

Trenkwalder Anton Mobile Betonkonzepte GmbH

Rothenbacher Werner SCHWENK Zement GmbH

Neumann Thomas SCHWENK Zement GmbH

CO₂-Reduzierung bei Spritzbetonen mit erhöhter Sulfatbeständigkeit

Einleitung

Bei der Umsetzung von Infrastrukturprojekten spielt der Tunnelbau nach wie vor eine wichtige Rolle. Die unterirdische Straßen- und Schienenführung bringt einige Vorteile mit sich, die sich sowohl in der hochwertigen Nutzung wertvoller innerstädtischer Flächen als auch der Vermeidung von Rodungen und Eingriffen in die Natur widerspiegeln. Vor dem Hintergrund der aktuellen Diskussionen über die Klimaschädlichkeit von Beton stehen jedoch auch Tunnelprojekte vermehrt in der Kritik. Zuletzt wurde eine aktuelle Studie der Friedrich-Naumann-Stiftung in zahlreichen Zeitungen zitiert und auf die hohe CO₂-Belastung durch Infrastrukturprojekte, insbesondere Tunnelprojekte, hingewiesen. Durch neue Entwicklungen im Zement und Beton können die herstellbedingten CO₂-Emissionen allerdings zu einem großen Teil gesenkt werden. Während in der Vergangenheit üblicherweise CEM I-Zemente im Tunnelbau verwendet wurden, sollen nun zunehmend klinkerreduzierte und damit klimaschonendere Zemente zum Einsatz kommen. Am Beispiel des Großprojektes Stuttgart 21 wird im Folgenden der für das Projekt verwendete Hochofenzement CEM III/A 52,5 N-SR aus dem Schwenk Lieferwerk Karlstadt vorgestellt. Auf Basis der Gegenüber CEM I-Zementen werden mit diesem Zement die herstellbedingten CO₂-Emissionen bei gleicher Einsatzmenge um fast 50 % reduziert. Die Berechnungen basieren auf dem Vergleich der GWP Werte nach EN 16908 und typischen Spritzbetonrezepturen für Sulfatbeständige Spritzbetone. Gleichzeitig wird die Herstellung leistungsfähiger und hoch dauerhafter Betone möglich, die selbst unter den besonderen Grundwasser- und Bodenbedingungen im

Stuttgarter Talkessel die gutachterlichen Anforderungen für Lebensdauer von 100 Jahren und mehr erreichen.

Tab. 1 Ansatz zur Berechnung der CO₂ Emissionen

Spritzbetonmenge 690.000 m³ Beton entspricht 262.000 t Zement

- Üblicher Spritzzement CEM I 52,5 N (Deuna)
262.000 t * 0,839 t CO₂-Äq./t = 219.818 t CO₂
- CEM III/A 52,5 N-SR von SCHWENK Karlstadt
262.000 t * 0,325 t CO₂-Äq./t = 85.150 t CO₂

Grundlagen und Anforderungen

Die Hauptsächlichen Anforderungen an die verbauten Betone im Bereich des Stuttgarter Talkessels resultieren aus den betonangreifenden Bedingungen. Besonders die Sulfatgehalte im Gipskeuper in Kombination mit der kalklösenden Kohlensäure der vorhandenen Grundwässer führen nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2 zu einer Einordnung in die Expositionsklasse XA2 (mäßiger chemischer Angriff) und XA3 (starker chemischer Angriff). Die Anforderungen an die zu verwendenden Betone werden in mehreren Gutachten vom Ingenieurbüro Schiessl-Gehlen-Soidekat definiert. Laut Gutachten gelten diese Anforderungen sowohl für den Innenschalenbeton als auch für den verwendeten Spritzbeton. Die verschiedenen Anforderungen, die sich für die Betone im Stuttgarter Talkessels ergeben, sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tab. 2 Anforderungen an den Spritzbeton im Projekt Stuttgart 21-Teilbereich Stuttgarter Talkessel

Eigenschaft	Spritzbeton
Konsistenz	F5/F6; pumpfähig, entmischungsstabil
Verarbeitungszeit	≤ 180 min
Gesteinskörnung	Größtkorn 8 mm (geringer Carbonatgehalt)
Festigkeitsentwicklung	mit Beschleuniger: schnell mind. J2 nach österreichischer Spritzbetonrichtlinie
Festigkeitsklasse	C35/45
Dauerhaftigkeit	Hoher chemischer Widerstand gegenüber Sulfat und kalklösender Kohlensäure (XA2, XA3)
Eluation	geringes Versinterungspotenzial
Wirtschaftlichkeit	Geringer Beschleunigerbedarf, geringer Rückprall

Entwicklung des Spritzbetonzementes

Aufgrund der geforderten Dauerhaftigkeit konnte die Verwendung eines reinen Portlandzementes (CEM I) für den Spritzbeton ausgeschlossen werden. Nach Ansicht der Gutachter sollten Zemente mit hohem Hüttensandgehalt in Verbindung mit Flugasche als Zusatzstoff verwendet werden. Außerdem wird für die Betone ein reduzierter W/Z-Wert von $\leq 0,45$ bzw. $\leq 0,40$, je nach Angriffsgrad, empfohlen. Auf diese Weise ließe sich die Dauerhaftigkeit der Betone für 100 Jahre und mehr sicherstellen. Gerade Hochofenzemente des Typs CEM III/B mit einem Hüttensandgehalt von 66 bis 80 M.-% wären aus dieser Perspektive die beste Variante. Normativ werden Zemente mit einem Hüttensandgehalt von ≥ 66 M.-% grundsätzlich als „SR“ (sulfate resistant - hoher Sulfatwiderstand) eingestuft.

Nachteilig wirkt sich ein hoher Hüttensandgehalt jedoch auf die Festigkeitsentwicklung im frühen Alter entsprechender Betone aus. Gerade bei hüttensandreichen Hochofenzementen erfolgt eine sehr langsame Festigkeitsentwicklung. Diese Eigenschaft steht der Verwendung als Spritzbeton oder als Beton entgegen. Wie oben ausgeführt, müssen Spritzbetone ein sehr schnelles Erstarren und Betone für Tunnelinnenschalen eine schnelle Festigkeitsentwicklung gewährleisten. Die Herstellung von

Spritzbetonen mit einem langsam erhärtenden CEM III/B-Zement erscheint derzeit noch nicht sinnvoll.

Um möglichst alle o. g. Anforderungen erfüllen zu können, empfiehlt sich demnach ein moderater Hüttensandgehalt des Zementes. Ein hoher Sulfatwiderstand kann mit einem Hüttensandgehalt von mindestens 50 M.-% erreicht werden. Für eine hohe Frühfestigkeit oder auch einen hohen Widerstand gegenüber Frost- oder Frost-Tausalz-Angriff des hergestellten Betons sollte der Hüttensandanteil aber möglichst auf ein Minimum begrenzt werden. Für die weitere Zemententwicklung wurde der Hüttensandanteil bei 50 M.-% fixiert.

Eine hohe Leistungsfähigkeit von Hochofenzement und den daraus hergestellten Betonen setzt die getrennte Vermahlung der Hüttensand- und der Klinkerkomponente voraus. Für eine schnelle Festigkeitsentwicklung muss neben dem Klinker auch der Hüttensand in einer hohen Mahlfeinheit vorliegen. Die Abstufung der Kornverteilungen beider Komponenten stellt einen niedrigen Wasseranspruch des Zementes und damit eine leichte Verarbeitbarkeit des Betons sicher.

Neben der richtigen Zusammensetzung der Zementhauptbestandteile Hüttensandmehl und Klinker muss auch die Zusammensetzung des Erstarrungsreglers Calciumsulfat für die speziellen Anwendungen optimiert werden. Neben dem Gesamtgehalt an Calciumsulfat dominiert vor allem das Anhydrit/Gips-Verhältnis die Leistungsfähigkeit des Zementes in der jeweiligen Anwendung. Insbesondere für Spritzbetone wirkt sich ein langsamer Verbrauch des Calciumsulfates vorteilhaft auf die Festigkeitsentwicklung aus. Als Nebenbestandteil werden den Zementen häufig geringe Mengen an Kalksteinmehl zugegeben. Allerdings wird dadurch das Risiko einer schädigenden Thaumasitbildung unter den klimatischen Bedingungen des Tunnels bei Verwendung von weniger hüttensandreichen Zementen verstärkt. Die Zugabe carbonathaltiger Nebenbestandteile wurde folglich vom Auftraggeber untersagt.

Der so abgestimmte Hochofenzement führt zu einem sehr dichten Betongefüge. Ein hoher

Sulfatwiderstand des Zementes durfte aufgrund der Zusammensetzung zwar erwartet werden, musste aber im Rahmen einer Anwendungszulassung gesondert nachgewiesen werden. Bei dieser Prüfung wird ein direkter Vergleich zu einem Referenzzement auf Basis des Portlandzements CEM I SR 3 durchgeführt. Die geprüften Probekörper mit Hochofenzement zeichneten sich in diesem Vergleich durch sehr geringe Dehnungen aus und blieben deutlich unter dem für diese Prüfung relevanten Grenzwert. Nach dieser Zulassungsprüfung konnte der Zement mit der Bezeichnung CEM III/A 52,5 N-SR angemeldet und vermarktet werden.

Tab.3 Ergebnisse der Prüfung Sulfatwiderstand – Flachprismenverfahren gemäß EAD 150009-00-0301, Anhang B.

	Längenänderung in mm/m nach				
	14 Tage	28 Tage	56 Tage	90 Tage	180 Tage
CEM III/A 52,5 N-SR "Karlstadt" – 20 °C-Lagerung					
Na ₂ SO ₄ -Lösung	0,138	0,219	0,444	0,610	0,956
Ca(OH) ₂ -Lösung	0,015	0,021	0,056	0,098	0,142
ΔL	0,123	0,198	0,387	0,531	0,815
CEM III/A 52,5 N-SR "Karlstadt" – 5 °C-Lagerung					
Na ₂ SO ₄ -Lösung	-0,167	-0,092	-0,035	0,025	-
Ca(OH) ₂ -Lösung	-0,127	-0,140	-0,073	-0,117	-
ΔL	-0,040	0,048	0,038	0,142	-
CEM III/B 42,5 N-LH/SR – 20 °C-Lagerung					
Na ₂ SO ₄ -Lösung	0,025	0,021	0,115	0,146	0,265
Ca(OH) ₂ -Lösung	0,115	0,192	0,158	0,198	0,208
ΔL	-0,090	-0,171	-0,044	-0,52	0,056
CEM III/B 42,5 N-LH/SR – 5 °C-Lagerung					
Na ₂ SO ₄ -Lösung	-0,092	-0,129	-0,092	0,004	-
Ca(OH) ₂ -Lösung	-0,106	-0,085	-0,056	-0,042	-
ΔL	0,015	-0,044	-0,035	0,046	-
CEM I 42,5 R-SR3 – 20 °C-Lagerung					
Na ₂ SO ₄ -Lösung	0,131	0,0229	0,527	0,779	1,848
Ca(OH) ₂ -Lösung	-0,033	-0,065	-0,037	0,013	0,033
ΔL	0,165	0,294	0,565	0,767	1,815
CEM I 42,5 R-SR3 – 5 °C-Lagerung					
Na ₂ SO ₄ -Lösung	-0,040	0,029	0,156	0,388	-
Ca(OH) ₂ -Lösung	-0,121	-0,115	-0,129	-0,094	-
ΔL	0,081	0,144	0,285	0,481	-

Tab.4 Ergebnisse Dynamischer E-Modul der Mörtelfachprismen

	Dynamischer E-Modul in kN/mm ² nach:					
	0 Tage	14 Tage	28 Tage	56 Tage	90 Tage	180 Tage
CEM III/A 52,5 N-SR "Karlstadt" – 20 °C-Lagerung						
Ca(OH) ₂ -Lösung	41,39	43,57	45,58	48,10	49,14	50,57
Na ₂ SO ₄ -Lösung	39,72	42,97	45,16	47,13	48,23	48,19
CEM III/A 52,5 N-SR "Karlstadt" – 5 °C-Lagerung						
Ca(OH) ₂ -Lösung	40,66	40,75	40,87	41,61	41,37	-
Na ₂ SO ₄ -Lösung	40,37	42,03	41,99	43,04	42,74	-
CEM III/B 42,5 N-LH/SR – 20 °C-Lagerung						
Ca(OH) ₂ -Lösung	41,43	44,23	46,23	47,72	74,94	49,60
Na ₂ SO ₄ -Lösung	41,14	44,61	46,20	47,50	47,42	46,72
CEM III/B 42,5 N-LH/SR – 5 °C-Lagerung						
Ca(OH) ₂ -Lösung	40,57	41,26	40,77	41,72	41,63	-
Na ₂ SO ₄ -Lösung	40,16	42,10	41,59	42,11	42,49	-
CEM I 42,5 R-SR3 – 20 °C-Lagerung						
Ca(OH) ₂ -Lösung	42,39	44,10	45,11	46,09	47,31	48,23
Na ₂ SO ₄ -Lösung	42,44	45,38	47,26	48,68	48,91	48,36
CEM I 42,5 R-SR3 – 5 °C-Lagerung						
Ca(OH) ₂ -Lösung	42,35	43,77	43,59	45,00	44,58	-
Na ₂ SO ₄ -Lösung	42,78	45,07	45,58	46,78	45,84	-

Tab.5 Ergebnisse der Prüfung Masse der Mörtelfachprismen

	Masse in g nach					
	0 Tage	14 Tage	28 Tage	56 Tage	90 Tage	180 Tage
CEM III/A 52,5 N-SR "Karlstadt" – 20 °C-Lagerung						
Ca(OH) ₂ -Lösung	149,80	150,04	150,30	150,33	150,33	150,80
Na ₂ SO ₄ -Lösung	147,51	147,59	147,87	148,00	148,13	148,43
CEM III/A 52,5 N-SR "Karlstadt" – 5 °C-Lagerung						
Ca(OH) ₂ -Lösung	147,92	148,15	148,37	148,37	148,57	-
Na ₂ SO ₄ -Lösung	148,73	148,76	148,87	149,13	149,37	-
CEM III/B 42,5 N-LH/SR – 20 °C-Lagerung						
Ca(OH) ₂ -Lösung	149,46	149,47	149,57	149,83	149,97	150,23
Na ₂ SO ₄ -Lösung	151,27	151,65	151,90	152,17	152,50	153,27
CEM III/B 42,5 N-LH/SR – 5 °C-Lagerung						
Ca(OH) ₂ -Lösung	149,49	149,82	149,97	150,27	150,30	-
Na ₂ SO ₄ -Lösung	149,86	150,20	150,33	150,33	150,97	-
CEM I 42,5 R-SR3 – 20 °C-Lagerung						
Ca(OH) ₂ -Lösung	148,88	148,43	148,50	148,53	148,60	148,83
Na ₂ SO ₄ -Lösung	148,70	148,14	148,17	148,13	148,17	148,47
CEM I 42,5 R-SR3 – 5 °C-Lagerung						
Ca(OH) ₂ -Lösung	149,77	149,30	149,33	149,40	149,47	-
Na ₂ SO ₄ -Lösung	148,50	147,92	147,93	147,97	148,00	-

Entwicklung der Rezeptur

Die Eignung des Zementes im Spritzbeton wurde durch umfangreiche Vorversuche mit marktgängigen Beschleunigern nachgewiesen. Dabei wird neben dem Erstarrungsverhalten auch die frühe Festigkeitsentwicklung bewertet. Im Schwenk eigenen Spritzstand konnte die Eignung des Zementes unter baupraktischen Bedingungen verifiziert werden. Vorausgegangen waren betontechnologische Rezepturanpassungen. Dabei hat sich folgende Grundzusammensetzung als besonders leistungsfähig und robust bewährt:

- 380 kg/m³ Zement
- 40 kg/m³ Flugasche
- W/Z_{eq}-Wert 0,45 - 0,50
- PCE-Fließmittel
- Größtkorn 8 mm - Kies
- Ausbreitmaß F5 für ca. 180 Minuten

Ein Spritzstand besteht aus mehreren nebeneinanderstehenden Tunnelsegmentbögen. Auf diese Weise kann das Spritzen auch über Kopf simuliert werden. Zur Bestimmung der Festigkeitsentwicklung des beschleunigten Spritzbetons werden speziell für die Messungen hergestellte Kisten aus Holz mit Spritzbeton befüllt (Abb. 1). Die Festigkeitsentwicklung kann anschließend mittels Penetrationsnadel (Abb. 2) bzw. Ausziehversuch (Abb. 3) bis zu 24 h gemessen werden. Während die Penetrationsnadel den Prüfbereich von 0,2 bis 1 N/mm² abdeckt, wird für den Prüfbereich 2,5 bis 15 N/mm² das Ausziehverfahren angewendet. Dabei wird

die Ausziehkraft an einem zuvor in den erhärteten Spritzbeton mittels Bolzenschussgerät eingetriebenen Nagel gemessen und daraus über Korrelationswerte die Druckfestigkeit ermittelt.



Abb. 1 Herstellung der Spritzkisten am Versuchsstand (Bild Schwenk)



Abb. 2 Messverfahren mit Penetrationsnadel an den Spritzkisten (Bild Schwenk)



Abb. 3 Bolzenschussgerät für den Ausziehversuch (Bild Schwenk)

Der Festigkeitsverlauf nach 24 h (Prüfbereich ab ca. 15 N/mm²) lässt sich nur noch durch die

direkte Messung der Druckfestigkeit verfolgen. Dazu werden aus den Spritzkisten Bohrkern entnommen, planparallel geschliffen und zerstörend geprüft.

Die Versuche haben gezeigt, dass der CEM III/A 52,5 N-SR mit den üblichen Spritzbetonzementen CEM I 52,5 R in den Frisch- und Festbetoneigenschaften vergleichbar ist. Außerdem konnten Betonversuche unter 10 °C-Bedingungen die Eignung des Zementes als Innenschalenbeton belegen. In Abbildung 4 wird beispielhaft die Festigkeitsentwicklung des Spritzbetons, mit einer Beschleunigerzugabe von 6,5 M.-% bezogen auf den Zementgehalt, dargestellt. Das sind gute Werte im Hinblick auf die Rahmenbedingungen.

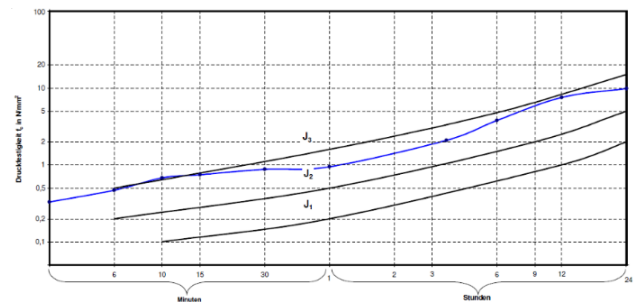


Abb. 4 Festigkeitsentwicklung eines Spritzbetons mit CEM III/A 52,5 N-SR und 6,5 M.-% Beschleuniger bezogen auf den Zementgehalt und 19 °C Frischbetontemperatur

Untersuchung der Dauerhaftigkeit

Parallel zu den oben genannten Zulassungsuntersuchungen wurden weitere Dauerhaftigkeitsuntersuchungen am Centrum für Baustoffe und Materialprüfung der TU München (cbm) durchgeführt. Den Ausschreibungsunterlagen und Gutachten konnten die Analysen verschiedener Stuttgarter Grundwässer entnommen werden. Für Langzeituntersuchungen wurde die ungünstigste Grundwasserzusammensetzung herausgegriffen und im Labor nachgestellt. Tabelle 4 zeigt die Zusammensetzung der Prüflösung. Anschließend wurden Probekörper mit verschiedenen Bindemittelkombinationen in dieser Lösung eingelagert und dem chemischen Einfluss über ein Jahr ausgesetzt. Die Besonderheit dieser Prüfung besteht im parallelen Einfluss von Sulfat und kalklösender Kohlensäure. Zur Aufrechterhaltung der Kohlendioxidkonzentration wurde während der gesamten Lagerungsdauer Kohlendioxidgas in die Lösung gepumpt. Als Probekörper wurden wie beim SVA-Verfahren für den

Sulfatwiderstand Zementstein-Flachprismen mit Messzapfen verwendet. Neben der Dehnung der Probekörper wurden diese nach Ende der Lagerung auf die Bildung des Schadminerals Thaumasyt untersucht. Bei diesen Versuchen hat sich gezeigt, dass der CEM III/A 52,5 N-SR im Vergleich zu anderen SR-Zementen den höchsten Widerstand gegen das angreifende Medium aufweist.

Tab. 6 Zusammensetzung der ungünstigsten Prüflösung

	Ca	Mg ²⁺	Na	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₂ (kalklösend)
Konzentration [mg/l]	481	100	1.962	3500	1.000	1.000	150

Seit der Markteinführung des CEM III/A 52,5 N-SR aus dem Schwenk Lieferwerk Karlstadt wird die Qualität des Zementes im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle zweimal wöchentlich im Zementlabor überwacht. Entsprechend der Zementnorm DIN EN 197-1 werden neben der chemischen Zusammensetzung und der Kornverteilung der Wasseranspruch, die Bindezeiten und die Festigkeiten geprüft. Für die Eignung des Zementes als Spritzbeton besitzen diese Prüfungen aber nur eine begrenzte Aussagekraft. Zur Sicherstellung der Leistungsfähigkeit des Spritzbetons über die gesamte Bauzeit wurde eine spezielle Qualitätsprüfung eingeführt. Dabei wird ein Zementleim mit einem Hochleistungsmischer hergestellt und mit einem Standardbeschleuniger versetzt. Unmittelbar im Anschluss erfolgt die Ermittlung des Erstarrungsbeginns. Konservendosen ähnlichen Behältnissen mit einem Liter Fassungsvermögen, bei denen der Zementleim zusammen mit dem Beschleuniger direkt in der Prüfkörper-Schalung angemischt wird, erlauben die Bestimmung der Frühfestigkeitsentwicklung bis zu 24 Stunden. Die Prüfkörper werden vor der Prüfung aus den Dosen geschnitten und planparallel geschliffen.

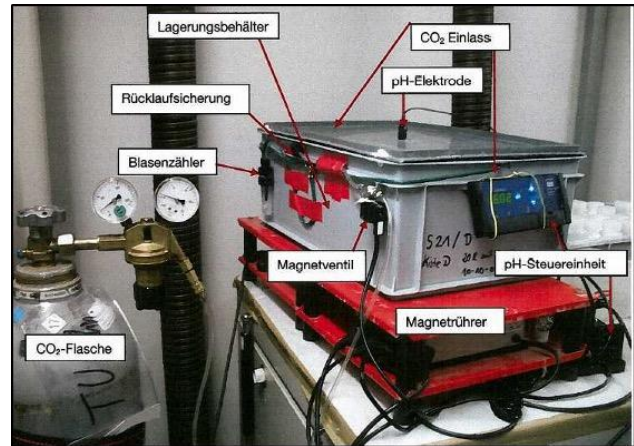


Abb. 5 Messstand Dauerhaftigkeit

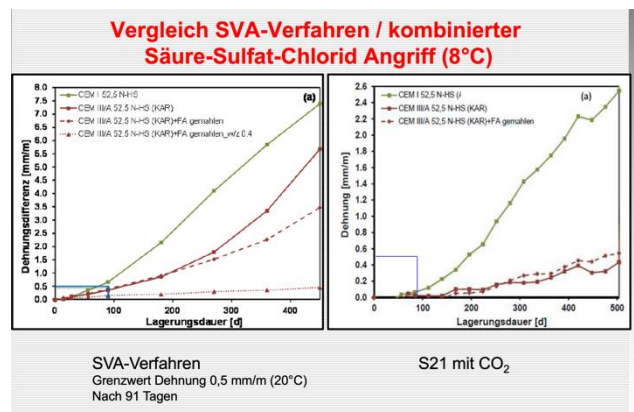


Abb. 6 Ergebnisse SVA-Verfahren/ „S21 Angriff“

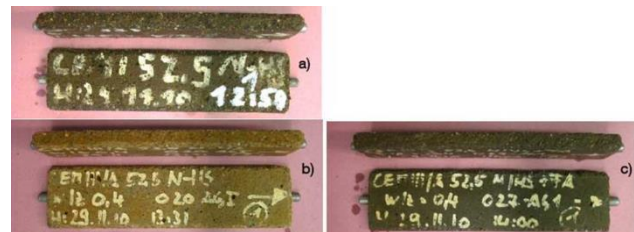


Abb. 7 Probekörper S21 mit CO2 nach Prüfung

**SCHWENK Untersuchungen zu Sulfat-/Säureangriff
(cbm München – Prof. Heinz)**

Lagerung	Ca(OH) ₂ (Referenz)	SVA	S 21 ohne CO ₂	S21 mit CO ₂
Lösungszusammensetzung	Ca(OH) ₂ Lösung	30g/l SO ₄ ²⁻	3,5g/l SO ₄ ²⁻ 1g/l Cl ⁻ 0,1g/l Mg ²⁺	3,5g/l SO ₄ ²⁻ 1g/l Cl ⁻ 0,1g/l Mg ²⁺ 1,0g/l CO ₂ 1,0g/l HCO ₃ ⁻
Lagerungstemperatur	8°C			
Lagerungsdauer	bis max. 720 Tage			
Prüfkriterium	Dehnungsdifferenz Δx < 0,5 mm/m nach 91 d Sulfatlagerung		Dehnung, Masse und optische Begutachtung der Flachprismen	

Abb.8 Zusammensetzung der Prüflösung

Praxisanwendung bei Stuttgart 21

Tab. 7 Zusammensetzung Spritzbeton C35/45

Material	Typ	Hersteller	kg/m ³
Zement	CEM III/A 52,5 N-SR	Schwenk Karlstadt	380
Flugasche	H7	Powerment Kraftwerk Heilbronn	40
Sand, Kies	0-8 mm	Holcim Oberrhein, Malsch	1670
Fließmittel	Sky 614	MBCC, Staßfurt	2,66
Wasser	Leitungswasser		178
Verzögerer	Pozzolith 436R	MBCC, Staßfurt	1,14

Der Auftrag für den Tunnelbereich von Stuttgart-Untertürkheim bis zum Stuttgarter Hauptbahnhof wurde an die Bietergemeinschaft ATCOST 21, ein Zusammenschluss der Firmen Porr, Hinteregger, Östu-Stettin, und Swietelsky unter der Federführung der Porr GmbH & Co. KG, erteilt. Für die Lieferung des Betons hat sich die ARGE für die Semper Beton entschieden, eine Tochtergesellschaft der Schwenk Zement GmbH & Co. KG. Überzeugend für die ARGE war das Konzept, dass Zement und Beton aus einer Hand kommen, die angebotenen Systeme bereits gutachterlich geprüft waren und den Anforderungen des Bauherrn entsprochen haben.

Bis Ende 2023 wurden im Talkessel Stuttgart 1.600.000 Kubikmeter Beton mit dem CEM III/A 52,5 N-SR aus dem Schwenk Zementwerk Karlstadt produziert.

Als Anwendungsbeispiel wird in diesem Bericht das Los 1B Tunnel nach Ober- und Untertürkheim vorgestellt. Es handelt sich um zwei etwa 6 km lange Röhren, die zum größten Teil mittels der „Neuen Österreichischen Tunnelbauweise (NÖT)“ aufgeföhren und über einen Zwischenangriff versorgt werden. Der Zwischenangriff ist als 37 m tiefer Senkrechtschacht mit 22 m Durchmesser und einem 110 m langen Zugangstunnel zu den eigentlichen Tunnelröhren ausgeführt. Der Beton wird auf einer mobilen Anlage direkt am Schacht produziert. Die Förderung des Betons durch den Schacht erfolgt durch

Fallrohre. Dieses Vorgehen setzt einen robusten, entmischungsstabilen Beton voraus.



Abb. 8 Luftaufnahme Baustelleneinrichtung Ulmer Straße mit Mischanlage (Bild: Arnim Kilgus)

Spritzbeton

Der Spritzbeton ist in der Festigkeitsklasse C35/45 und den Expositionsklassen XC4, XA3 mit dem Größtkorn der Gesteinskörnung von 8 mm in Konsistenzklasse F5 mit einer Verarbeitungsdauer von 3 Stunden konzipiert.

Der Spritzbeton wurde am Projekt Stuttgart 21 von 2013 an bis 2023 produziert und erwies sich als äußerst konstant, robust und zuverlässig. Der verwendete Erstarrungsbeschleuniger wurde in umfangreichen Vorversuchen ermittelt. Der Verbrauch bewegte sich stets in einem Bereich der in der Erstprüfung festgestellten Dosiermengen. Das System hat sich, auch im Hinblick auf die Wasserzutritte in den Vortrieben, als sehr wirtschaftlich erwiesen. Die aufgrund der klinkerarmen Rezeptur notwendigen Mindestfrischbetontemperaturen von $\geq 22^{\circ}\text{C}$ konnten mit der vorhandenen Anlagentechnik in der mobilen Mischanlage problemlos erreicht werden.

Die Rezeptur weist aufgrund des niedrigen Portlandzementklinkeranteils zudem ein sehr geringes Versinterungspotenzial auf und verringert dadurch den Instandhaltungsaufwand des Entwässerungssystems. Die im Eigeninteresse durchgeführten Prüfungen des reduzierten Versinterungspotentials ergaben Werte von 0,3-0,5 ausgelagte Menge Calcium je Tonne Spritzbeton.



Abb. 9 Betonübergabe am Zugangsschacht Ulmer Straße in den Fahrnischer (Bild: Arnim Kilgus)

Die typische Frühfestigkeitsentwicklung des eingesetzten Spritzbetonsystems zeigt sich in Abbildung 8.

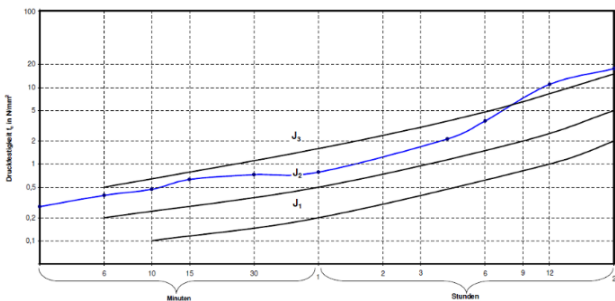


Abb. 10 Festigkeitsentwicklung Spritzbeton bei 7 M.-% Beschleunigerzugabe Alucom Gecedral F100A auf der Baustelle (Frischbetontemperatur 25 °C)

Durchschnitt	51,61	[N/mm ²]
Standardabweichung	2,48	
min	48,5	[N/mm ²]
max	65,5	[N/mm ²]
Anzahl Prüfungen	254	
Sorte	SPC 35/45 XA3 GK8 F5	

Abb. 11 Auswertung der Druckfestigkeiten SPC gespritzt



Abb. 12 Tunnelanschlag am Zwischenangriff Ulmer Straße (Bild: Arnim Kilgus)

Fazit

Der von Schwenk entwickelte CEM III/A 52,5 N-SR Zement ermöglicht die wirtschaftliche Herstellung von Spritzbetonen und Tunnelinnenschalenbetonen mit hoher Dauerhaftigkeit. Selbst unter den besonderen Bedingungen des Stuttgarter Talkessels werden damit Tunnelbauwerke mit einer Bemessungsliebendauer von über 100 Jahren ermöglicht. Der geringe Klinkeranteil des Zementes reduziert darüber hinaus die herstellbedingten CO₂-Emissionen. Im Vergleich zu vorhergehenden Tunnelprojekten können rund 160.000 t CO₂ und damit über 45% der zementbezogenen CO₂-Emissionen vermieden werden.

Somit hat Schwenk mit der Entwicklung des CEM III/A 52,5 N-SR neue Maßstäbe im Bereich der Dauerhaftigkeit und Nachhaltigkeit im Tunnelbau gesetzt.