
M5 East Joint Venture, Sydney: Erfahrungen beim Einsatz und Prüfen von Stahlfaserspritzbeton

M5 EAST JOINT VENTURE, SYDNEY: EXPERIENCE GAINED FROM APPLICATION AND TESTING OF FIBRE - REINFORCED SHOTCRETE

STEFAN HANKE

Die M5 Motorway ist eine wichtige Transportader durch die südwestlichen Vororte von Sydney, Australien. Der erste Abschnitt der M5 Motorway wurde im Jahre 1985 erbaut und verläuft von Liverpool nach Hurstville, durch die südlichen Vororte von Sydney. Der neue Bauabschnitt, der M5 East Freeway, verbindet den bereits existierenden Abschnitt der M5 mit dem General Holmes Drive am Sydney's Kingsford Smith Flughafen.

Ein Hauptelement des neuen, ca. 10km langen Autobahnabschnittes ist der 3,8km lange, doppelröhrige M5 East Tunnel, der zur Zeit längste Straßentunnel Australiens. Die gesamten Baumassnahmen konnten im November 2001 erfolgreich abgeschlossen werden.

Die Tunnel sind größtenteils mit Teilschnittmaschinen aufgeföhren worden, wobei die Tunnelsicherung in einschaliger Bauweise, unter Verwendung von Stahlfaserspritzbeton und Dauerankern, ausgeföhrt wurde. Ein wesentliches Merkmal dieses Projekts war die vom Auftraggeber geforderte Gewährleistungsfrist von 100 Jahren auf die Hauptsicherungselemente. Dies erforderte einen hohen Aufwand im Bereich der Qualitätskontrolle während der gesamten Bauausföhren. Anhaltende Probleme bei der Prüfung der äquivalenten Biegezugfestigkeit des Stahlfaserspritzbetons unter Verwendung von Biegebalken, führten zur Anwendung einer in Australien neuen Testmethode.

The M5 Motorway is an important transport thoroughfare for the south-western suburbs of Sydney, Australia. The first stage of the M5 Motorway was constructed in 1985, and runs from Liverpool to Hurstville through the southern suburbs of Sydney. The new M5 East Freeway connects the existing M5 to the General Holmes Drive adjacent to Sydney's Kingsford Smith Airport.

The main element of the new, approx. 10km long motorway is the 3.8km twin two-lane M5 East Tunnel, currently the longest road tunnel in Australia.

The project was completed successfully in late 2001.

The tunnels were excavated mainly using roadheaders, the support system installed was based on steelfibre-reinforced shotcrete and permanent rockbolts.

A main specification by the client for this project was the 100year design life of the major support elements .

This specification required exceptional quality assurance measures during construction. Persistent problems in achieving post-crack load carrying specifications using beams during testing of steelfibre-reinforced shotcrete led to the adoption of a new test method in Australia.

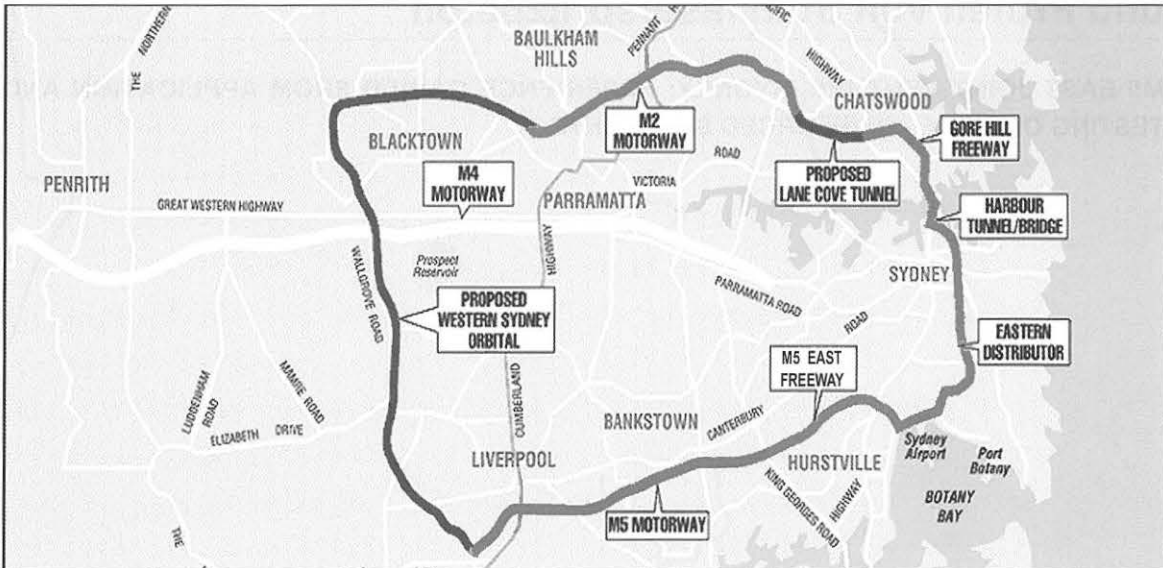


Bild 1: Ringstrassensystem der Region Sydney

1. Einleitung - M5 East Freeway

Das rapide Wachstum von Sydney, der Hauptstadt des australischen Bundesstaates New South Wales und das wirtschaftliche Zentrum des Kontinents, hat eine drastische Verbesserung der Verkehrsinfrastruktur notwendig gemacht. Die M5 Motorway ist eine wichtige Transportader durch die südwestlichen Stadtteile von Sydney. Der erste Abschnitt der M5 wurde im Jahre 1985 fertiggestellt und verläuft zwischen den südlichen Stadtteilen Liverpool und Hurstville. Der neue Bauabschnitt, der M5 East Freeway, mit einem Auftragsvolumen von zirka 490 Millionen Euro, verbindet den bereits existierenden Abschnitt der M5 mit dem General Holmes Drive, neben Sydneys internationalem Flughafen.

Im August 1998 wurde das M5 East JV von der RTA (Roads and Traffic Authority) mit der Planung, dem Bau, dem Betrieb und der Wartung über einen Zeitraum von 10 Jahren des neuen Streckenabschnittes beauftragt.

Im November 2001 konnte die M5 East nach einer Bauzeit von etwas mehr als 3 Jahren dem Verkehr übergeben werden.

2. Bauausführung - M5 East Freeway

Die gesamte Baumassnahme kann in drei Bereiche aufgeteilt werden:

- Der zirka 4 km lange Westabschnitt vom Ende der M5 an der King Georges Road zum Tunnel Portal an der Bexley Road.
- Der zirka 3,8 km lange Tunnelabschnitt zwischen den Portalen an der Bexley Road und der Marsh Street.
- Der Ostabschnitt vom Tunnelportal an der Marsh Street bis zum General Holmes Drive neben Sydneys internationalem Flughafen.

2.1 Westabschnitt - M5 East Freeway

Der 4 km lange obertägige Westabschnitt der M5 East beginnt am Ende der bestehenden M5, an der Kreuzung zur King Georges Road. Folgende Maßnahmen bzw. Bauwerke sind in diesem Abschnitt enthalten:

- Verbreiterung der bestehenden M5 auf 4 Spuren (1).
- Verschiebung einer der frequentiertesten Kreuzungen Sydneys an der King Georges Road (A).



Bild 2: Trassierung M5 East Freeway

- Neubau der Kreuzung zur King Georges Road mit Unterführung und Auf- bzw. Abfahrampen (A).
- Neubau der Unterführung der Cooloongatta Road (2).
- Neubau der Kreuzung zur Kingsgrove Road mit zwei Brücken und Auf- bzw. Abfahrampen (B).
- Verlegung und Verbreiterung des Hochwasserkanales Wollli Creek. Auslegung des Kanals auf ein 100 jähriges Hochwasser (4).
- Neubau von 4 Fußgänger- und Fahrradunterführungen (3, 5, 7, 8).
- Einbau von 1,4 Mio. m³ Tunnelausbruchmaterial im Bereich der Trasse.
- Mehr als 6000 m² Böschungsverbau, unter Verwendung des Systems der bewehrten Erde.

2.2 Ostabschnitt - M5 East Freeway

Der Abschnitt zwischen den Tunnelportalen an der Marsh Street und der Einleitung der M5 East Freeway in den General Holmes Drive, den Highway 1, beinhaltet folgende Bauwerke:

- Eve Street Viaduct. Mit einer Gesamtlänge von 300m überquert der Viadukt die Feucht- und Naturschutzgebiete an der Eve Street und der Marsh Street (15, 16).
- Querung des Flusses Cooks River. Das zirka 700m lange Tunnelbauwerk wurde in offener Bauweise hergestellt. Die direkte Nachbarschaft zu Sydney's internationalem Flughafen brachte besondere Erschwernisse mit sich. Die Baustelle musste z. B. darauf vorbereitet sein, dass im Falle eines Wechsels der Landebahn innerhalb von 20 Minuten alle Kräne und Spezialtiefbaugeräte im Bereich der Einflugschneise abzubauen sind (17).
- Herstellung eines 850m langen Viaduktbauwerkes zur Einleitung der M5 East Freeway in den General Holmes Drive (18, C).

2.3 Tunnelabschnitt - M5 East Freeway

Das wesentliche Element der M5 East Freeway ist der M5 East Tunnel. Mit einer Länge von 3,8 km ist er der zur Zeit längste Straßentunnel des australischen Kontinents. Die Haupttunnel bestehen aus zwei Röhren mit jeweils zwei Fahrspuren. Die Ausbruchquerschnitte variieren zwischen 49m² und 56m². Für Notfallsituationen sind im Abstand von 120m, begehbare Querschläge und auf halber Tunnellänge ein befahrbarer Querschlag angeordnet. Eine 400m lange Ausfahrtsrampe am Princes Highway und zwei 200 m und 100 m lange Ein- bzw. Ausfahrtsrampen an der Marsh Street münden am östlichen Ende in die Haupttunnel ein. Der Ausbruchquerschnitt im Bereich der Rampen variiert zwischen 50 m² und 80 m², die Tunnelspannweite

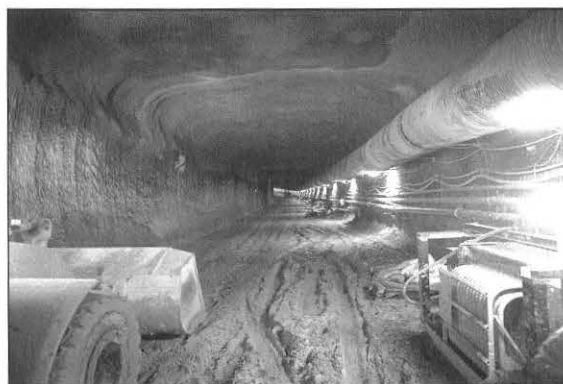


Bild 3: Westbound Tunnel - Regelquerschnitt

im Bereich der Einmündungen beträgt bis zu 20 m. Die Tunnellängsneigung im Bereich der Rampen beträgt maximal 8 %.

Die Frischluftversorgung erfolgt in der Tunnelmitte über einen 65m tiefen Lüftungsschacht mit einem Ausbruchsdurchmesser von 6,1m (13). Die Abluft wird über einen 700 m langen Tunnel und einen angeschlossenen Abluftschacht mit einem Durchmesser von 13,1 m und einer Tiefe von 40 m entsorgt (14).

3. Geologie - M5 East Tunnel

Die Tunneltrasse der M5 East unterquert drei Talsohlen, das Wollli Creek Tal, das Bardwell Creek Tal und das Arncliffe Tal. Die minimale Überdeckung über den Tunnelfirsten beträgt hier 13 m, die maximale Überdeckung 70 m.

Das im Trassenbereich vorherrschende Gestein ist der Hawkesberry Sandstein. Er besteht hauptsächlich aus massiven, horizontal gelagerten Sandsteinlagen. Die Druckfestigkeit (UCS) liegt im Bereich von 10 bis 70 MPa. Störungen in Form von tiefen alluvialen Rinnen mit Ablagerungen von Sand und Ton sind im Wollli Creek und Bardwell Creek Tal anzutreffen. Eine tiefe alluviale Rinne existiert im Bereich der Ausfahrtsrampe am Princes Highway.

4. Ausbruch und Sicherung - M5 East Tunnel

Die Auffahrung der Haupt- und Ventilationstunnel im Vollausbuch erfolgte mit bis zu fünf Teilschnittmaschinen. Die Querschläge, mit einem Querschnitt von 3,5 m x 3,5 m, wurden im Sprengvortrieb aufgeföhren. Die Schächte wurden gemeißelt bzw. gesprengt. Die Vortriebsleistungen in den Hauptvortrieben betragen je nach Gesteinhärte zwischen 4 m und 8 m am Tag.

Die sehr guten Gebirgseigenschaften machten es möglich, dass die Tunnel im Rechteckprofil, mit einer fast flachen Tunneldecke, aufgeföhren werden konnten. Für die Hartgesteinsvortriebe wurden drei

Sicherungsklassen (Bilder 4, 5 und 6) festgelegt. Die Details sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Forderung des Bauherrn war, die Hauptsicherungsmittel - vorgespannte Daueranker und stahlfaserbewehrter Spritzbeton - auf eine Lebensdauer von 100 Jahren auszulegen. Eine Ortbetoninnenschale war nicht vorgesehen.

Klasse	Details
Typ 1 Sehr gute Bedingungen	Sandstein mit Schluffsteinschichten kleiner 5mm; Rechteckprofil; stahlfaserbewehrter Spritzbeton 50 mm stark; CT Anker, l = 3 m ≅ 1,75 m x 2,00 m
Typ 2 Gute Bedingungen	Wechsellagerung zwischen Sandstein und Schluffstein; Rechteckprofil; stahlfaserbewehrter Spritzbeton 100mm stark; CT-Anker, l = 3 m ≅ 1,50 m x 1,50 m
Typ 3 Schlechte Bedingungen	Dykes und/oder Störungszonen im Sandstein; Hufeisenprofil; stahlfaserbewehrter Spritzbeton 250 mm stark; CT-Anker, l = 3 m ≅ 1,0 m x 1,0 m

Tab. 1: Typische Sicherungsklassen

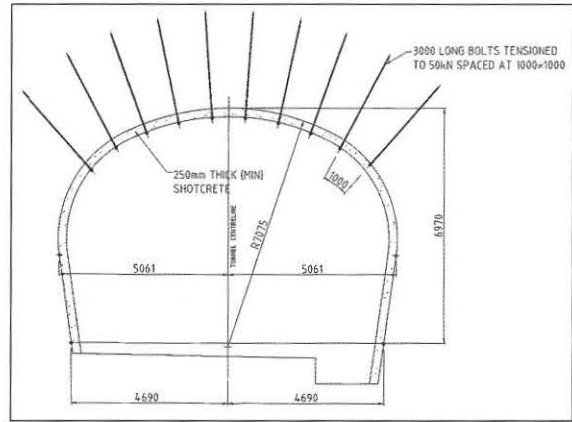


Bild 6: Hufeisenprofil - Sicherungsklasse 3

Der Korrosionsschutz der Daueranker wurde durch ein Hüllrohr aus Polyethylen und durch eine vollständige Ummantelung mit schwindarmen Zementmörtel mit Microsilicaanteil erreicht. Die Gebirgssicherung für Tunnelspannweiten bis zu 15 m bestand aus Stabankern mit einer Länge zwischen 3 m und 5,5 m und einer Vorspannung von 50 kN, für Spannweiten größer als 15 m wurden Litzanker derselben Bauart mit einer Länge bis zu 7 m und einer Vorspannung von 100 kN eingesetzt. Das Versetzen und Vorspannen der Stabanker erfolgte mit Hilfe automatischer Ankerbohrwägen.

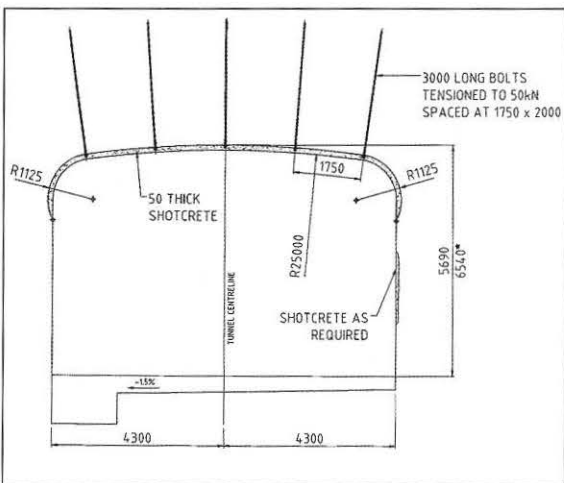


Bild 4: Rechteckprofil - Sicherungsklasse 1

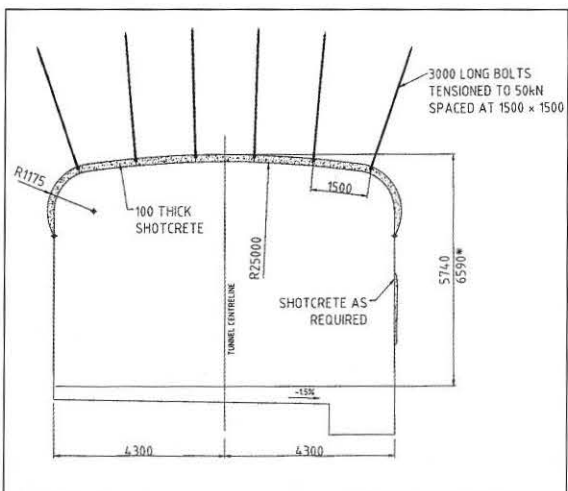


Bild 5: Rechteckprofil - Sicherungsklasse 2

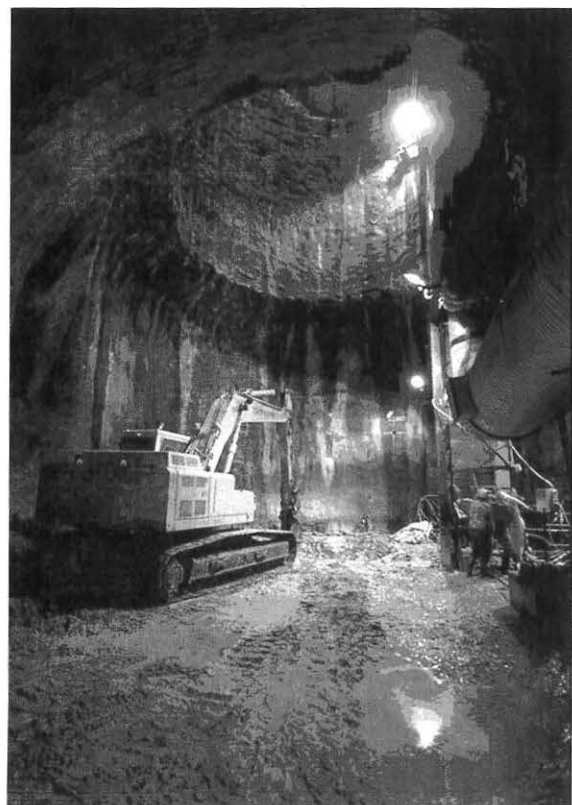


Bild 7: Verschneidung Abluftschacht mit Ablufttunnel

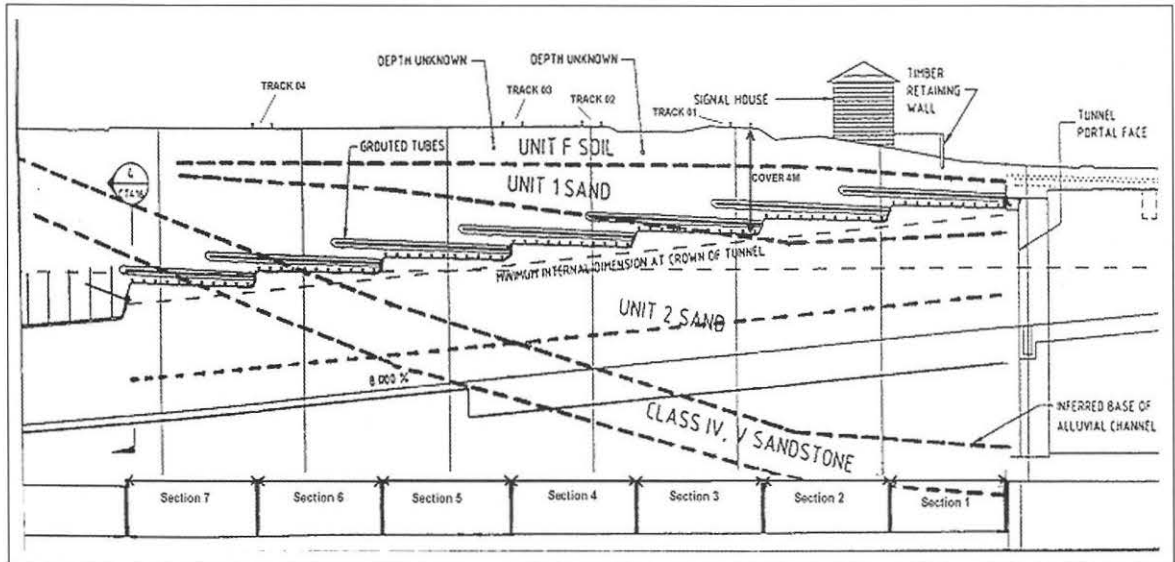


Bild 8: Längsschnitt durch Princes Highway Rampe

Die Spritzbetonrezeptur wurde nach eingehenden Prüfungen vor Baubeginn folgendermaßen festgelegt:

- 420 kg/m³ Zement,
- 60 kg/m³ Flugasche,
- 40 kg/m³ Microsilica
- 60 kg/m³ Stahlfasergehalt
- 0,38 Wasser-/Bindemittelwert
- 4 M.-% maximale Dosierung des alkalifreien Erstarungsbeschleunigers im Verhältnis zum Bindemittel.

4. Princes Highway Rampe - M5 East Tunnel

Die zirka ersten 70 m der Ausfahrtsrampe am Princes Highway sind durch sehr schwierige geologische und äußere Bedingungen gekennzeichnet. Der Tunnel mit einem Ausbruchsquerschnitt von mehr als 80 m² unterquert hier die viergleisige



Bild 9: Princes Highway - Anschlag der linken Ulme

Illawarra Eisenbahnlinie. Der minimale Abstand der Tunnelrinne zu den Gleisen beträgt nur ca. 4 bis 5 Meter, die minimale Überdeckung 2 m.

Der Tunnel wurde unter dem Schutz eines Rohrschirmes aufgeföhren. Insgesamt 7 Schirme mit jeweils 43 Rohren von je 15m Länge wurden versetzt. An jedem Rohr waren im Abstand von jeweils zwei Metern Verpressöffnungen angeordnet, durch die, mittels Doppelpacker, mehr als 200 Tonnen Mikrozementmörtel in den Baugrund gepresst wurden. Die Gebirgslösung erfolgte mit Tunnelbagger, wobei die zweigeteilte Kalotte zuerst über die gesamte Tunnellänge aufgeföhren wurde. Die Strosse bzw. die Sohle wurde nach Abschluss des Kalottenvortriebes nachgezogen. Die Sicherung des Ausbruchs bestand aus 40cm starkem, stahlfaserbewehrtem Spritzbeton mit zusätzlicher zweilagiger Mattenbewehrung. Die Stahlfasern wurden mit 60 kg pro m³ dosiert. Die Vortriebsarbeiten in diesem schwierigen, zirka 70 m langen, Tunnelabschnitt konnten ohne jegliche Zwischenfälle abgeschlossen werden.



Bild 10: Princes Highway - Spritzbetoninnenschale

Die nach dem Ringschluss gemessene Gesamtsetzung an der Geländeoberfläche betrug dabei weniger als drei Zentimeter.

Wegen der kurzen Länge und des sich verändernden Profils in diesem Tunnelabschnitt war es nicht sinnvoll, die Innenschale konventionell in Ortbeton herzustellen. Die Sohle der Innenschale wurde daher konventionell mit Ortbeton, das Gewölbe mit stahlfaserbewehrtem Spritzbeton und zusätzlicher, zweilagiger Mattenbewehrung hergestellt.

5. Qualitätsmanagement - M5 East Tunnel

Die vom Auftraggeber geforderte Gewährleistungsfrist von 100 Jahren für die Hauptsicherungselemente der M5 East Tunnel machte ein umfangreiches Qualitätsmanagementsystem notwendig. Ein besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Qualitätssicherung des Spritzbetons gelegt. *Tabelle 2* gibt einen Überblick über die Art und Häufigkeit der im Zuge der Baumaßnahme durchzuführenden Spritzbetonprüfungen.

Prüfung	Norm bzw. Richtlinie und Anforderungen	Häufigkeit der Prüfung
Zylinderdruckfestigkeit nach 28 Tagen an Zylindern	AS1012 Part 9 Min. 40 MPa	2 Zylinder pro 25 m ³
Zylinderdruckfestigkeit nach 28 Tagen an Bohrkernen	AS1012 Part 14 Min. 40 MPa	2 Bohrkern pro Tag
Haftung zwischen Fels und Spritzbeton gemessen nach 28 Tagen	EN1542 Min. 0,5 MPa oder Hammerversuch	Ein Bohrkern alle 250 m ² oder ein Hammerversuch alle 10 m ²
Biegezugfestigkeit nach 28 Tagen	EFNARC/C-1018 Min. 4,5 MPa	Set von 3 Biegebalken alle 250 m ²
Äquivalente Biegezugfestigkeit nach 28 Tagen	EFNARC/C-1018 Min. 3,0 MPa bei einer Verformung von 3 mm	Set von 3 Biegebalken alle 250 m ²
Stahlfasergehalt	Aussiebung 60 kg/m ³	Eine Prüfung jede 5. Lieferung
Spritzbetonstärke	Bohrkerne 50 mm/100 mm	Ein Kern alle 50 m ²
Wasserdurchlässigkeit	DIN1045 Part5 Max. 30 mm	Eine Prüfung alle 250 m ²

Tab. 2: Qualitätsmanagement für den stahlfaserbewehrten Spritzbeton

Anfänglich war die Qualität des vom Hersteller gelieferten Stahlfaserspritzbetons nicht zufriedenstellend. Der Beton war häufig mit Stahlfaserballen, Microsilicaklumpen, nicht aufgelösten Microsilica- oder Stahlfasersäcken, Restbetonbrocken und einigem mehr verunreinigt. Zudem wurde die Einhaltung des Wasser-/Bindemittelwertes sehr nachlässig gehandhabt. Durch Verfahrensänderungen bei der Betonherstellung wurden die Missstände schnell behoben und es wurde ein Produkt mit zufriedenstellender Qualität auf die Baustelle geliefert.

Der Prüfungsplan für den stahlfaserbewehrten Spritzbeton beinhaltete unter anderem die Ermittlung der Biegezugfestigkeit bzw. der äquivalenten



Bild 11: Nicht aufgelöster Microsilica Sack im Spritzbeton

Biegezugfestigkeit an Biegebalken. Die Abmessungen eines Prüfbalkens von 75 x 125 x 550 mm basierten auf der europäischen EFNARC Spezifikation, der Prüfvorgang wurde von der amerikanischen Norm ASTM C-1018 übernommen. Pro 250 m² gespritzte Fläche wurden Spritzkisten angefertigt, aus denen drei Prüfbalken geschnitten wurden. Zusätzlich wurden zwei Bohrkern zur Ermittlung der Betondruckfestigkeit gewonnen. Die Anforderungen an die Biegezugfestigkeit waren 4,5 MPa, an die äquivalente Biegezugfestigkeit 3,0 MPa (bei einer Verformung von 3 mm) und an die Druckfestigkeit 40 MPa.



Bild 12: Spritzbetonauftrag

Bereits zu Beginn der Tunnelarbeiten musste zur Kenntnis genommen werden, dass die minimalen Anforderungen an die äquivalente Biegezugfestigkeit häufig nicht zu erreichen waren. Die Ergebnisse der Prüfungen für die äquivalente Biegezugfestigkeit zeigten sehr große Schwankungen. Die schlechten Ergebnisse einzelner Balken drückten oft das Durchschnittsergebnis einer Prüferie von drei Balken unter den geforderten Wert von 3 MPa. Die statistische Auswertung ergab eine Varianz von 18,7 % innerhalb der Prüferie von je drei Balken, und eine

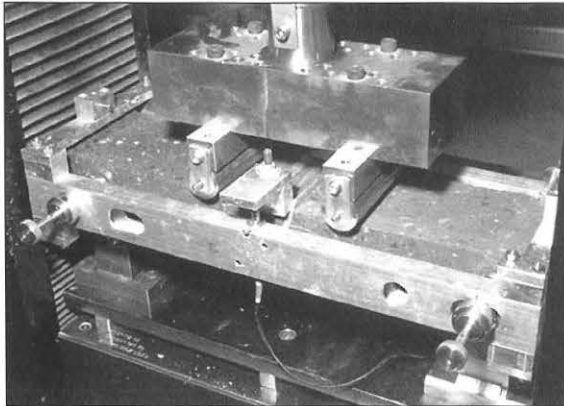


Bild 13: Test eines EFNARC Biegebalkens

Varianz von 19,5 % zwischen den Prüferien. Es lag zuerst die Vermutung nahe, dass die Gründe für das Nichterreichen der Anforderungen in der Herstellung und Verarbeitung des Spritzbetons oder in der Handhabung der Prüfkörper zu suchen seien. Die bei der Spritzbetonherstellung und bei der Verarbeitung getroffenen Verbesserungsmaßnahmen, wie zum Beispiel die Erhöhung des Stahlfasergehaltes von 60 kg/m³ auf 65kg/m³, brachten jedoch nicht den erhofften Erfolg. Folglich musste der eigentliche Versuch, der zur Ermittlung der äquivalenten Biegezugfestigkeit verwendet wurde, hinterfragt werden. Bei der Untersuchung der gerissenen Prüfkörper wurde beobachtet, dass die Lage des Biegezugrisses, zwischen den beiden Einleitungspunkten der Prüfkraft, in der Längsrichtung des Balkens veränderlich ist. Bei dem verwendeten Prüfaufbau bedeutete dies, dass der Öffnungswinkel eines in Balkenmitte gelegenen Biegezugrisses um ca. 50 % kleiner ist, als der Öffnungswinkel eines Risses der direkt unter dem Einleitungspunkt der Prüflast liegt. Diese Zusammenhänge sind in Bild 14 dargestellt. Je größer aber die Rissbreite ist, desto ungünstiger ist das Auszugsverhalten der meisten heutzutage verwendeten Stahlfasern.

Dies hatte J. Holgren in einer Studie im Jahr 1993 festgestellt und einen Korrekturansatz entwickelt. Grundlage dieses Ansatzes ist die Bestimmung der genauen Lage des Biegezugrisses im Verhältnis zur Balkenmitte. Mit Hilfe dieser Information wird die äquivalente Biegezugfestigkeit so rückgerechnet, als ob sich der Riss in Balkenmitte befinden würde. Die damit erhaltenen Ergebnisse für die korrigierte äquivalente Biegezugfestigkeit basieren somit alle auf einem konstanten Öffnungswinkel des Biegezugrisses. Die Anwendung des Verfahrens erhöhte die mittlere äquivalente Biegezugfestigkeit aller getesteten Balken um 0,3 MPa. Die mittlere Varianz sowohl innerhalb der Prüfsets als auch zwischen den Prüfsets reduzierte sich jedoch nicht. In der

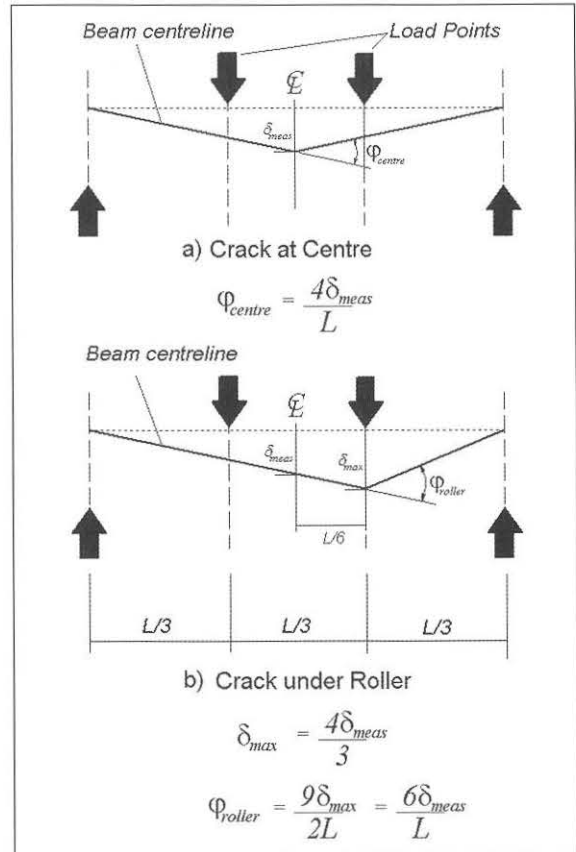


Bild 14: Vergrößerung des Öffnungswinkels durch Verschiebung der Lage des Risses von der Balkenmitte zum Eintragungspunkt der Prüflast

Praxis bedeutete dies, dass die Ergebnisse der Prüfungen der äquivalenten Biegezugfestigkeiten weiterhin sehr stark variierten. Ein Überblick der Ergebnisse ist in Tabelle 3 und 4 dargestellt.

Parameter	Varianz innerhalb des Prüfsets (%)	Varianz zwischen den Prüfsets (%)
Äquivalente Biegezugfestigkeit bei 0,5 mm Verformung	13,4	19,7
Äquivalente Biegezugfestigkeit bei 3,0 mm Verformung	18,7	19,5

Tab. 3: Varianz der äquivalenten Biegezugfestigkeit vor Anwendung der Holgren'schen Korrektur

Parameter	Varianz innerhalb des Prüfsets (%)	Varianz zwischen den Prüfsets (%)
Äquivalente Biegezugfestigkeit bei 0,5 mm Verformung	13,1	19,0
Äquivalente Biegezugfestigkeit bei 3,0 mm Verformung	17,8	18,9

Tab. 4: Varianz der äquivalenten Biegezugfestigkeit nach Anwendung der Holgren'schen Korrektur

Das Verfahren von Holgren war damit nicht geeignet die großen Schwankungsbreiten bei der Prüfung der äquivalenten Biegezugfestigkeiten zu reduzieren. Eine zuverlässige Bewertung der Stahlfaser-spritzbetongüte war weiterhin nicht möglich. Es musste nach anderen Lösungsansätzen gesucht werden. Als mögliche Alternative bot sich dabei der Round-Determinate-Panel Versuch an. Diese Prüf-methode wurde von Dr. S. Bernard, Senior Lecturer an der Universität von West Sydney, entwickelt. An-stelle eines Biegebalkens wird eine runde Stahlfaserbetonplatte mit einem Durchmesser von 800 mm und einer Dicke von 75 mm geprüft. Die Platte ist auf drei Punkten, die in einem Radius von 750 mm angeordnet sind, gelagert. Die Prüflast wird im Mittelpunkt der Platte aufgebracht. Gemessen wird sowohl die Bruchlast, als auch die Energieaufnahme der Betonplatte bei einer Verformung von 40 mm. Bei zuvor im Labor durchgeführten Versu-chen mit Round-Determinate-Panels lag die mittlere Varianz innerhalb der Prüfsatz von drei Platten bei 5 %. Nach Beratung mit dem Bauherrn und dem Planer wurde beschlossen, den Round-Determina-te-Panel unter Baustellenbedingungen zu testen. Das Ziel war, den Biegebalkenversuch als Bewer-tungsinstrument für die Güte des Stahlfaserspritz-betons abzulösen.

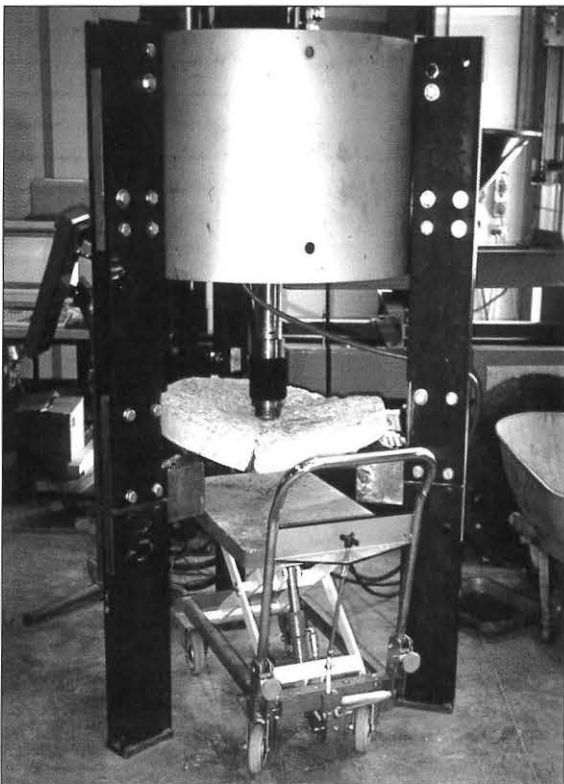


Bild 15: Test eines Round Determinate Panels

Da es für die geforderte äquivalente Biegezugfes-tigkeit von 3,0 MPa bislang keinen Vergleichswert

für die Energieaufnahme der Round-Determinate-Panels gab, musste zudem eine Korrelation zwis-chen beiden Testmethoden ermittelt werden. Zu diesem Zweck wurden über einen Zeitraum von 5 Monaten, Serien von jeweils drei Platten und drei Balken, weit mehr als 100 Prüfkörper, hergestellt. Die statistische Auswertung der auf der Baustelle durchgeführten Plattenversuche bestätigte die zuvor im Labor erhaltenen Ergebnisse. Die mittlere Vari-anz innerhalb der Prüfserien von drei Platten betrug nur 7,7 %, im Vergleich zu 17,8 % bei Verwendung von Biegebalken. Die mittlere Varianz zwischen den Prüferien blieb mit 15,8 % relativ hoch, was auf Unterschiede in der Qualität des Lieferbetons schließen ließ. Zur Ermittlung der Korrelation zwis-chen Biegebalkenversuch und Plattenversuch wur-den die Ergebnisse beider Versuchsanordnungen gegenübergestellt (Bilder 16 und 17).

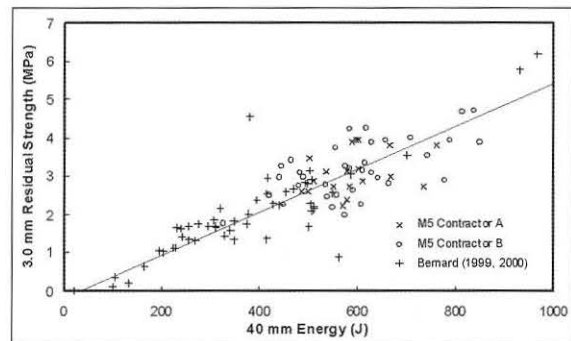


Bild 16: Korrelation zwischen äquivalenter Biege-zugfestigkeit bei 3 mm Verformung und Energieaufnahme bei 40 mm Verformung

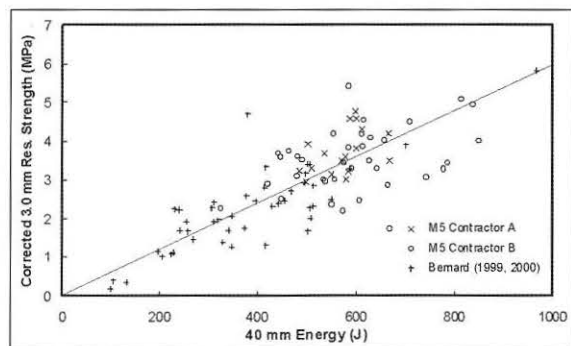


Bild 17: Korrelation zwischen Holgren korrigierter äquivalenter Biegezugfestigkeit bei 3 mm Verformung und Energieaufnahme bei 40 mm Verformung

Die Gegenüberstellung ergab einen Vergleichswert von 570 Joule des Round-Determinate-Panel Versu-ches, bei einer Verformung von 40 mm, zu 3,0 MPa des Biegebalkenversuches, bei einer Verformung von 3 mm. Bei Verwendung von Biegebalken, die zuvor mit dem Holgren Verfahren korrigiert wor-

den waren ergab sich eine Korrelation von 496 Joule zu 3,0 MPa.

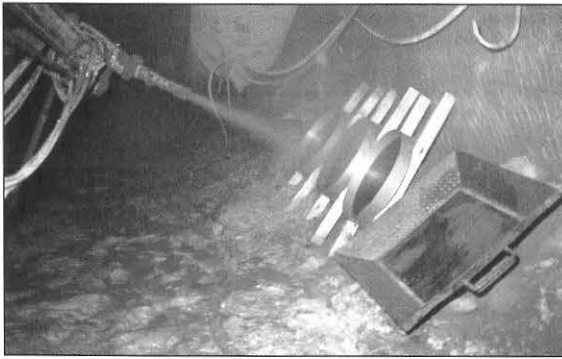


Bild 18: Herstellen von Round Determinate Panel

Nach Abstimmung zwischen allen am Bau verantwortlichen Parteien wurde entschieden, dass der Round-Determinate-Panel Versuch den Biegebalkenversuch, als Prüfmethode für die Bewertung der Qualität des Stahlfaserspritzbetons, ablösen sollte. Die zu erreichende minimale Energieaufnahme wurde auf 496 Joule festgelegt.

6. Schlussbemerkung - M5 East

Die M5 Motorway stellt einen Meilenstein in Sydneys Autobahnnetzwerk dar. Durch die produktive Zusammenarbeit von Bauherr, Planer, Forschung und bauausführenden Firmen war es möglich, dieses Projekt zur höchsten Zufriedenheit aller Partner abzuschliessen. In diesem Zusammenhang kann die Bereitschaft des Bauherrn, neue Entwicklungen zu unterstützen nicht genug gewürdigt werden.

7. Literatur

- [1] **Bernard, E.S.:**
Measurement of Post-cracking Performance in Fibre Reinforced Shotcrete. Australian Shotcrete Conference, Sydney, October 8-9 1998.
- [2] **Bernard, E.S.:**
Correlations in the Performance of Fibre Reinforced Shotcrete Beams and Panels. Civil Engineering Report CE9, School of Civic Engineering and Environment, UWS Nepean, June 1999.
- [3] **Bernard, E.S.:**
Correlations in the Performance of Fibre Reinforced Shotcrete Beams and Panels: Part 2. Civil Engineering Report CE15, School of Civic Engineering and Environment, UWS Nepean, June 2000.
- [4] **Holgren, J.:**
The Use of Yield-Line Theory in the Design of Steel Fibre Reinforced Concrete Slabs. Shotcrete for Underground Support VI, Proceedings of the Engineering Foundation Conference, Niagara-on-the-Lake, Canada, May 1998.
- [5] **Hanke, S.A.; Collis, A.; Bernard, E.S.:**
The M5 motorway tunnel: an education in Quality Assurance for fibre reinforced shotcrete. Proceedings of the International Conference on Engineering Developments in Shotcrete, Hobart, April 2001.