z	1	1

4 Konstruktionsbeton (Innenschalenbeton)

4.1 Betontechnologische Anforderungen

Für den Innenausbau des Tunnels Bebenroth war ein Beton C25/30 XC4, XF1, XA1 ausgeschrieben, der nach Anforderungen des Auftraggebers folgende Eigenschaften erfüllen sollte:

- ausreichend hohe Ausschalfestigkeiten (3 N/mm² bis 7 N/mm² nach 12 Stunden)
- dichter Beton mit Wassereindringtiefen < 30 mm entsprechend RL 853.1201
- gute Konsistenzhaltung im oberen Bereich F5 bei geringer Entmischungsneigung
- minimale Blutneigung des Betons
- geringe Wärmeentwicklung im Beton zur Minimierung der Rissneigung
- zufriedenstellende Oberflächenausbildung (Minimierung von Poren und Lunkern)

4.2 Betonkonzept

Bei der Entwicklung der Zusammensetzung für die Konstruktionsbetone

Tafel 2: Chemische und physikalische Kennwerte des CEM I 52,5 R-sb-

Kennwerte		Einheit	Mittelwert
Wasseranspruch		%	34,6
Druckfestigkeit nach	1d	N/mm ²	25,9
	2d	N/mm ²	36,4
	28d	N/mm ²	61,8
Erstarrungsbeginn		min	112
Spezifische Oberfläche nach Blaine		cm ² /g	5.090
Sulfatgehalt		%	2,7
Na ₂ O-Äquivalent		%	0,94
Chorid-Gehalt		%	0,02
Hydratationswärme	0-1d	J/g	217
	0-7d	J/g	355

wurde in Abstimmung mit dem Betonhersteller und der Bauleitung der Einsatz eines CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R-AZ vorgeschlagen. Die Verwendung dieses neuartigen Zements mit Anwendungszulassung, für den es bisher noch keine Referenzen im Tunnelbau gab, bedurfte der Zustimmung des Auftraggebers. Deshalb wurde bei der Vorbereitung der Erstellung der Betonzusammensetzungen mit dem CEM II/A-S 42,5 R zusätzlich eine von der Bahn AG akzeptierte Zementvariante einbezogen und ein betontechnologisches Konzept als Entscheidungsgrundlage erstellt.

4.2.1 Zementparameter CEM II/A-S 42,5 R und CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R-AZ

Auf der Basis dieser beiden Zemente wurden umfangreiche Untersuchungen und Prüfungen für ein erfolgreiches Betonkonzept durchgeführt. In den **Tafeln 3** und **4** sind die wesentlichen Kennwerte der Zemente enthalten.

Der Portlandkompositzement CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R-AZ, in dem die Zumahlstoffe Steinkohlenflugasche und Kalksteinmehl enthalten sind, besitzt seit dem 18.05.2009 eine „allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, die durch das Deutsche Institut für Bautechnik erteilt wurde. Der CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R-AZ darf abweichend von DIN 1045-2:2001-07 Tabelle F.3.2 zusätzlich in folgenden Expositionsklassen verwendet werden:

- XC3, XC4
- XD1 bis XD3
- XS1 bis XS3
- XF1 bis XF4
- XA1 bis XA3
- XM1 bis XM3

Die Herstellung des CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R-AZ erfolgt nach einem

speziellen Mahlverfahren mit einem kombinierten Prozess von Sichtung und Mahlung. Die hohe Leistungsfähigkeit des Zements wird im Wesentlichen dadurch erreicht, dass die feinen Bestandteile der Steinkohlenflugasche, die sich positiv auf das Verarbeitungsverhalten im Beton auswirken, im Sichtprozess abgetrennt und dem Fertiggut Zement zugeführt werden. Nur die groben Bestandteile der Steinkohlenflug-

asche werden in der Kugelmühle nachzerkleinert. In **Bild 2** ist der Herstellungsprozess des CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R-AZ schematisch dargestellt.

Um die Rissneigung infolge einer zu großen Temperaturdifferenz in der Betonkonstruktion (Betonoberfläche-Kern) zu minimieren bzw. auszuschließen, sollte für die Tunnelinnenschale ein Beton mit moderater

Tafel 3: Chemische und physikalische Kennwerte des CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R-AZ

Kennwerte	Einheit	Mittelwert
Wasseranspruch	%	29,7
Druckfestigkeit nach		
1d	N/mm ²	16,3
2d	N/mm ²	26,6
7d	N/mm ²	37,1
28d	N/mm ²	48,3
56d	N/mm ²	55,7
Erstarrungsbeginn	min	215
Spezifische Oberfläche nach Blaine	cm ² /g	4.540
Sulfatgehalt	%	2,9
Chorid-Gehalt	%	0,06
Hydratationswärme		
0-1d	J/g	178
0-7d	J/g	278

Tafel 4: Chemische und physikalische Kennwerte des CEM II/A-S 42,5 R

Kennwerte	Einheit	Mittelwert
Wasseranspruch	%	31,2
Druckfestigkeit nach		
1d	N/mm ²	20,7
2d	N/mm ²	33,1
7d	N/mm ²	47,3
28d	N/mm ²	58,1
56d	N/mm ²	64,3
Erstarrungsbeginn	min	180
Spezifische Oberfläche nach Blaine	cm ² /g	4.350
Sulfatgehalt	%	2,9
Chorid-Gehalt	%	0,06
Hydratationswärme		
0-1d	J/g	195
0-7d	J/g	310

Hydratationswärmeentwicklung eingesetzt werden. Durch den Einsatz des CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R-AZ sollte dieser betontechnologische Spagat mit der Realisierung einer ausreichenden Ausschalfestigkeit von 3 N/mm² bis 7 N/mm² nach 12 Stunden bei einer gleichzeitig niedrigen Hydratationswärmeentwicklung in der Betonkonstruktion optimal erreicht werden. Im Vergleich zum Einsatz eines CEM II/A-S 42,5 R konnten so zusätzlich die Überfestigkeiten im Beton begrenzt werden.

In den Bildern 3 und 4 sind die Ergebnisse der Entwicklung der Zementdruckfestigkeiten und die Hydratationswärmeentwicklung der beiden Zemente im Vergleich dargestellt.

4.2.2 Genehmigung des Betonkonzepts

Bereits zu Beginn des Jahres 2011 erfolgten umfangreiche Betonprüfungen für den Ausbau der Tunnelinnenschale, der Mitte des Jahres 2011 beginnen sollte. Grundsätzlich wurden mit beiden Zementen die formulierten Anforderungen, die in den technischen Ausschreibungsunterlagen beschrieben wurden, erfüllt. In Laborversuchen des Zementlieferanten wurde die Festigkeitsentwicklung der Betone von beiden Zementvarianten ermittelt (Bild 5).

- Variante 1:
310 kg/m³ CEM II/A-S 42,5 R mit
50 kg/m³ SFA
w/z = 0,50, AB16, F5
- Variante 2:
360 kg/m³ CEM II/B-M (V-LL)
32,5 R-AZ
w/z = 0,50, AB 16, F5

Die erforderlichen Ausschalfestigkeiten von 3 N/mm² bis 7 N/mm² nach 12 Stunden konnten mit beiden Zementvarianten sicher erfüllt werden.

Die Temperaturentwicklung wurde an 15 cm x 15 cm x 15 cm großen Prüfkörpern beobachtet, die in einer Styroporform erstellt worden waren.

Dabei wies der mit CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R-AZ hergestellte Beton jedoch einen deutlich flacheren Kurvenverlauf auf (Bild 6).

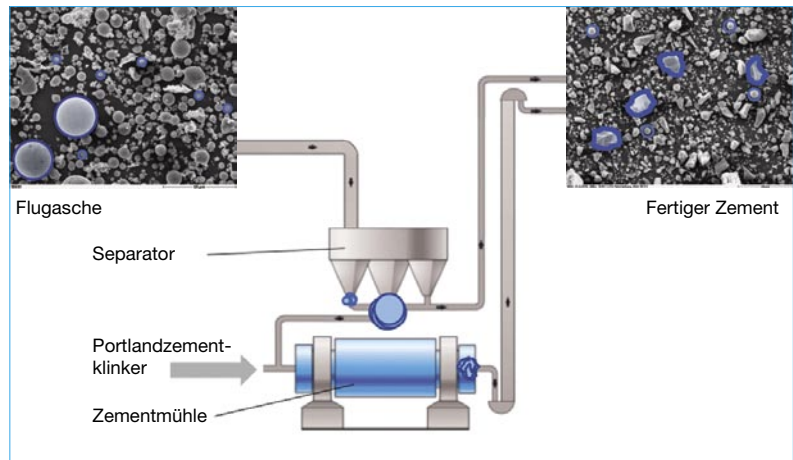


Bild 2: Schematische Darstellung des Herstellungsprozesses

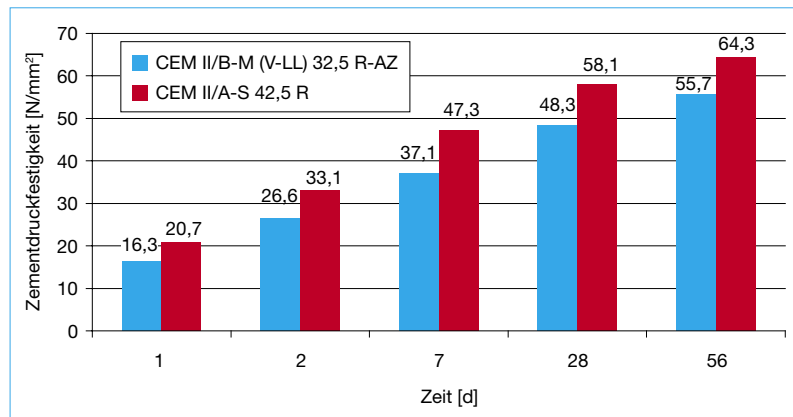


Bild 3: Druckfestigkeitsentwicklung der beiden Zemente

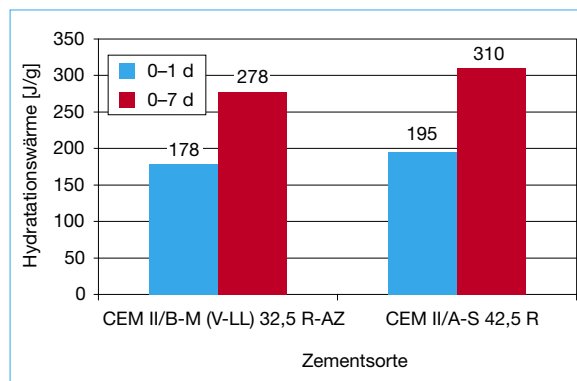


Bild 4: Hydratationswärmeentwicklung der beiden Zemente

Nach Abschluss der Voruntersuchungen und Erstprüfungen wurden dem Auftraggeber die Betonzusammensetzungen als Entscheidungsgrundlagen eingereicht. Zusätzlich zum vorliegenden Betonkonzept wurde die „Stellungnahme zum Einsatz eines CEM II/B-M-Zements bei dem Innenschalenbeton des Bebenrothtunnels“ eines externen Gutachters vorgelegt. In dieser Stellungnahme wurde der Einsatz von CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R-AZ auf der Grundlage der vorliegenden Ergebnisse als Vorzugvariante empfohlen. Vom Auftraggeber wurde daraufhin eine „Unternehmensinterne Genehmigung“ (UiG) für den Einsatz von

CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R-AZ für die Betone der Tunnelinnenschale erteilt.

Zusätzlich musste beim Eisenbahnbundesamt in Bonn ein Antrag zur „Zustimmung im Einzelfall (ZiE)“ für die Verwendung von CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R-AZ für die Innenschale des Neuen Bebenrothtunnels Strecke 3600“ gestellt werden. Nach Prüfung der eingereichten Unterlagen durch einen externen Gutachter wurde am 29. Juni 2011 der Bescheid zur „Zustimmung im Einzelfall“ (ZiE) durch das Eisenbahnbundesamt Bonn erteilt. Dies ermöglichte den Einsatz des genannten Zements.

4.3 Bauausführung der Tunnelinnenschale

Der Innenausbau am Tunnel Bebenroth begann am 5. Mai 2011 mit der Betonierung der Sohlplatte im Bereich Nord (Bild 7). Da zu diesem Zeitpunkt noch keine Zustimmung der Bahn AG zum Einsatz von CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R-AZ vorlag, wurde für die komplette Sohlplatte / das Sohlgewölbe ein CEM II/A-S 42,5 R verwendet (Tafel 5). Die eingebaute Betonmenge betrug 6.400 m³.

Im Juni/Juli 2011 wurden die Gewölbe in „Offener Bauweise“ im Bereich Nord und Süd ebenfalls unter Verwendung der Betonzusammensetzung mit CEM II/A-S 42,5 R und SFA erstellt.

Auf der Grundlage der erteilten ZiE konnte dann im August 2011 die Tunnelinnenschale (Gewölbe bergmännische Bauweise) komplett mit der Betonzusammensetzung unter Verwendung von CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R-AZ ausgeführt werden (Bild 8). Mit dem Schalwagen wurde dann täglich mit ca. 100 m³ Beton ein Gewölbeblock mit einer Blocklänge von 10 m erstellt. Hierbei waren in Abhängigkeit von den unterschiedlichen geologischen Verhältnissen Stahlbeton-Innenschalendicken von 35 cm bzw. 40 cm zu realisieren. Die Nachbehandlung des Betons erfolgte durch nachgeführte Nachbehandlungseinheiten für eine Dauer von drei Tagen.

Die im Betonkonzept beschriebenen Vorteile konnten durch den Einsatz des CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R-AZ auch unter praktischen Bedingungen umgesetzt und nachgewiesen werden: Der für die Innenschale (Gewölbe) verwendete Beton zeichnete sich durch ein gutes Verarbeitungsverhalten (Konsistenzhaltung, Zusam-

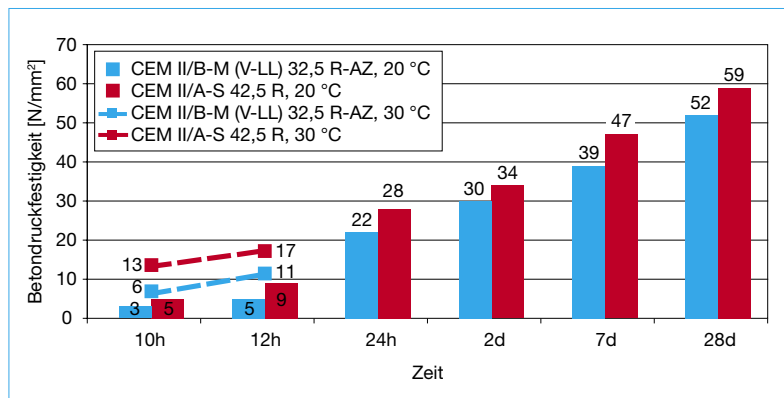


Bild 5: Druckfestigkeitsentwicklung der untersuchten Betone
 Variante 1: 310 kg/m³ CEM II/A-S 42,5 R mit 50 kg/m³ SFA, w/z = 0,50
 Variante 2: 360 kg/m³ CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R-AZ, w/z = 0,50

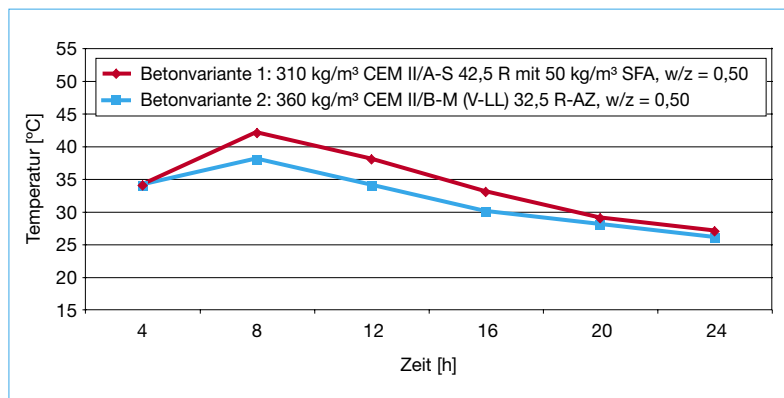


Bild 6: Zeitliche Temperaturentwicklung in Betonkörpern der untersuchten Betonvarianten

Tafel 5: Betonzusammensetzung der Konstruktionsbetone

Einsatzbereich		Innenschale für Gewölbe	Innenschale für Gewölbe	Innenschale für Sohle	Innenschale für Sohle
Expositionsklassen		XC4, XF1, XA1	XC4, XF1, XA1	XC4, XF1, XA1	XC4, XF1, XA1
Konsistenzklasse		F5/F6	F5/F6	F4/F5	F4/F5
Betondruckfestigkeitsklasse		C 25/30	C 25/30	C 25/30	C 25/30
Zementart		CEM II/A-S 42,5 R	CEM II/B-M(V-LL) 32,5 R-AZ	CEM II/A-S 42,5 R	CEM II/B-M(V-LL) 32,5 R-AZ
Zementgehalt	kg/m ³	310	360	300	360
Wassergehalt	kg/m ³	165	180	161	180
w/z-Wert		0,5	0,5	0,5	0,5
Gesteinskörnung ges.	kg/m ³	1.819	1.797	1.829	1.792
Sand 0/2	kg/m ³	810	800	814	798
Kies 2/8	kg/m ³	312	308	314	307
Kies 8/16	kg/m ³	697	689	701	687
Zusatzstoff Art		SFA		SFA	
Zusatzstoff Gehalt	kg/m ³	50		55	
Zusatzmittel Art		BV	BV	BV	BV
Zusatzmittel Gehalt	M.-% v.z	1	0,7	0,95	0,55

menhaltevermögen, geringe Entmischungsneigung und geringes Wasserabsondern) sowie ausreichend hohe Ausschalfestigkeiten aus, die mit > 3 N/mm² nach 12 Stunden sicher erfüllt wurden.

Die an verschiedenen Gewölbeblöcken durchgeführten Temperaturmes-

sungen bestätigten die Ergebnisse aus den Voruntersuchungen des Betonkonzepts. Bei vier durchgeführten Temperaturmessungen in Gewölbeblöcken wurden maximale Kerntemperaturen von 32 °C bis 35 °C und maximale Betontemperaturen an der Schalseite von 30 °C ermittelt. Bei ermittelten Umgebungstem-

peraturen im Tunnel von ca. 14 °C bestand somit aufgrund der geringen Temperaturdifferenz (Kern-Oberfläche) während des Ausschaltvorgangs keine Gefahr einer Rissbildung in der Betonkonstruktion.

Bild 9 zeigt eine Zusammenfassung der Prüfergebnisse der ermittelten



Bild 7: Betonierung der Sohlplatte



Bild 8: Vorbereitungsmaßnahmen zum Tunnelausbau

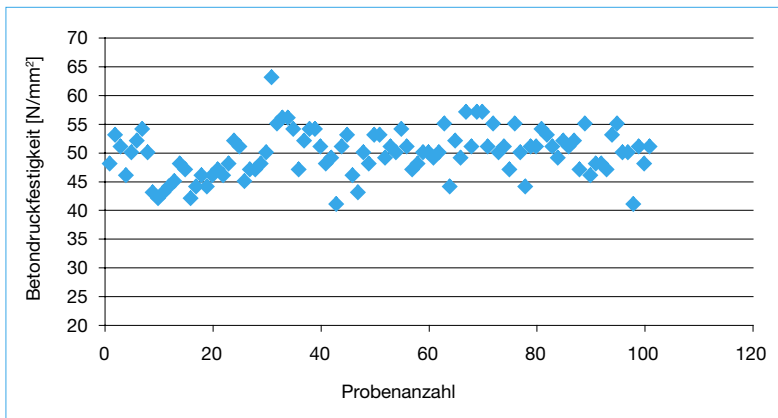


Bild 9: Auswertung der Betondruckfestigkeiten nach 28 d (Innenschale Gewölbe, C 25/30, AB 16, XC4, XF1, XA1)



Bild 10: Fertiggestellte Tunnelinnenschale

Bauschild

Bauherr	Deutsche Bahn AG / DB ProjektBau GmbH RB Nord, Hannover
Bauausführende Unternehmen	ARGE Neuer Bebenroth-Tunnel, bestehend aus Alpine BeMo Tunneling (Bauleitung), Innsbruck / Österreich, und Stutz GmbH, Kirchheim
Zementlieferant	Deuna Zement GmbH, Wiesbaden
Betonlieferant	M3 Mobil Beton GmbH, Ebersbach-Neugersdorf
externe Gutachter	Prof. Dr. Wolfgang Kusterle, 6173 Oberperfuss, Prof. Dr.-Ing. D. Mähner, Münster

Betondruckfestigkeiten nach 28 Tagen.

Die Fertigstellung der Tunnelinnenschale (Bild 10) mit dem letzten Gewölbeblock im Bereich der Haupt- röhre erfolgte am 11. November 2011. Insgesamt wurden für die Ge- wölbeinnenschale 11.200 m³ Beton eingebaut.

Mit dem Betonkonzept konnten somit die Erwartungen von Auftrag- geber und ARGE/Bauleitung hin- sichtlich der Oberflächeneigen- schaften des Innenschalenbetons voll erfüllt werden.

5 Zusammenfassung

Bei der Baumaßnahme wurde von den Baubeteiligten gemeinsam ein betontechnologisches Konzept er- stellt, um die in den Ausschreibun- gen formulierten hohen Qualitäts- anforderungen sicher zu erfüllen. Hierbei wurde mit dem CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R-AZ ein neuer Zement ins Gespräch gebracht, der einer Zu- stimmung durch den Auftraggeber bedurfte.

Über den Entscheidungsweg „Unter- nehmensinterne Genehmigung“ (UiG) des Auftraggebers und eine „Zustimmung im Einzelfall“ (ZiE) durch das Eisenbahn-Bundesamt Bonn konnte erstmalig in Deutsch- land eine Tunnelinnenschale mit einem CEM/II/B-M(V-LL) 32,5 R-AZ erfolgreich ausgeführt und fertige- stellt werden.

In diesem Zusammenhang sollte ins- besondere die sehr gute Zusammen- arbeit aller am Bau beteiligten Un- ternehmen lobend erwähnt werden. Damit wurde ein wichtiger Meilen- stein zur termingerechten Realisie- rung der qualitativ hochwertigen Innenschale geschaffen.