
ÜBERTRAGBARKEIT VON PRÜFRESULTATEN BEI SPRITZBETON

TRANSFERABILITY OF TEST RESULTS FOR SPRAYED CONCRETE

Roland **Weiss**, VersuchsStollen Hagerbach AG, Flums Hochwiese, Schweiz
Erich **Lassnig**, VersuchsStollen Hagerbach AG, Flums Hochwiese, Schweiz

In einem Forschungsprojekt wurde im Jahr 2019 die Übertragbarkeit der Druckfestigkeit und des Fasergehaltes von Prüfkörpern aus separat hergestellten Spritzkisten auf Prüfkörper aus dem Objekt untersucht.

Dafür wurden Spritzbetone ohne, sowie mit Stahl- und Polymerfasern unter gleichbleibenden Bedingungen am Objekt und in Spritzkisten mit Seitenlängen 100 cm, 80 cm und 50 cm appliziert.

Die Versuche zeigen, dass auch mit Prüfkörpern aus Spritzkisten mit Seitenlängen kleiner als 100 cm und Spritzbetonapplikation mit Spritzroboter repräsentative Werte für die Druckfestigkeit und den Fasergehalt des Spritzbetons am Objekt erreicht werden können.

In a research project in 2019 the transferability of the compressive strength and the fibre content of test specimens from sprayed test panels to test specimens from insitu sprayed concrete was investigated.

For this purpose, shotcretes with and without steel and polymer fibres were applied under constant conditions to the object and in test panels with side lengths of 1000 mm, 800 mm and 500 mm.

The tests show that representative values for the compressive strength and the fibre content of the shotcrete can also be achieved at the object with test specimens from test panels with side lengths less than 1000 mm and shotcrete application with a spraying robot.

1. Einleitung

Spritzbetonarbeiten für den Untertagbau werden in der Schweiz in der SIA 198 [1] und der SN EN 14487-1 [2] geregelt. Die Prüfung des Spritzbetons kann nach diesen beiden Normen an Prüfkörpern vom Spritzbeton aus dem Objekt oder an Prüfkörpern aus separat hergestellten Spritzkisten durchgeführt werden. Die SIA 198 fordert die Bewertung der Druckfestigkeit des Spritzbetons nach SN EN 13791 [3], d.h. mit einer 15% tieferen charakteristischen Mindestfestigkeit $f_{ck, is}$.

Im Rahmen der Ausführung werden in der Schweiz normalerweise Proben aus Spritzkisten für den Nachweis entnommen, die in vertikaler Position bis zu einer Höhe von 1,5 m ab Boden hergestellt werden. Dem Baustellenhandling geschuldet sind diese Spritzkisten oft kleiner als nach SN EN 14488-1 [4] gefordert.

In Ausnahmefällen werden Proben direkt aus dem Objekt gefordert bzw. entnommen. Beide Verfahren haben entsprechende Vor- und Nachteile wie z.B.

Bohrkernentnahme aus dem Objekt:

- Effektive Eigenschaften vom Objekt mit Herstellung und Nachbehandlung, je nach Zeitpunkt der Entnahme der Prüfkörper (+)
- Partielle Schwächung Objekt/Bauteil durch Bohrkernentnahme (-)
- Aufwändigere Probenahme vor Ort (-)
- Prüfkörperlänge oft grösser als Schichtstärke am Objekt (vorgängig geplante Spritzkissen nötig) (-)

Bohrkernentnahme aus Spritzkisten:

- Keine Schwächung Objekt/Bauteil durch Bohrkernentnahme (+)
- Einfachere Probenahme (+)
- Eigenschaften vom Objekt nur näherungsweise (-)
- Planung der Spritzkistenherstellung und Handling der Spritzkisten (-)

Systematische Vergleiche zwischen der Druckfestigkeit, ermittelt an Prüfkörpern aus separat hergestellten Spritzkisten und Prüfkörpern aus Spritzbeton aus dem Objekt fehlen. Für die Bewertung bzw. die Bewertungsmethode in der Schweiz, sind solche Erkenntnisse relevant, insbesondere in Bezug auf die Abminderung der charakteristischen Mindestdruckfestigkeit $f_{ck, is}$.

2. Spritzbetonversuche

In einem vom schweizerischen Bundesamt für Strassen (ASTRA) geförderten Forschungsprojekt wurden im Jahr 2019 im VersuchsStollen Hagerbach Spritzbetone mit Stahlfasern, Polymerfasern und Spritzbeton ohne Fasern am Objekt appliziert und in Spritzkisten unterschiedlicher Abmessungen gespritzt [5].

In diesen Versuchen wurden die Grundmischungen unter gleichbleibenden Parameterkombinationen Düsenabstand, Düsenwinkel zur Spritzfläche, Förderleistung Beton und Luft, Luftdruck und Erstarrungsbeschleunigerdosierung appliziert. Die Grundmischungen wurden durch EFNARC zertifizierte Düsenführer gespritzt.

Die folgenden Applikationsorte des Spritzbetons wurden berücksichtigt:

- Objekt Wand (Wand)
- Objekt Überkopf im First (First)
- Spritzkiste 50x50x50 cm, gerade Seiten (Spritzkiste 50)
- Spritzkiste 80x80x80 cm, gerade Seiten (Spritzkiste 80)
- Spritzkiste 100x100x100 cm, gerade Seiten (Spritzkiste 100)

In zwei Versuchsphasen wurden unterschiedliche Grundmischungen verarbeitet.

Tab. 1: Zusammensetzung der Grundmischungen Phase 1

Grundmischung	CEM II/A-LL 42,5 N [kg/m ³]	Fasergehalt [kg/m ³]	VZ/FM [%-CEM]	Ausbreitmass [mm]	w/z [-]
GM1	425		1,0	590	0,45
GM2	425		0,4	550	0,51
GM3	450	32 ¹⁾	1,0	590	0,43
GM4	425	5 ²⁾	1,1	550	0,42
GM5	425		0,9	500	0,43

¹⁾Stahlfasern; ²⁾Polymerfasern

Tab. 2: Zusammensetzung der Grundmischungen Phase 2

Grundmischung	CEM II/A-D 52,5 R [kg/m ³]	Fasergehalt [kg/m ³]	VZ/FM [%-CEM]	Ausbreitmass [mm]	w/z [-]
GM6	450 ³⁾	32 ¹⁾	0,8	500	0,42
GM6.1	450	32 ¹⁾	0,8	450	0,43
GM7	425	5 ²⁾	0,8	470	0,48
GM7.1	425	5 ²⁾	0,8	490	0,49
GM8	425		0,8	490	0,46

¹⁾Stahlfasern; ²⁾Polymerfasern, ³⁾CEM II/A-LL

Die Gesteinskörnungen nach SN EN 12620 stammten aus der Region Sarganserland. Dabei handelt es sich um ein Gemisch aus Gneisen, Quarz, harten Sandsteinen, Kieselkalken und Kalken.

Zur Steuerung der Frischbetoneigenschaften wurde ein kombiniertes Zusatzmittel Verzögerer/Fliessmittel nach SN EN 934-2 auf der Basis von Polycarboxylatether verwendet.

Die verwendeten Stahlfasern nach SN EN 14889-1 waren wie folgt charakterisiert (Herstellerangaben):

- Geklebte Fasern aus blankem Draht mit gekröpften Enden
- Draht Durchmesser 0,55 mm, Nennlänge 35 mm
- Zugfestigkeit 1345 N/mm²
- E-Modul 20000 N/mm²

Die verwendeten Polymerfasern nach SN EN 14889-2 waren wie folgt charakterisiert (Herstellerangaben):

- Polymer-Typ: Polyolefine
- Gerade, flache monofile Faser
- Dichte 0.91 kg/dm³
- Durchmesser 0,85 mm ± 50%, Länge 50 mm ± 10%
- Zugfestigkeit R_m 490 N/mm² ± 15%
- E-Modul (Sekante) 4000 N/mm² ± 15%
- E-Modul (Young) ≥ 4700 N/mm²

Die Grundmischungen wurden mit Frischwasser nach SN EN 1008 im Nassverfahren hergestellt.

Bei der Düse wurde ein flüssiger, alkalifreier Erstarrungsbeschleuniger für Spritzbeton (BE) zugegeben.

In der Phase 1 erfolgte die Applikation mit einem Normet Spraymec 8100 VC Spritzbetongerät, in der Phase 2 mit einem Putzmeister PM 500 Spritzbetongerät.

Die Geräteparameter wie Luftförderleistung, Förderleistung und BE-Mittel Dosierung wurden vor Versuchsbeginn voreingestellt. Die Grundmischungen wurden mit einer Beton-Pumpleistung von 6 m³/h und einer BE-Mittel Dosierung von 6% bezogen auf den Zementgehalt appliziert.

Das folgende Prüfprogramm wurde ausgeführt:

- Würfeldruckfestigkeit Grundmischung (150x150 mm) SN EN 12390-3
- Frühfestigkeit des Spritzbetons (Spritzkiste 80) SN EN 14488-2
- Bohrkerndruckfestigkeit (50x50 mm) SN EN 12504-1
- Wasserleitfähigkeit (50x50 mm) SIA 262/1, Anhang A
- Fasergehalte SN EN 14488-7, Verfahren A, B
- Energieabsorption (600x600 mm) SN EN 14488-5

Tab. 3: Prüfkörperentnahmeorte und Prüfmethode

	Bohrkerndruckfestigkeit	Energieabsorption	Fasergehalt	Wasserleitfähigkeit
Wand	X		X	X
First	X		X	X
Spritzkiste 50	X		X	X
Spritzkiste 80	X	X	X	X
Spritzkiste 100	X	X	X	X

Die gefüllten Spritzbetonkisten wurden mit einer Plastikfolie bis zur Entnahme der Prüfkörper geschützt.

Die Prüfkörper für die Druckfestigkeit nach 28 Tagen wurden im Alter von 2 Tagen aus den Spritzkisten bzw. dem Objekt entnommen, vorbereitet und bis zur Prüfung nach 28 Tagen konditioniert gelagert. In Übereinstimmung mit der SN EN 14488-1 Ziffer 5.7 wurden keine Prüfkörper aus dem Randbereich (=Dicke der Prüfplatte) der Spritzkisten gewonnen. In der Phase 1 wurden die Prüfkörper in der Wasserlagerung und zum Vergleich in einer Feuchtraumlagerung gemäss SN EN 12390, nationaler Anhang der Schweiz ($20 \pm 2^\circ\text{C}$, Luftfeuchte $\geq 95\%$), gelagert. In Phase 2 erfolgte die Lagerung nur im Wasserbad.

3. Resultate

3.1 Druckfestigkeit

Die folgenden Aussagen beziehen sich auf Prüfkörper, welche in einem frühen Zeitpunkt (zwei Tage nach Applikation) gewonnen und anschliessend bis zur Prüfung konditioniert gelagert wurden.

Die Druckfestigkeiten der Prüfkörper aus dem Firstbereich erreichten in den Versuchen rund 80 bis 100% der Druckfestigkeiten der Prüfkörper aus dem Wandbereich.

Die Prüfkörper aus den Spritzkisten 80 und 100 ergaben Druckfestigkeiten von 85 bis 100% der Druckfestigkeit von Prüfkörpern aus dem Wandbereich.

Die Prüfkörper aus den Spritzkisten 50 ergaben Druckfestigkeiten mit einer erhöhten Bandbreite zwischen 80 und 110% der Druckfestigkeiten von Prüfkörpern aus dem Wandbereich.

Tab. 4: Mittlere Druckfestigkeiten nach 28 Tagen normiert auf die Prüfserie aus der Wand

Probenahmeort	Wasserlagerung	Feuchtraumlagerung
Phase 1		
Wand	100%	100%
First	82 bis 100%	85 bis 101%
Spritzkiste 50	79 bis 109	91 bis 105
Spritzkiste 80	92 bis 101%	96 bis 102%
Spritzkiste 100	92 bis 94%	95 bis 100%
Phase 2		
Wand	100%	
First	88 bis 103%	
Spritzkiste 50	87 bis 95%	
Spritzkiste 80	85 bis 99%	
Spritzkiste 100	85 bis 98 %	

Die Mittelwerte der Standardabweichungen innerhalb einer Prüfserie der Druckfestigkeit (Wasserlagerung) lagen bei den verschiedenen Probenahmeorten zwischen 1,8 und 2,6 N/mm². Die Serien mit den Prüfkörpern aus der Wand ergaben die grösste Bandbreite der Standardabweichungen.

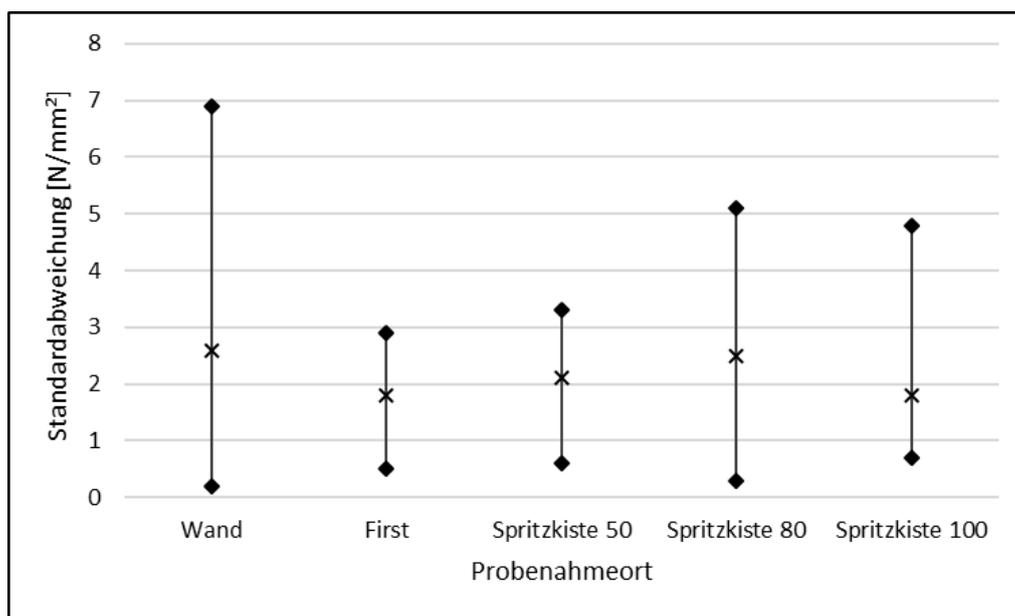


Bild 1: Standardabweichungen Prüfserien 28-Tage Druckfestigkeiten aus Wasserlagerung

Tendenziell lagen die Druckfestigkeiten der Prüfkörper aus der Wasserlagerung über den Druckfestigkeiten der Prüfkörper aus der Feuchtraumlagerung. Mit Sicherheit können die Druckfestigkeiten aus den beiden Lagerungsarten jedoch nicht unterschieden werden (siehe Bild 2). Die Unterschiede waren geringer als die doppelte Standardabweichung innerhalb einer Serie.

Die Unterschiede bei den Druckfestigkeiten an Prüfkörpern aus den Spritzkisten 50 der beiden Lagerungsarten waren jedoch tendenziell grösser.

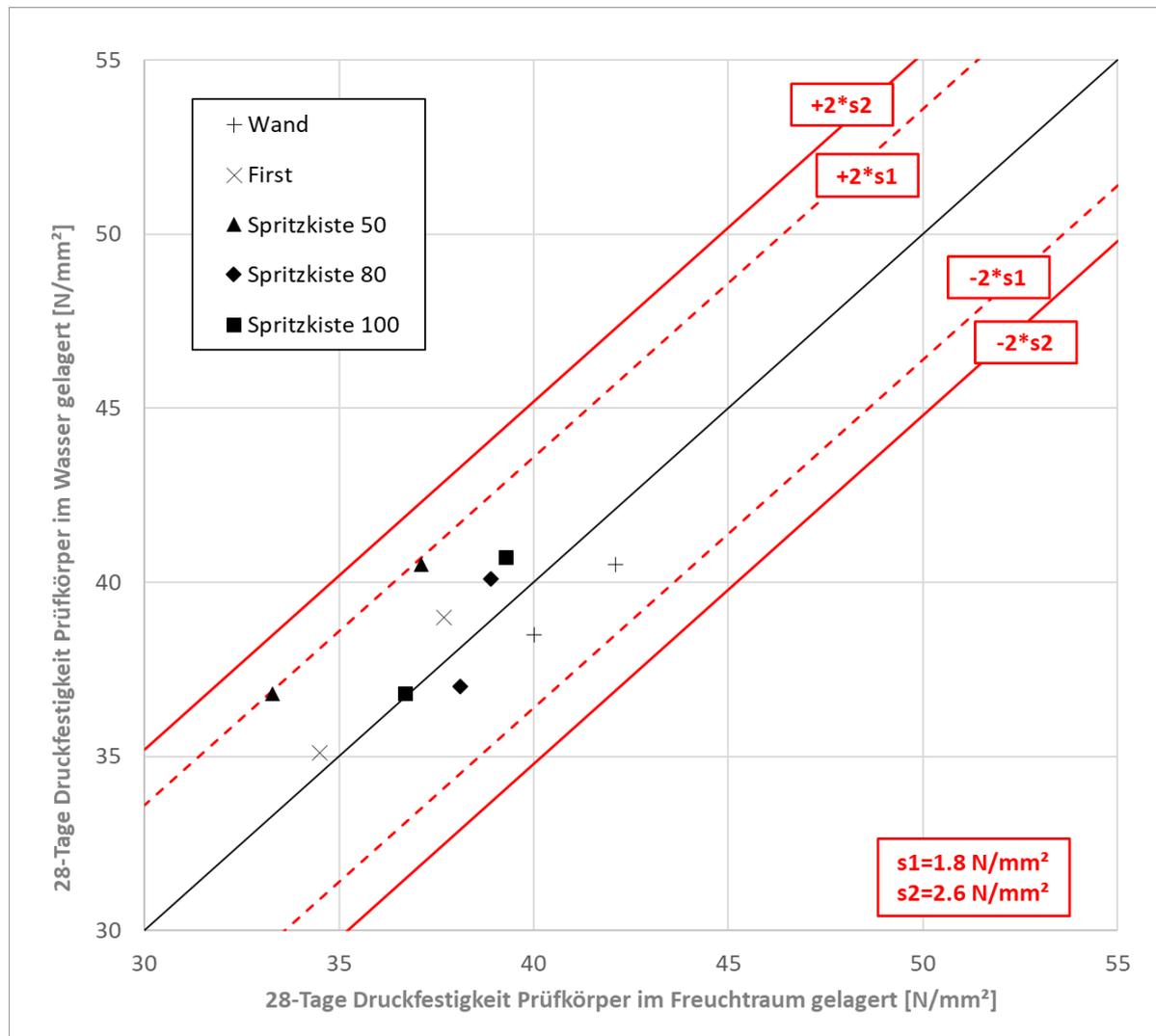


Bild 2: Vergleich Feuchtraumlagerung zu Wasserlagerung

Bis auf einzelne Werte konnten die 28-Tage Druckfestigkeiten von Prüfkörpern aus der Wand nicht mit Sicherheit von den 28-Tage Druckfestigkeiten von Prüfkörpern aus den Spritzkisten unterschieden werden (siehe Bild 3).

Bei denjenigen Werten mit Unterschieden lagen die 28-Tage Druckfestigkeiten der Prüfkörper aus den Spritzkisten immer tiefer als die 28-Tage Druckfestigkeiten der Prüfkörper aus der Wand.

Bei höheren Festigkeiten waren grössere Abweichungen erkennbar.

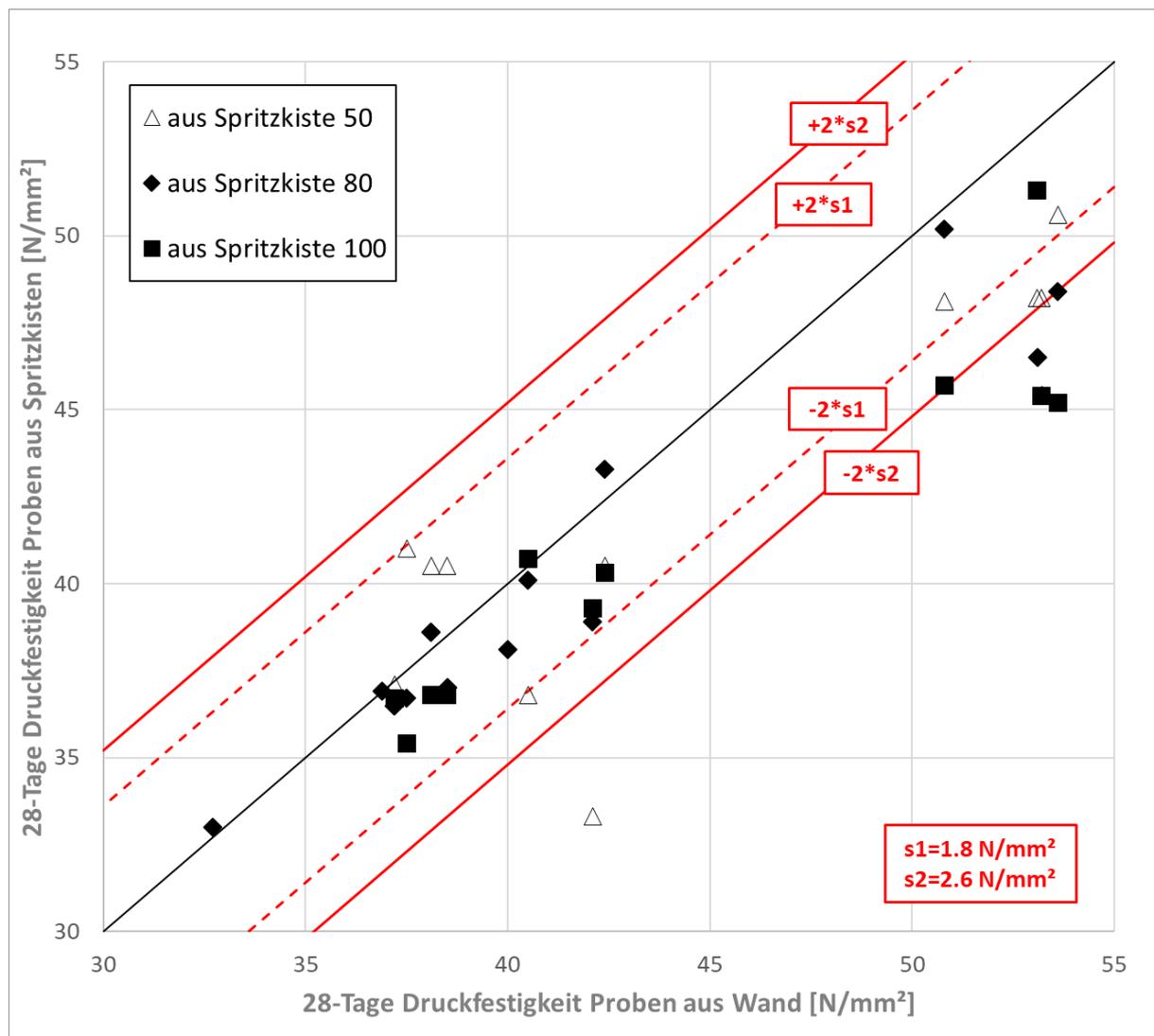


Bild 3: Vergleich der Druckfestigkeiten von Prüfkörpern aus der Wand mit den Druckfestigkeiten von Prüfkörpern aus Spritzkisten

Die 28-Tage Druckfestigkeiten der Prüfkörper aus den Spritzkisten 80 konnten nicht mit Sicherheit von den 28-Tage Druckfestigkeiten der Prüfkörper aus den Spritzkisten 100 unterscheiden werden (siehe Bild 4).

Bei den 28-Tage Druckfestigkeiten der Prüfkörper aus den Spritzkisten 50 traten bei rund einem Drittel Werte auf, welche sich von den 28-Tage Druckfestigkeiten der Prüfkörper aus den Spritzkiste 100 unterscheiden liessen.

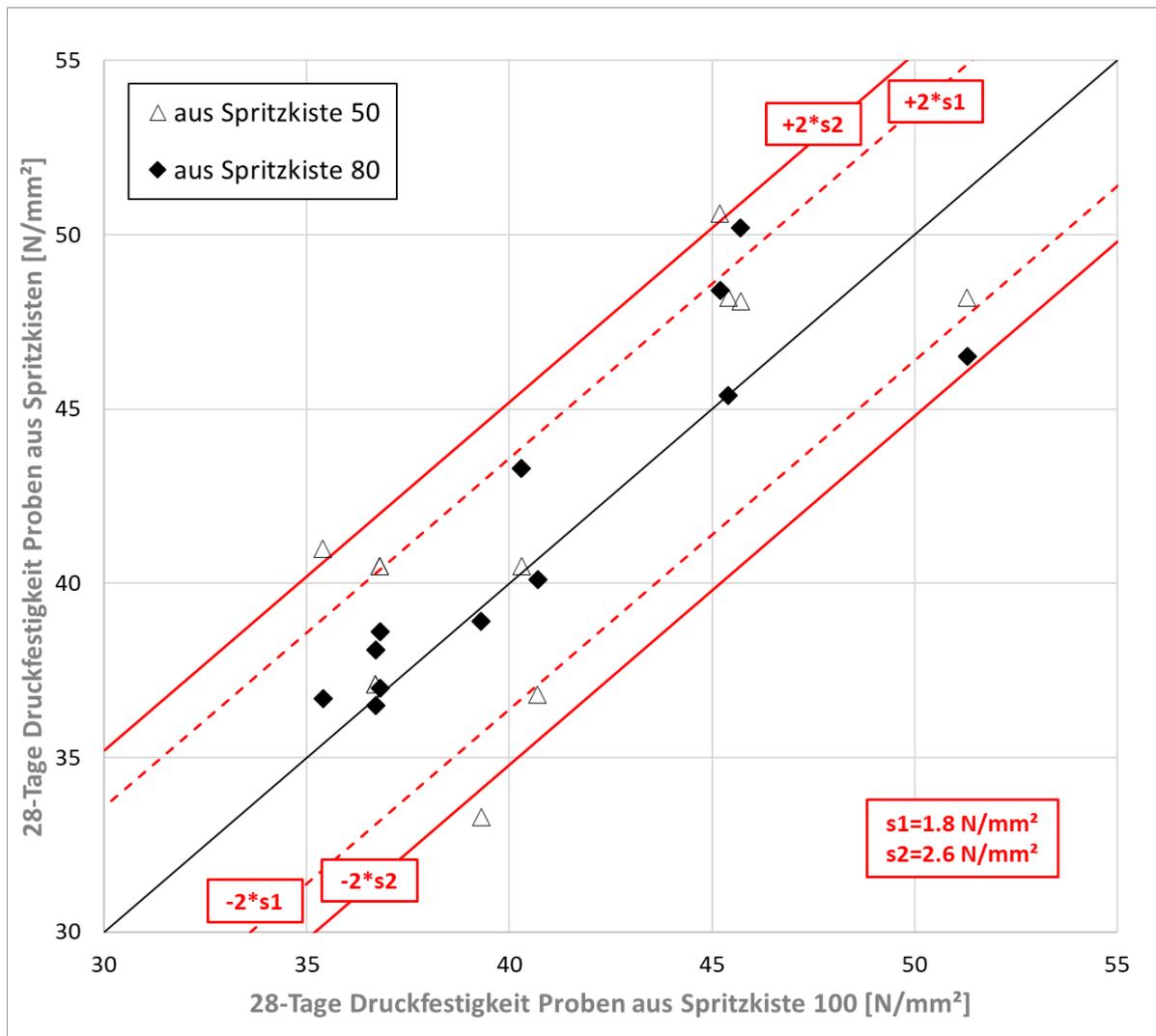


Bild 4: Vergleich der Druckfestigkeiten von Prüfkörpern aus Spritzkisten 100 mit den Druckfestigkeiten von Prüfkörpern aus Spritzkisten 50 bzw. 80

3.2 Wasserleitfähigkeiten gemäss SIA 262/1

Bei zwei von drei Spritzbetonen sind die Wasserleitfähigkeiten bestimmt an Prüfkörpern aus den Spritzkisten 50 höher als die Wasserleitfähigkeiten bestimmt an Prüfkörpern aus den restlichen Entnahmeorten.

Die Wasserleitfähigkeiten bestimmt an Prüfkörpern aus den Spritzkisten 80 und 100 liegen in der Bandbreite zwischen 70 und 130% der Wasserleitfähigkeiten bestimmt an Prüfkörpern aus der Wand. Wasserleitfähigkeiten bestimmt an Prüfkörpern aus dem First ergaben tendenziell höhere Wasserleitfähigkeiten als an den Prüfkörpern aus der Wand.

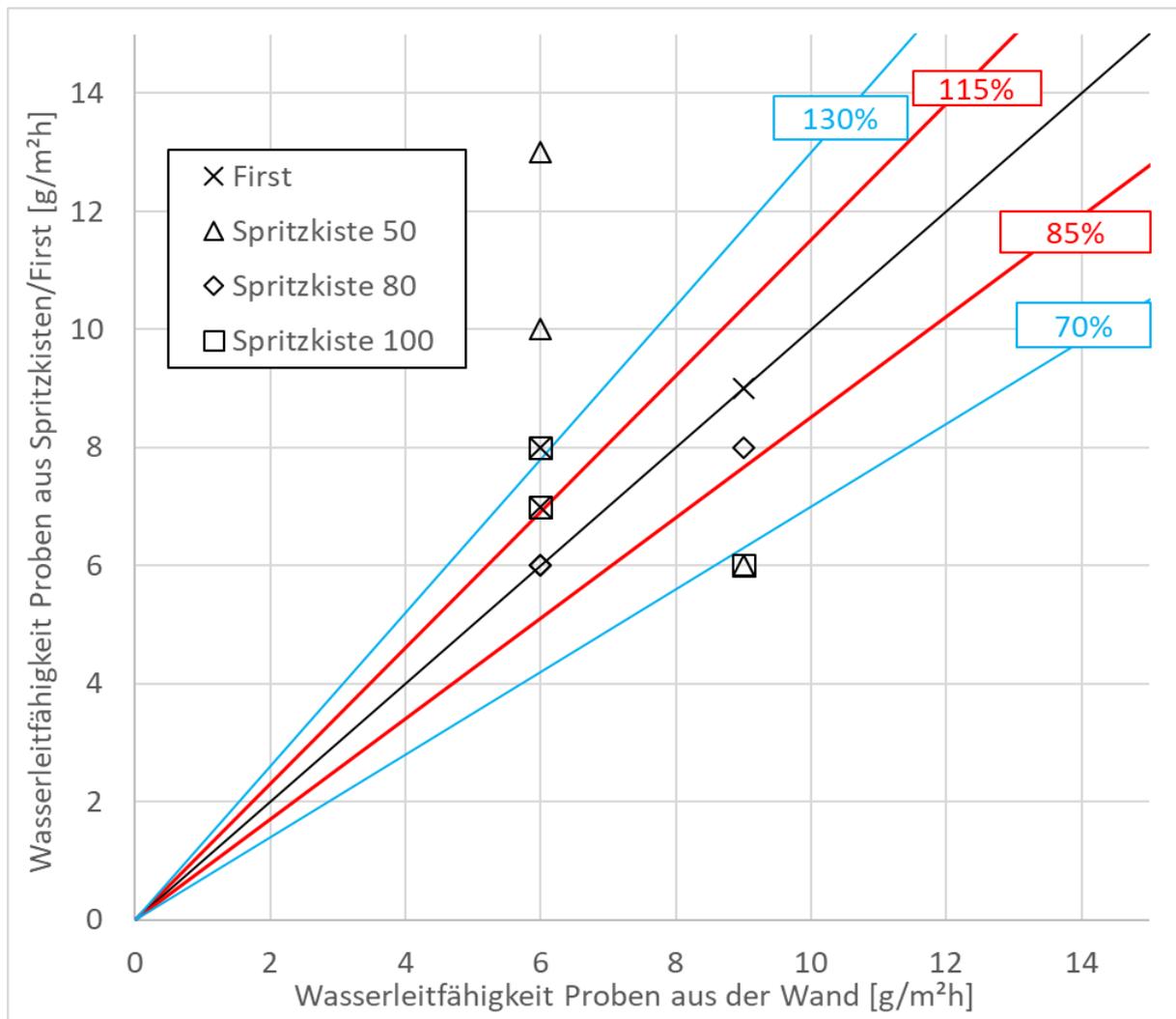


Bild 5: Wasserleitfähigkeit Spritzbeton an Prüfkörpern aus der Wand im Vergleich zu den anderen Probeentnahmeorten

Die Wasserleitfähigkeiten bestimmt an Prüfkörpern aus den Spritzkisten 80 und 100 repräsentieren den Spritzbeton am Objekt gut.

Werden die Wasserleitfähigkeiten an Prüfkörpern aus Spritzkisten 50 bestimmt, besteht ein hohes Risiko, dass gegenüber den Wasserleitfähigkeiten bestimmt mit Prüfkörpern aus dem Objekt höhere, das heisst ungünstigere Werte gemessen werden.

3.3 Fasergehalte

Im Mittel lag die Standardabweichung bei der Fasergehaltsbestimmung am Spritzbeton bei 17% des Mittelwertes.

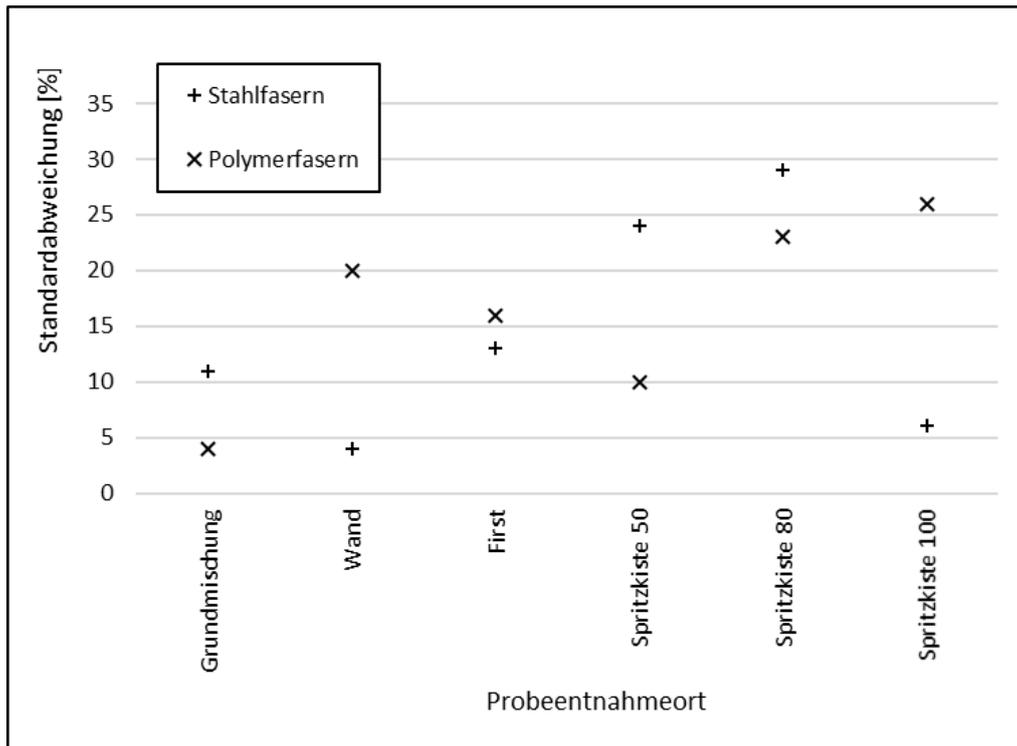


Bild 6: Standardabweichungen innerhalb einer Prüfserie in % des Mittelwertes

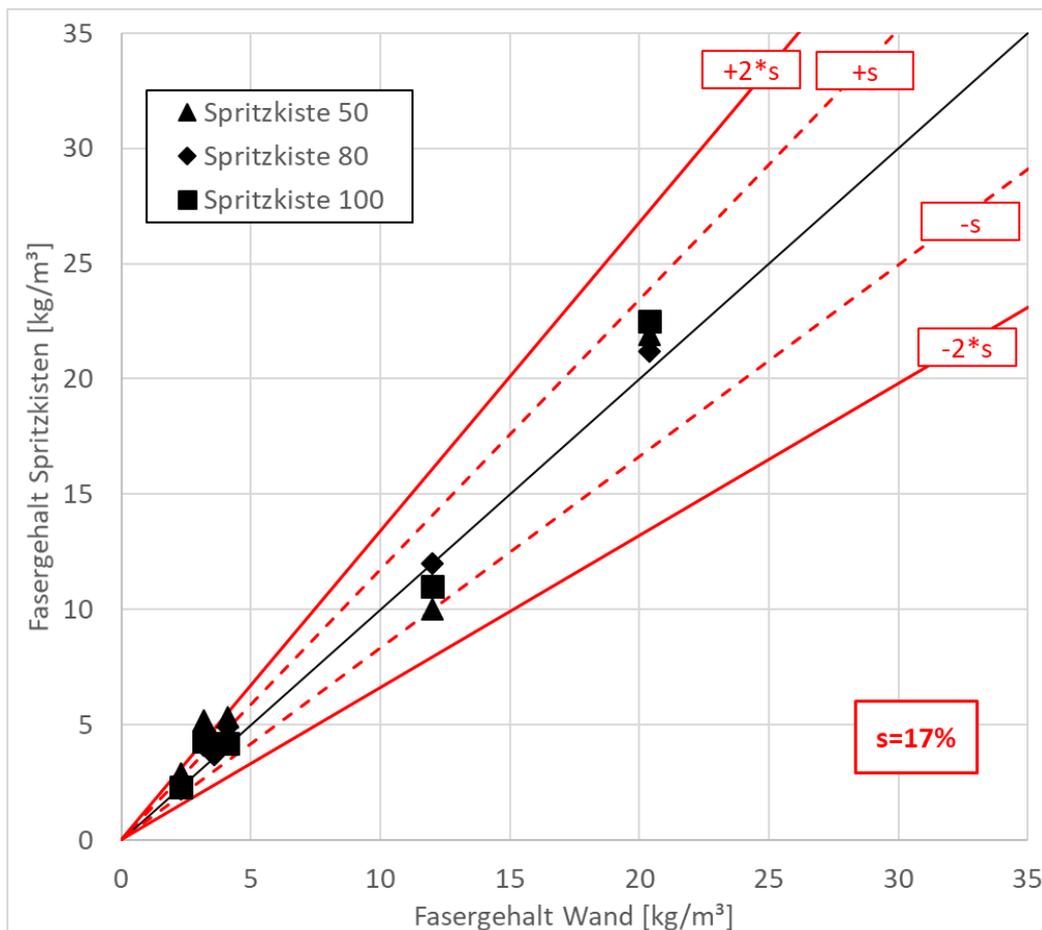


Bild 7: Vergleich Fasergehalte an der Wand und in den Spritzkisten

Bis auf zwei Werte liessen sich die Fasergehalte bestimmt an Prüfkörpern des Spritzbetons aus der Wand und aus den Spritzkisten nicht mit Sicherheit unterscheiden (siehe Bild 7).

Bei den Mischungen mit Polymerfasern wurden in diesen Versuchen tendenziell höhere Werte in den Spritzkisten als am Objekt gemessen.

Die Fasergehalte bestimmt an Prüfkörpern aus den Spritzkisten 50 und 80 liessen sich nicht mit Sicherheit von den Fasergehalten bestimmt an Prüfkörpern aus den Spritzkisten 100 unterscheiden (siehe Bild 8).

Bei den Spritzbetonen mit Polymerfasern bestand jedoch eine Tendenz von höheren Fasergehalten in den Prüfkörpern aus den Spritzkisten 50 gegenüber den Prüfkörpern aus den Spritzkisten 100.

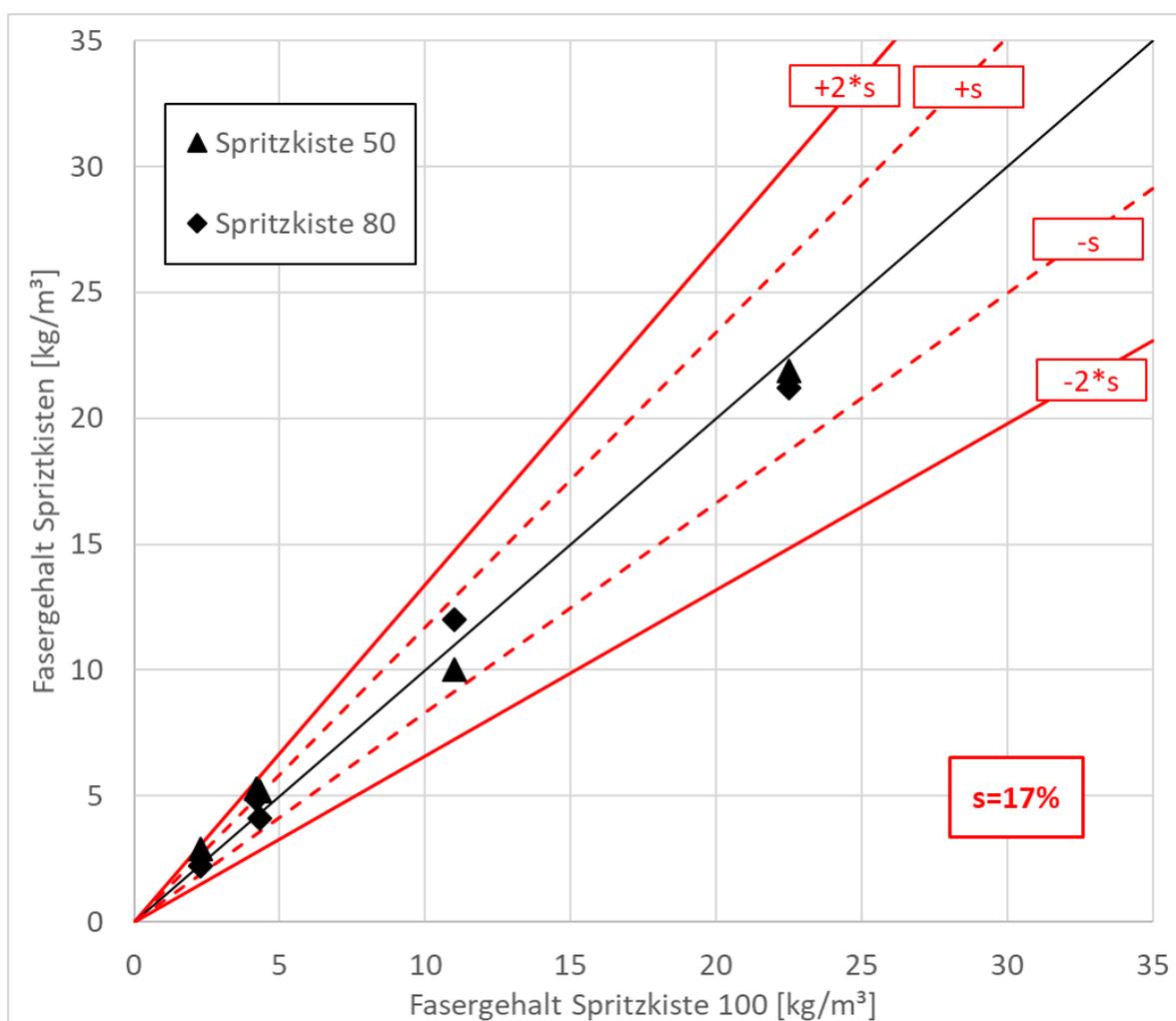


Bild 8: Vergleich Fasergehalte Spritzbeton in den Spritzkisten

3.4 Energieabsorption

Die Mittelwerte der drei Platten pro Serie der Energieabsorption ergaben plausible Verhältnisse zwischen Fasergehalt und Energieabsorption. Die Mittelwerte der Serien aus Spritzkisten 80 und 100 waren nicht zu unterscheiden.

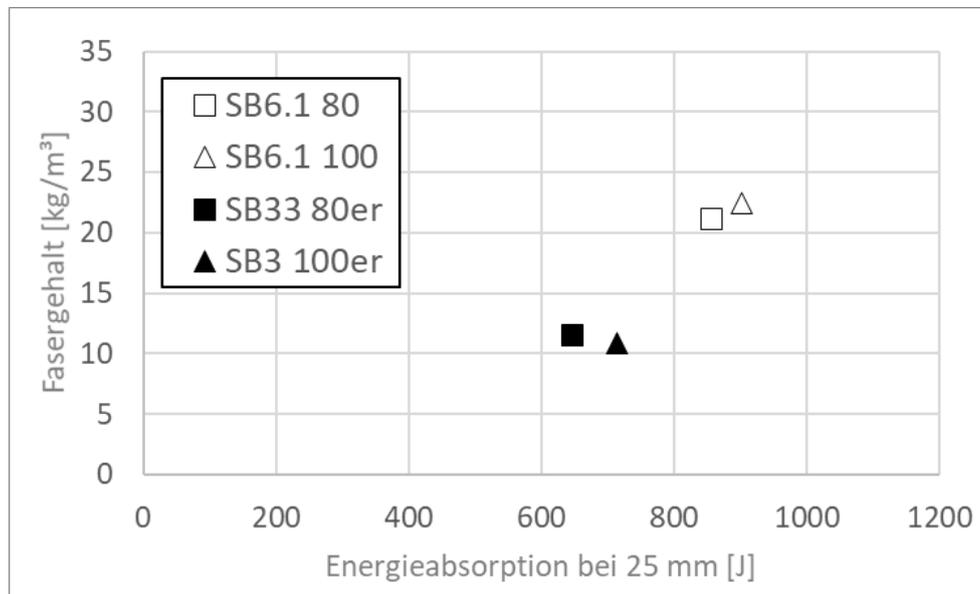


Bild 9: Serienmittel der Energieabsorption Stahlfaserspritzbetone Phase 1 (gefüllte Symbole) und Phase 2 (leere Symbole)

4. Schlussfolgerungen

4.1 Einfluss der Spritzkistenabmessungen

In den Versuchen wurden auch kleinere Spritzkisten 50 und Spritzkisten 80 als die von der SN EN 14488-1 für den Spritzvorgang mit Spritzrobotern geforderten Spritzkisten 100 eingesetzt.

Bei den Resultaten an Prüfkörpern aus Spritzkisten 50 traten Unterschiede zu den anderen Spritzkistenabmessungen auf. Bei der Druckfestigkeit nahm die Bandbreite nach oben und unten zu (schlechtere und bessere Resultate), bei der Wasserleitfähigkeit ergaben sich an den Prüfkörpern aus Spritzkisten 50 tendenziell ungünstigere Resultate und beim Fasergehalt eher günstigere, das heisst höhere Werte im Vergleich zu den Prüfkörpern aus den Spritzkisten 100.

Die Resultate der Prüfungen Druckfestigkeit, Wasserleitfähigkeit, Fasergehalt und Energieabsorption an Prüfkörpern aus Spritzkisten 80 und Spritzkisten 100 ergaben vergleichbare Werte.

Bei Prüfkörpern aus Spritzkisten 50 ist das Risiko abweichende Resultate zu erhalten gross. Über die absolute Grösse der Abweichung der Resultate an Prüfkörpern aus Spritzkisten 50 zu Resultaten an Prüfkörpern aus Spritzkisten 100 kann mit den vorhandenen Daten aus diesem Forschungsprojekt noch keine abschliessende Aussage gemacht werden.

4.2 Einfluss des Prüfortes Wand und First (Überkopf)

Bis auf einzelne Ausnahmen waren die Resultate der 28-Tage Druckfestigkeit in den Versuchen an Prüfkörpern aus dem Firstbereich (Überkopf) und der Wand vergleichbar oder gering tiefer.

In der Tendenz lagen die 28-Tage Druckfestigkeiten der Prüfkörper aus dem First bei 85 bis 100 % der 28-Tage Druckfestigkeiten der Prüfkörper aus der Wand.

Die Fasergehalte im First- und Wandbereich waren in diesen Versuchen vergleichbar.

4.3 Übertragbarkeit Resultate Spritzkiste - Objekt

In den Versuchen wurde die Druckfestigkeit, der Fasergehalt und die Wasserleitfähigkeit des Spritzbetons an Prüfkörpern aus dem Objekt und an Prüfkörpern aus Spritzkisten mit verschiedenen Spritzkistenabmessungen verglichen.

Mit Prüfkörpern aus Spritzkisten 80 und 100 waren die Resultate der Druckfestigkeit, Fasergehalt und Wasserleitfähigkeit vergleichbar mit den Resultaten von Prüfkörpern aus dem Objekt.

Bei den 28-Tage Druckfestigkeiten ergaben die Resultate an Prüfkörpern aus den Spritzkisten tendenziell tiefere Werte im Vergleich zu den Prüfkörpern aus der Wand.

Die Fasergehalte von Spritzbetonen mit Polymerfasern lagen bei Prüfkörpern aus den Spritzkisten tendenziell höher als bei Prüfkörpern aus dem Objekt.

Die Versuche zeigen, dass mit Prüfkörpern aus separat hergestellten Spritzkisten die Druckfestigkeit, Wasserleitfähigkeit und der Fasergehalt am Objekt bewertet werden können.

Die Aussage bezieht sich auf Prüfkörper, welche zu einem frühen Zeitpunkt (zwei Tage) gewonnen und anschliessend bis zur Prüfung konditioniert gelagert werden.

5. Zusammenfassung

In Spritzversuchen wurde gezeigt, dass mit Spritzkisten mit Seitenlängen 80 und 100 cm repräsentative Prüfwerte für die Druckfestigkeit und den Fasergehalt von Spritzbeton am Objekt erreicht werden können. Bei Spritzkisten mit Seitenlänge 50 cm steigt das Risiko Unterschiede zu erhalten.

Für die Qualitätskontrolle von Spritzbeton können Spritzkisten mit Seitenlängen 80 und 100 cm empfohlen werden.

Aufgrund der Tragweite der Auswirkungen in der Praxis kann zum Einsatz von Spritzkisten mit Seitenlänge 50 cm aufgrund der vorhandenen Daten keine abschliessende Empfehlung abgegeben werden.

Unabhängig dieser Untersuchungen gilt, um die Leistungsfähigkeit des Spritzbetons zu bewerten, sollte der Zeitpunkt der Probenahme möglichst früh (zwei bis drei Tage nach Applikation) festgelegt werden und die Prüfkörper anschliessend bis zur Prüfung der Druckfestigkeit nach 28 Tagen konditioniert gelagert werden.

Werden die Prüfkörper länger im Objekt belassen, wird nicht die Leistungsfähigkeit des Spritzbetons bewertet, da Unterschiede in der Nachbehandlung die Leistungsfähigkeit in unbekannter Grösse beeinflussen.

6. Literatur

- [1] Schweizer Norm SIA 198, Untertagebau Ausführung, Zürich, 2004.
- [2] SN EN 14487-1, Spritzbeton Teil 1 – Begriffe, Festlegung und Konformität, 2005.
- [3] SN EN 13791, Bewertung der Druckfestigkeit von Beton in Bauwerken oder in Bauteilen, 2007.
- [4] SN EN 14488-1, Prüfung von Spritzbeton Teil 1 – Probenahme von Frisch- und Festbeton, 2005.
- [5] Weiss, R.; Lassnig, E:
Einfluss der Applikationsrandbedingungen auf die Eigenschaften von Faserspritzbeton,
Bundesamt für Strassen, Forschungsbericht 1666, 2020.

Zu den Autoren

Dipl. Bauingenieur ETH/SIA Roland Weiss

Studium des Bauingenieurwesens an der ETH Zürich, seit 1996 in verschiedenen Funktionen und Projekten bei der VersuchsStollen Hagerbach AG, aktuell als Experte bei der VersuchsStollen Hagerbach AG.

roland.weiss@hagerbach.ch

Dipl. Bauökonom Erich Lassnig

Niederlassungsleiter Aro-Hydrumatic Australia Ltd., Oberbauleitung Projekt Nant de Drance SA, seit 2017 Stv. Geschäftsführer der VersuchsStollen Hagerbach AG.

elassnig@hagerbach.ch