



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Einfluss von Applikationsrand- bedingungen auf die Eigen- schaften von Faserspritzbeton

**Influence des contraintes d'application sur les propriétés du
béton fibré projeté**

**Influence of applicaton boundary conditions on the
properites fo fibre reinforced sprayed concrete**

VersuchsStollen Hagerbach AG
Roland Weiss
Erich Lassnig

**Forschungsprojekt AGT 2016/004 auf Antrag der Arbeitsgruppe
Tunnelforschung (AGT)**

Februar 2020

1666

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Einfluss von Applikationsrand- bedingungen auf die Eigen- schaften von Faserspritzbeton

**Influence des contraintes d'application sur les propriétés du
béton fibré projeté**

**Influence of applicaton boundary conditions on the
properites fo fibre reinforced sprayed concrete**

VersuchsStollen Hagerbach AG
Roland Weiss
Erich Lassnig

**Forschungsprojekt AGT2016/004 auf Antrag der Arbeitsgruppe
Tunnelforschung (AGT)**

Februar 2020

1666

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Roland Weiss

Mitglieder

Erich Lassnig

Begleitkommission

Präsident

Josef Kaufmann

Mitglieder

René Bolliger

Carsten Rieger

Rolf Dubach

Stefan Maurhofer

Antragsteller

Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Zusammenfassung	7
Résumé	9
Summary	11
1 Einleitung	13
1.1 Zielsetzung	13
1.2 Stand der Forschung, Forschungsbedarf	13
2 Untersuchungsprogramm und -methode	15
2.1 Vorbemerkungen.....	15
2.2 Untersuchungsmethoden	16
2.2.1 Frischbetonprüfungen an der Grundmischung	16
2.2.2 Festbetonprüfungen am Spritzbeton.....	16
2.3 Zusammensetzung des Spritzbetons.....	19
2.4 Ablauf Spritzversuche Phase 1	20
2.5 Ablauf Spritzversuche Phase 2	22
3 Ergebnisse	25
3.1 Spritzversuche Phase 1	25
3.1.1 Frischbetondaten Grundmischungen	25
3.1.2 Würfeldruckfestigkeiten Grundmischungen	25
3.1.3 Frühfestigkeiten Spritzbeton	25
3.1.4 Bohrkerndruckfestigkeiten Spritzbeton	26
3.1.5 Wasserleitfähigkeiten	28
3.1.6 Fasergehalt und Energieabsorption	29
3.2 Spritzversuche Phase 2	30
3.2.1 Frischbetondaten Grundmischungen	30
3.2.2 Würfeldruckfestigkeiten Grundmischungen	30
3.2.3 Bohrkerndruckfestigkeiten Spritzbeton	30
3.2.4 Fasergehalt und Energieabsorption	32
4 Diskussion	37
4.1 Wiederholbarkeit der Versuche	37
4.2 Druckfestigkeit.....	39
4.2.1 Vergleich Wasserlagerung und Feuchtraumlagerung	39
4.2.2 Auswirkungen der Variation der Grundmischungen auf die Spritzbetone	40
4.2.3 Streuung innerhalb einer Prüfserie der 28d-Druckfestigkeit	42
4.2.4 Vergleichbarkeit der Probenahmeorte	43
4.2.5 Prüfkörper aus dem Objekt entnommen nach 2 und 27 Tagen.....	46
4.2.6 Vergleich Wand zu First (Überkopf)	48
4.3 Wasserleitfähigkeiten	49
4.4 Fasergehalte	50
4.4.1 Streuung innerhalb einer Prüfserie	50
4.4.2 Einfluss Zementwechsel	52
4.4.3 Einfluss Pump-Förderleistung auf den Polymer-Fasergehalt	53
4.4.4 Einfluss Luftförderleistung auf den Polymer-Fasergehalt	54
4.4.5 Vergleich Fasergehalt Spritzbeton an der Wand und in Spritzkisten.....	55
4.4.6 Vergleich der Fasergehalte Spritzbeton in den Spritzkisten	57
4.4.7 Vergleich Fasergehalte Festbeton und Kratzproben	59
4.4.8 Fasergehalt in Spritzkisten für die Bestimmung der Energieabsorption	61
4.4.9 Vergleich der Fasergehalte im Rissbereich und im restlichen Bereich der Prüfplatte für die Energieabsorption	62

4.4.10	Detaillierte Erfassung der Fasergehalte in der Spritzkiste.....	64
4.5	Energieabsorption.....	69
5	Schlussfolgerungen und Forschungsbedarf	73
5.1	Schlussfolgerungen	73
5.1.1	Einfluss der Spritzkistenabmessung.....	73
5.1.2	Einfluss des Prüfortes Wand und First am Objekt.....	73
5.1.3	Übertragbarkeit Resultate Spritzkiste - Objekt.....	73
5.1.4	Zeitpunkt der Prüfkörpergewinnung.....	74
5.1.5	Fasergehalt als Steuergrösse bei der Spritzbetonapplikation	74
5.1.6	Faserverteilung in der Spritzkiste	74
5.2	Forschungsbedarf	74
6	Ergänzende Bemerkungen.....	75
6.1	Bewertung der Festigkeitsklasse	75
6.1.1	Bewertung gemäss SN EN 14487-1 (Spritzbeton)	75
6.1.2	Bewertung nach SN EN 13791 (Bohrkerne aus dem Objekt)	75
6.1.3	Auswahl des Bewertungsverfahrens	76
6.2	Faserverluste und Massnahmen	77
7	Empfehlungen für die Umsetzung in die Praxis und Anwendung.....	79
7.1.1	Auf Stufe Normengremien	79
7.1.2	Auf Stufe Bauherren und Projektverfasser	80
7.1.3	Auf Stufe Spritzbetonhersteller	80
	Glossar.....	81
	Literaturverzeichnis.....	82
	Projektabschluss	83
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	86

Zusammenfassung

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

Dafür wurden in zwei Phasen Spritzbetone ohne, sowie mit Stahl- und Polymerfasern unter gleichbleibenden Bedingungen appliziert. In den beiden Phasen wurden unterschiedliche Hersteller der Grundmischungen sowie verschiedene Düsenführer und Spritzgeräte eingesetzt.

Die vergleichbaren Resultate der Druckfestigkeit und des Fasergehaltes bei gleicher Grundmischung, aber mit unterschiedlichen Gerätschaften und Düsenführer in der Phase 1 und Phase 2 zeigen, dass die Resultate wiederholbar sind und dass die Schlussfolgerungen auf andere Herstell- und Verarbeitungsbedingungen übertragbar sind.

Mit Prüfkörpern aus Spritzkisten 80 und 100 cm Seitenlänge konnten 85 bis 100% der 28-Tage Druckfestigkeit von Prüfkörpern aus dem Wandbereich erreicht werden. Mit Prüfkörpern aus Spritzkisten 50 cm Seitenlänge war die Bandbreite bei den 28-Tagen Druckfestigkeiten etwas höher (80-110% der Druckfestigkeit von Prüfkörpern aus dem Wandbereich).

In diesen Versuchen lag die Streuung der Druckfestigkeiten im Mittel bei allen Entnahmeorten der Prüfkörper in derselben Grössenordnung. Die Prüfserien mit Prüfkörpern aus der Wand ergaben jedoch die grösste Bandbreite der Standardabweichungen.

Die Aussagen gelten für Prüfkörper, welche nach 2 Tagen entnommen werden und bis zur Prüfung nach 28 Tagen konditioniert im Wasser oder Feuchtraum gelagert werden.

Die Druckfestigkeiten der Prüfkörper aus dem Objekt, welche unmittelbar vor der 28-Tage Druckfestigkeitsprüfung aus dem Objekt entnommen wurden, ergaben teilweise nur 60% der Druckfestigkeit der nach 2 Tagen entnommen und konditioniert gelagerten Prüfkörper. Die Spritzbetonflächen am Objekt wurden nicht speziell nachbehandelt.

Um die Leistungsfähigkeit des Spritzbetons zu beurteilen, muss die Entnahme der Prüfkörper für die Druckfestigkeit nach 2 bis 3 Tagen erfolgen und die Prüfkörper sind anschliessend konditioniert (im Wasser oder Feuchtraum) bis zur Prüfung zu lagern.

Ohne konditionierte Nachbehandlung ist der Verlauf der Festigkeitsentwicklung des Spritzbetons am Objekt einer grossen Bandbreite unterworfen.

Der Einfluss und die Notwendigkeit von Nachbehandlungsmassnahmen am Spritzbeton sollte vertieft abgeklärt werden.

Die Fasergehalte bestimmt an Prüfkörpern aus dem Objekt und den Spritzkisten ergaben in diesen Versuchen eine gute Übereinstimmung. Bei den Spritzbetonen mit Polymerfasern wurden jedoch tendenziell höhere Fasergehalte in den Spritzkisten als am Objekt an der Wand gemessen.

In diesem Projekt wurde die Faserverteilung innerhalb einiger Spritzkisten und Prüfplatten näher untersucht.

Die Unterscheidung der Fasergehalte im Rissbereich und im restlichen Bereich der Prüfplatte nach der Prüfung der Energieabsorption ergab keine wesentlichen Unterschiede.

Bei der Untersuchung des Fasergehaltes in der gesamten Spritzkiste wurden jedoch erhöhte Fasergehalte im Randbereich der Spritzkisten erkannt.

Die Fasergehalte bestimmt an Kratzproben aus dem frisch applizierten Spritzbeton stimmten in diesen Versuchen gut mit den später am ausgehärteten Spritzbeton bestimmten Fasergehalten überein.

Beim Einsatz des Fasergehaltes als Steuergrösse bestimmt an einer Kratzprobe am frisch applizierten Spritzbeton besteht gegenüber dem Ablauf der Prüfnorm SN EN 14488-7 Optimierungsbedarf bei der Bestimmung des Volumens, um möglichst einfach und rasch eine Aussage vor Ort zu erhalten.

Die Versuche zeigen, dass auch mit Prüfkörpern aus Spritzkisten mit Seitenlängen kleiner als 100 cm und Spritzbetonapplikation mit Spritzroboter repräsentative Werte für die Druckfestigkeit, den Fasergehalt und die Prüfung der Energieabsorption erreicht werden können. Bei Prüfkörpern aus Spritzkisten mit Seitenlänge 50 cm besteht jedoch ein höheres Risiko, dass die Unterschiede der Eigenschaften zum Spritzbeton am Objekt grösser werden.

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.

Für Aussagen zur Bandbreite und Streuung der Prüfergebnisse aus der laufenden Produktion von Spritzbeton sollten gut dokumentierte Daten von Spritzbeton-Prüfungen während der Ausführung von Objekten gezielt gesammelt und ausgewertet werden.

Die Druckfestigkeiten von Prüfkörpern aus dem Firstbereich erreichten rund 85 bis 100% der 28-Tage Druckfestigkeiten von Prüfkörpern aus dem Wandbereich. Die Fasergehalte im First- und Wandbereich waren in diesen Versuchen vergleichbar.

Die Unterschiede bei der Druckfestigkeit, dem Fasergehalt und der Energieabsorption, bestimmt an Prüfkörpern aus der Wand und aus dem First sowie die Auswirkungen auf das Tragverhalten sollten vertieft untersucht werden.

Der Arbeitsgruppe SIA 198 wird empfohlen, die Bewertung der Druckfestigkeit von Spritzbeton nach SN EN 13791 beizubehalten unter Berücksichtigung der Punkte in Kapitel 7.1.1.

Résumé

Dans le cadre de ce projet de recherche, la transférabilité de la résistance à la compression et de la teneur en fibres des éprouvettes d'essai provenant de boîtes à béton projeté aux éprouvettes du béton projeté sur place a été examinée.

Pour cela, des bétons projetés sans et avec des fibres d'acier et de polymère ont été appliqués en deux phases dans des conditions constantes. Dans les deux phases, différents fabricants de mélanges de base ainsi que différents opérateurs de buses et machines de mélange mouillé ont été utilisés.

Les résultats comparables de la résistance à la compression et de la teneur en fibres pour le même composé de base, mais avec des équipements et des guides de buses différents dans les phases 1 et 2, montrent que les résultats sont reproductibles et que les conclusions peuvent être appliquées à d'autres conditions de fabrication et de transformation.

Avec des éprouvettes de 80 cm et de 100 cm de long sur les côtés, 85 à 100 % de la résistance à la compression de 28 jours des éprouvettes provenant du mur a pu être atteinte. Avec des échantillons provenant de boîtes à béton projeté de 50 cm de côté, la largeur de bande était légèrement supérieure pour les résistances à la compression de 28 jours (80-110 % de la résistance à la compression des échantillons provenant du mur).

Dans ces essais, la dispersion moyenne de la résistance à la compression était du même ordre de grandeur à tous les points de prélèvement de l'échantillon. Les séries d'essais avec des éprouvettes murales présentaient cependant la plus grande plage d'écart-types.

Les déclarations s'appliquent aux échantillons d'essai qui sont retirés après 2 jours et conservés conditionnés dans l'eau ou dans une pièce humide jusqu'à l'essai après 28 jours.

La résistance à la compression des éprouvettes prélevées sur l'objet immédiatement avant l'essai de résistance à la compression de 28 jours n'a donné que 60 % de la résistance à la compression des éprouvettes prélevées sur l'objet après 2 jours et stockées en bon état. Les surfaces de béton projetées sur l'objet n'ont pas été spécialement traitées.

Afin d'évaluer la performance du béton projeté, les éprouvettes d'essai pour la résistance à la compression doivent être retirées après 2 à 3 jours et les éprouvettes d'essai doivent ensuite être conditionnées (dans l'eau ou en chambre humide) et stockées jusqu'à l'essai.

Sans post-traitement conditionné, le développement de la résistance du béton projeté sur l'objet est soumis à une large gamme.

L'influence et la nécessité des mesures post-traitement sur le béton projeté doivent être clarifiées en profondeur.

Les teneurs en fibres déterminées sur les éprouvettes de l'objet et sur les boîtes à béton projeté ont montré une bonne concordance dans ces essais. Dans le cas des bétons projetés avec des fibres polymères, cependant, les teneurs en fibres plus élevées ont tendance à être mesurées dans les boîtes à béton projeté que sur l'objet sur le mur.

Dans le cadre de ce projet, la répartition des fibres dans certaines boîtes à béton projeté et plaques d'essai a été examinée plus en détail.

La différenciation des teneurs en fibres dans la zone de fissuration et dans la zone restante de la plaque d'essai après l'essai d'absorption d'énergie n'a montré aucune différence significative.

Toutefois, l'examen de la teneur en fibres de l'ensemble de la boîte à béton projeté a révélé une augmentation de la teneur en fibres dans la zone du bord des boîtes à béton projeté.

Lors de ces essais, la teneur en fibres déterminée sur des échantillons prélevés sur le béton projeté fraîchement appliqué correspondait bien à la teneur en fibres déterminée ultérieurement sur le béton projeté durci.

Lors de l'utilisation de la teneur en fibres comme grandeur de réglage déterminée lors d'un essai au grattage du béton projeté fraîchement appliqué, il est nécessaire d'optimiser la détermination du volume par rapport à la procédure de la norme d'essai SN EN 14488-7 afin d'obtenir une déclaration sur place le plus simplement et le plus rapidement possible.

Les essais montrent que des valeurs représentatives de résistance à la compression, de teneur en fibres et d'absorption d'énergie peuvent également être obtenues avec des éprouvettes provenant de boîtes à béton projeté dont la longueur latérale est inférieure à 100 cm et avec du béton projeté par des robots de machines de mélange mouillé. Cependant, il y a un risque plus élevé que les différences entre les propriétés des éprouvettes faites de boîtes à béton projeté de 50 cm de côté et celles du béton projeté sur l'objet augmentent.

Pour le contrôle de la qualité du béton projeté, il est recommandé d'utiliser des boîtes à béton projeté d'une longueur latérale de 80 et 100 cm.

En raison des conséquences de ces effets dans la pratique, il n'est pas possible, sur la base des données disponibles, de recommander l'utilisation de boîtes de béton projeté d'une longueur latérale de 50 cm.

Pour les déclarations sur la portée et la dispersion des résultats d'essais de la production en cours de béton projeté, des données bien documentées sur les essais de béton projeté pendant l'exécution des objets doivent être spécifiquement collectées et évaluées.

La résistance à la compression des éprouvettes provenant de la zone de la crête a atteint environ 85 à 100 % de la résistance à la compression de 28 jours des éprouvettes provenant de la zone de la paroi. Les teneurs en fibres dans les zones de faite et de paroi étaient comparables dans ces essais.

Les différences de résistance à la compression, de teneur en fibres et d'absorption d'énergie, déterminées sur des éprouvettes de paroi et de faitage, ainsi que les effets sur le comportement en charge devaient être étudiés en profondeur.

Il est recommandé au groupe de travail SIA 198 de maintenir l'évaluation de la résistance à la compression du béton projeté conformément à la norme SN EN 13791, en tenant compte des points du chapitre 7.1.1.

Summary

In this research project 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 without and with steel and polymer fibres were applied in two phases under constant conditions. In the two phases, different manufacturers of the base mixes as well as different nozzle men and spraying machines were used.

The comparable results of compressive strength and fibre content for the same base mix, but with different equipment and nozzle men in phase 1 and phase 2 show that the results are repeatable and that the conclusions can be transferred to other manufacturing and processing conditions.

With test specimens of 80 cm and 100 cm side length sprayed test panels, 85 to 100% of the 28-day compressive strength of insitu sprayed concrete test specimens could be achieved. With specimens from 50 cm side length sprayed test panels, the range was slightly higher for the 28-day compressive strengths (80-110% of the compressive strength of insitu sprayed concrete specimens).

In these tests, the mean scatter of compressive strength was of the same order of magnitude at all test specimen removal points. The test series with test specimens from the insitu sprayed concrete, however, showed the largest range of standard deviations.

The statements apply to test specimens which are removed after 2 days and stored conditioned in water or wet conditions until the test after 28 days.

The compressive strength of the test specimens taken from insitu sprayed concrete immediately before the 28-day compressive strength test partially only yielded 60% of the compressive strength of the test specimens taken from insitu sprayed concrete after 2 days and stored in condition. The sprayed concrete surfaces on the object were not specially cured.

In order to assess the performance of the shotcrete, the test specimens for compressive strength must be removed after 2 to 3 days and the test specimens must then be cured (in water or wet conditions) until the test.

Without conditioned curing, the development of the strength of insitu sprayed concrete is subject to a wide range.

The influence and necessity of curing measures on the shotcrete should be clarified in depth.

The fibre contents determined on test specimens from insitu sprayed concrete and the sprayed test panels showed good agreement in these tests. In the case of sprayed concretes with polymer fibres, however, higher fibre contents tended to be measured in the sprayed test panels than on the insitu sprayed concrete on the wall.

In this project, the fibre distribution within some sprayed test panels and test plates was examined in more detail.

The distinction of the fibre contents in the crack area and in the remaining area of the test plate after the energy absorption test showed no significant differences.

However, the examination of the fibre content in the entire sprayed test panels revealed increased fibre contents in the edge area of the sprayed test panels.

In these tests, the fibre contents determined on scratch samples from the freshly applied shotcrete were in good agreement with the fibre contents determined later on the hardened shotcrete.

When using the fibre content as a control variable determined on a scratch test of the freshly applied shotcrete, there is a need for optimisation in the determination of the volume compared to the procedure of the test standard SN EN 14488-7 in order to obtain a statement on site as simply and quickly as possible.

The tests show that representative values for compressive strength, fibre content and energy absorption testing can also be achieved with test specimens from sprayed test panels with side lengths of less than 100 cm and sprayed concrete application with spray robots. However, there is a higher risk that the differences between the properties of test specimens made of 50 cm side length sprayed test panels and those of sprayed concrete on the object will increase.

For the quality control of shotcrete, sprayed test panels with side lengths of 80 and 100 cm can be recommended.

Due to the consequences of the effects in practice, no final recommendation can be made for the use of sprayed test panels with side lengths of 50 cm based on the available data.

For statements on the range and dispersion of test results from the ongoing production of shotcrete, well-documented data from shotcrete tests during the execution of objects should be specifically collected and evaluated.

The compressive strength of test specimens from the ceiling area reached about 85 to 100% of the 28-day compressive strength of test specimens from the wall area. The fibre contents in the ceiling and wall areas were comparable in these tests.

The differences in compressive strength, fibre content and energy absorption, determined on test specimens from the wall and from the ceiling, as well as the effects on the load-bearing behaviour should be investigated further.

The SIA 198 working group is recommended to maintain the evaluation of the compressive strength of shotcrete in accordance with SN EN 13791, taking into account the points in Chapter 7.1.1.

1 Einleitung

1.1 Zielsetzung

Die Versuche sollen Aussagen zur Übertragbarkeit der Druckfestigkeit und des Fasergehalts von Spritzbeton in Spritzkisten zum Spritzbeton am Objekt liefern.

1.2 Stand der Forschung, Forschungsbedarf

Bei der objektspezifischen Prüfung von Spritzbeton lassen die SN EN 14487-1 [1] wie auch die SIA 198 [2] die Prüfung an Proben aus dem Objekt oder aus separat hergestellten Spritzkisten zu. Bei einigen Prüfungen (u.a. Bestimmung der Energieabsorption von Faserspritzbeton) sind nur separat hergestellte Proben verfahrenstechnisch möglich. Für Prüfungen sind immer entsprechende Spritzstärken (am Objekt mit Spritznasen, Spritzkissen) erforderlich, um normkonforme Prüfkörper daraus zu erhalten.

Bei der Ausführung werden normalerweise Proben aus Spritzkisten entnommen, die in vertikaler Position bis zu einer Höhe von 1.5 m ab Boden hergestellt werden. 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 am Objekt mit Herstellung und Nachbehandlung, je nach Zeitpunkt der Entnahme der Prüfkörper (+)
- Partielle Schwächung Objekt / Bauteil durch Bohrkernentnahme (-)
- Aufwändigere Probenahme vor Ort (-)
- Probekörperlänge oft grösser als Spritzbetonstärke (vorgängig gespritzte Spritzkissen nötig) (-)

Bohrkernentnahme aus Spritzkisten

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

Im Zusammenhang mit den Prüfungsarten TT1 und TT2 nach SIA 262/1:2013 [11] wurde in einem Forschungsprojekt vom ASTRA die Betonqualität im Bauwerk (Ortbeton) untersucht [15]. Die Ergebnisse zeigen, dass die Betonrohddichte im Bauteil stärker als die Rohddichte separat hergestellter Prüfkörper streut und dass die Betonrohddichte im Bauteil teilweise 50 bis 100 kg/m³ unter der Rohddichte von separat hergestellten Prüfkörper liegt. Die am Bohrkern bestimmte Druckfestigkeit ist dann auch teilweise mehr als 15% niedriger als die am Würfel bestimmte. In der SN EN 13791 „Bewertung der Druckfestigkeit von Beton in Bauwerken oder in Bauteilen“ [3] wird der charakteristische Wert der Druckfestigkeit bei Bohrkernen aus dem Objekt um 15% abgemindert.

Beim Spritzbeton ist der Einfluss der Verarbeitung bzw. des Spritzens auf die Qualität am Objekt viel grösser als bei der Ortbetonbauweise, da beim Spritzbeton die Grundmischung durch das Spritzen systembedingt verändert wird. Der relevante Einfluss des Düsenführers auf die Qualität des Spritzbetons ist unbestritten und führte zum EFNARC Düsenführer-Zertifizierungsprogramm [16] bzw. zum Ausbildungsprogramm für Spritzbetonarbeiten der Amerikanischen Spritzbetonvereinigung (ASA) und dem Zertifizierungsprogramm für Spritzbetondüsenführer des Amerikanischen Betonvereins (ACI) [17].

Die Einflüsse der Förderluftmenge und Düsenabstand auf die Qualität des Spritzbetons und des Faserrückpralls wurden im Rahmen eines europäischen Forschungsvorhabens iMine [18] untersucht. Die Untersuchungen bestätigten die in der Literatur vielfach genannten optimalen Parameterkombinationen von Düsenabstand und Förderluftmenge. Sie zeigten, dass ein nicht optimaler Düsenabstand nicht durch die Anpassung der Förderluftmenge kompensiert werden können und dass die Beschleunigerdosierung wesentlich ist. Die Untersuchungen zeigten weiterhin, dass der Herstellung von Spritzkisten besondere Beachtung zu schenken ist und dass unter anderem für die Orientierung der Spritzrichtung, speziell Applikationen über Kopf, noch Forschungsbedarf besteht.

Das Forschungsprojekt Langzeitverhalten von Polymerfaserspritzbeton im Untertagebau [19] befasste sich mit der Charakterisierung von Macro-Faser verstärkten Spritzbetonen. Bei der Beurteilung von Resultaten aus Spritzbetonproben ist mit Quervergleichen zu Proben aus dem Bauwerk sicherzustellen, dass die Resultate aus den Spritzkisten repräsentativ sind. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde verschiedentlich die Frage der Übertragbarkeit der Resultate aus den vorliegenden Untersuchungen mit Spritzvorgängen mit hoher Leistung bzw. über Kopf-Applikation gestellt. Diesbezügliche Untersuchungen waren in der Literatur nicht dokumentiert und auch den verschiedenen Fachgremien, die im Rahmen von den Untersuchungen kontaktiert wurden, nicht bekannt.

Eine erneute Recherche nach systematischen Auswertungen von Spritzbeton-Druckfestigkeiten aus dem Objekt im Vergleich zu separat hergestellten Spritzkisten ergab keine Treffer. Verschiedene Auswertungen von Spritzbeton Qualitätskontrollen sind bekannt und vorhanden [20] [21] [22]. Bohrkerne aus dem Objekt werden in der Regel erst bei aussergewöhnlichen Werten aus den Spritzkisten geprüft. Ein Vergleich dieser Werte ist nicht aussagekräftig, da in diesen Fällen eine Abweichung bei den Spritzkisten oder dessen Prüfung vorlag.

Systematische Vergleiche zwischen Druckfestigkeiten ermittelt an Bohrkernen aus separat hergestellten Spritzkisten und Spritzbeton aus dem Objekt fehlen. Für die Bewertung bzw. die Bewertungsmethode, insbesondere in Bezug auf die Abminderung der Anforderungen um 15% für Druckfestigkeiten aus dem Objekt, sind diese Erkenntnisse relevant.

Bei diversen, laufenden Objektkontrollen wurde festgestellt, dass bei der Bestimmung des Fasergehaltes aus Proben aus dem Objekt (Kratzprobe, Bohrkerne) im Vergleich zum Fasergehalt aus separat hergestellten Spritzkisten systematische Unterschiede vorhanden sind. In der Regel werden am Objekt tiefere Fasergehalte gemessen.

Bei der Bestimmung der Energieabsorption nach SN EN 14488-5 [5] bzw. des Arbeitsvermögens werden die ermittelten Werte der Energieabsorption zur Qualitätskontrolle in Korrelation zum Fasergehalt der geprüften Platte gesetzt [10]. Damit kann der für eine geforderte Energieabsorption minimal erforderliche Fasergehalt festgelegt und dieser als Objektkontrolle überprüft werden [23]. Die Bestimmung des Fasergehalts an den geprüften Platten ist jedoch nicht eindeutig festgelegt.

2 Untersuchungsprogramm und -methode

Im VersuchsStollen Hagerbach wurden in beiden Phasen je ein Spritzbeton mit Stahlfasern und Polymerfasern sowie eine Nullmischung ohne Fasern am Objekt appliziert und Spritzkisten unterschiedlicher Abmessungen gespritzt.

Bei diesem Prüfprogramm wurden die Grundmischungen unter gleichbleibenden Parameterkombinationen Düsenabstand, Düsenwinkel zur Spritzfläche, Förderleistung Beton und Luft, Luftdruck und mit einem Erstarrungsbeschleuniger für Spritzbeton (BE) durch einen nach EFNARC zertifizierten Düsenführer appliziert.

2.1 Vorbemerkungen

Die SN EN 14487-1 definiert in Ziffer 3.2.1 die Grundmischung als Mischung aus Zement, Gesteinskörnung und anderen Bestandteilen, die in die Spritzanlage eingebracht werden, wobei an der Spritzdüse hinzugefügte Bestandteile ausgeschlossen sind.

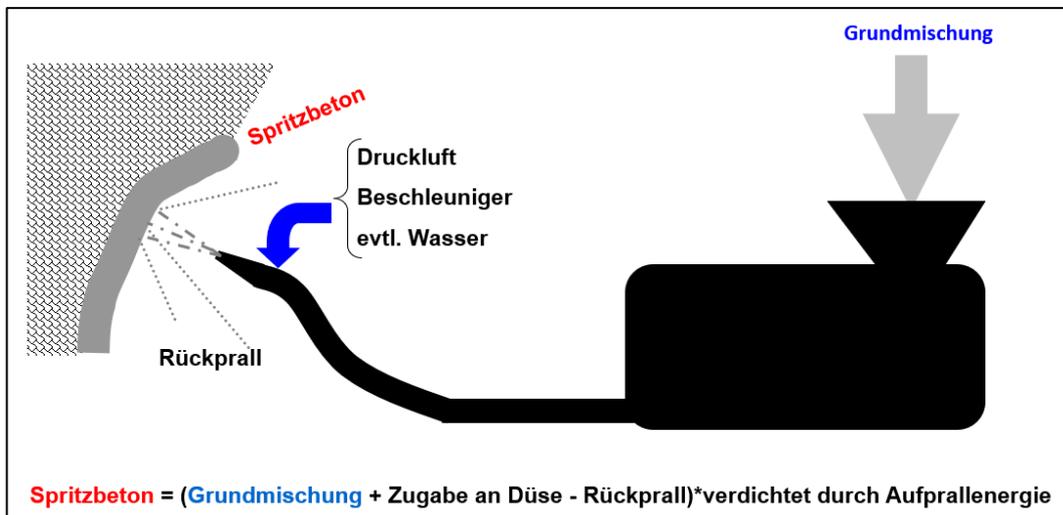


Abb.1 Definitionen Grundmischung und Spritzbeton gemäss SN EN 14487-1

Im Weiteren werden die Grundmischungen für den Spritzbeton mit GM und der Spritzbeton mit SB in der Bezeichnung unterschieden.

Die Grundmischung kann trocken oder nass sein. Die Grundmischung wurde für diese Versuche nass in Übereinstimmung mit der SN EN 206 hergestellt. In Phase 1 wurde die Grundmischung im eigenen Betonwerk vom VersuchsStollen Hagerbach hergestellt. In der Phase 2 wurde die Grundmischung von einem Transportbetonwerk bezogen.

Für die verschiedenen Applikations-Orte des Spritzbetons werden die folgenden Bezeichnungen im Bericht verwendet:

- | | |
|---|-----------------|
| • 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 |

2.2 Untersuchungsmethoden

2.2.1 Frischbetonprüfungen an der Grundmischung

Die Frischbetonprüfungen wurden nach den folgenden Prüfnormen durchgeführt:

- Ausbreitmass SN EN 12350-5
- Frischbetonrohddichte SN EN 12350-6
- Luftgehalt im Frischbeton SN EN 12350-7
- Wassergehalt im Frischbeton SIA 262/1, Anhang H
- Fasergehalt im Frischbeton SN EN 14721, Methode B

2.2.2 Festbetonprüfungen am Spritzbeton

Die SN EN 14488-1 sieht für den manuellen Spritzvorgang Mindestabmessungen von 50x50 cm für die Spritzkisten und für den Spritzvorgang mit Spritzroboter Mindestabmessungen von 100x100 cm für die Spritzkisten vor.

Aufgrund der einfacheren Handhabung von kleineren Spritzkisten werden in der Praxis oft Spritzkisten mit den Abmessungen von 50x50 cm bis 80x80 cm auch beim Spritzvorgang mit Spritzroboter eingesetzt.

Die Spritzbetonproben wurden in diesen Versuchen nach SN EN 14488-1 hergestellt, wobei die Spritzkistenabmessungen abweichend mit 50x50 cm (Spritzkiste 50), 80x80 cm (Spritzkiste 80) und 100x100 cm (Spritzkiste 100) festgelegt wurden.

Die Spritzkisten haben vier gerade Seiten.

Die gefüllten Spritzkisten wurden mit einer Plastikfolie bis zur Entnahme der Prüfkörper nach 2 Tagen nachbehandelt.

Die Prüfkörper aus dem Spritzbeton wurden nach SN EN 14488-1 gewonnen. In Übereinstimmung zur SN EN 14488-1 Ziffer 5.7 wurden keine Prüfkörper aus dem Randbereich (=Dicke der Prüfplatte) gewonnen.

Die Festbetonprüfungen wurden den folgenden Prüfkörpern/Prüfnormen durchgeführt:

- Frühfestigkeit des Spritzbetons (Spritzkiste 80) SN EN 14488-2
- Würfeldruckfestigkeit (150x150 mm) SN EN 12390-3
- Bohrkerndruckfestigkeit (50x50 mm) SN EN 12504-1
- Wasserleitfähigkeit (50x50 mm) SIA 262/1, Anhang A
- Fasergehalte (gem. Kapitel 2.2.2) SN EN 14488-7, Verfahren A, B
- Energieabsorption (600x600 mm) SN EN 14488-5

In der *Tab. 1* sind die verschiedenen Prüfkörperentnahmeorte und die Prüfmethode aufgeführt.

	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 SN EN 14488-7 beschreibt die Bestimmung des Fasergehalts von Spritzbeton für erhärteten Spritzbeton (Verfahren A) und frisch applizierten Spritzbeton (Verfahren B).

Beim Verfahren A werden die Fasern durch Brechen der Proben freigelegt, beim Verfahren B durch Auswaschen.

Bei beiden Verfahren ist das Volumen der Probe durch Berechnung oder durch Wasserverdrängung zu bestimmen.

Die Fasern wurden ausgewaschen, mittels Manget (Stahlfasern) bzw. Aufschwimmen (Polymerfasern) separiert und anschliessend mit einem Industriefön getrocknet.

Aus dem frisch applizierten Spritzbeton wurden Kratzproben von mindestens 20 kg entnommen. Die Proben wurden ins Labor gebracht, welches unmittelbar neben dem Versuchsbereich liegt und dort das Volumen durch Wasserverdrängung bestimmt. Die Fasern wurden ausgewaschen, separiert und getrocknet, analog zum Vorgehen der Proben aus der Grundmischung.



Abb.2 Auswaschen der Fasergehaltsproben



Abb.3 Separieren und Trocknen der Fasern

Die Fasergehalte aus dem Objekt und aus der Spritzkiste 50 wurde an Bohrkernen \varnothing 100 mm bestimmt. Der Fasergehalt der Spritzkisten 80 und Spritzkisten 100 wurde an den Prüfplatten der Energieabsorption nach der Prüfung der Energieabsorption bestimmt. Der Randbereich der Spritzkiste wird bei der Präparation der Prüfplatten für die Bestimmung der Energieabsorption entfernt.

Bei einigen Prüfplatten wurde der Fasergehalt nach der Prüfung der Energieabsorption im Bereich der Risse und im restlichen Bereich der Prüfplatte separat bestimmt.

Der Bereich von 5-10 cm um die Risse wurde markiert und herausgeschnitten (siehe Beispiel in *Abb.4*). Der Fasergehalt wurde anschliessend für den Bereich um die Risse und den restlichen Bereich bestimmt.

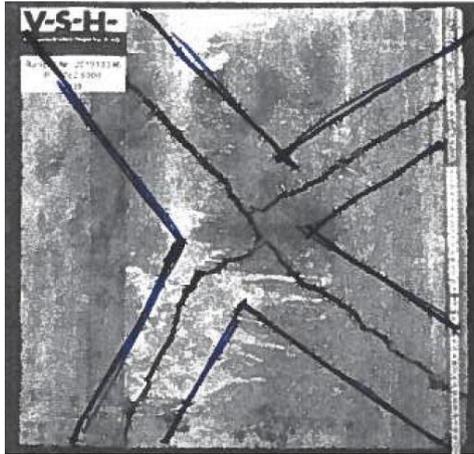


Abb.4 SB7.1-2 Prüfplatte 100-1 mit Darstellung "Bereich Riss" und "restliche Prüfplatte"

Bei ausgewählten Prüfplatten wurde die Spritzkiste für die Gewinnung der Prüfplatte für die Bestimmung der Energieabsorption in ein Raster mit einer Seitenlänge von 20 cm eingeteilt (*Abb.5*). Der Bereich der Prüfplatte für die Prüfung der Energieabsorption beträgt 60 cm (b2 bis d4). Bei den Spritzkisten 80 betrug der Randbereich 10 cm. Bei den Spritzkisten 100 betrug der Randbereich 20 cm.

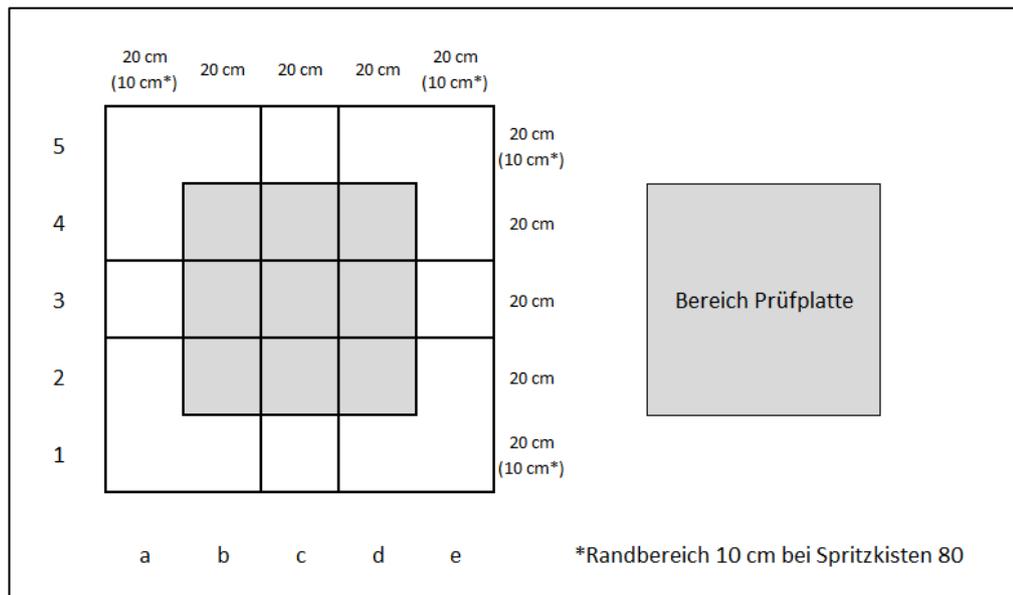


Abb.5 Raster und Bezeichnung für die detailliertere Bestimmung der Fasergehalte

Nach Abschluss der Prüfung der Energieabsorption wurden die Fasergehalte separat für die verschiedenen Rasterfelder bestimmt.

2.3 Zusammensetzung des Spritzbetons

Die Grundmischungen für Phase 1 und Phase 2 sind gemäss *Tab. 2* und *Tab. 3* zusammengesetzt.

Tab. 2 Zusammensetzungen der Grundmischungen Phase 1

Grundmischung	CEM II/A-LL 42,5 N [kg/m ³]	Fasergehalt [kg/m ³]	VZ/FM [%-CEM]	Grösstkorn [mm]	Ziel w/z [-]
GM1	425		1.0	8	0.48
GM2	425		0.4	8	0.52
GM3	450	32 ¹⁾	1.0	8	0.48
GM4	425	5 ²⁾	1.1	8	0.48
GM5	425		0.9	8	0.48

¹⁾Stahlfasern; ²⁾Polymerfasern

Tab. 3 Zusammensetzungen der Grundmischungen Phase 2

Grundmischung	CEM II/A-D 52,5 R [kg/m ³]	Fasergehalt [kg/m ³]	VZ/FM [%-CEM]	Grösstkorn [mm]	Ziel w/z [-]
GM6	450 ³⁾	32 ¹⁾	0.8	8	0.50
GM6.1	450	32 ¹⁾	0.8	8	0.50
GM7	425	5 ²⁾	0.8	8	0.50
GM7.1	425	5 ²⁾	0.8	8	0.50
GM8	425		0.8	8	0.50

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

In der Phase 1 wurde ein Zement CEM II/A-LL 42,5 N eingesetzt. In der Phase 2 wurde auf einen Zement CEM II/A-D 52,5 R gewechselt, aufgrund der erhöhten Faserverluste bei den Mischungen mit CEM II/A-LL 42,5 N.

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

Zur Steuerung der Frischbetoneigenschaften wurden Zusatzmittel Verzögerer/Fliessmittel nach SN EN 934-2 auf der Basis von Polycarboxylether (PCE) verwendet.

Die Grundmischung wurde mit Frischwasser nach SN EN 1008 hergestellt.

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

- Geklebte Fasern aus blankem Draht mit gekröpften Enden
- Draht Durchmesser 0.55 mm, Nennlänge 35 mm
- Zugfestigkeit 1'345 N/mm²
- E-Modul 20'000 N/mm²

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

- Polymer-Typ: Polyolefine
- Gerade, flache 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) 4'000 N/mm² ± 15%
- E-Modul (Young) ≥ 4'700 N/mm²

Die Grundmischungen wurden im Nassverfahren hergestellt.

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

2.4 Ablauf Spritzversuche Phase 1

Im November 2018 wurden die folgenden Versuchstage der Phase 1 durchgeführt:

- 06.11.2018: Vorversuche SB1 und SB2
- 07.11.2018: Mischung mit Stahlfasern SB3
- 13.11.2018: Mischung mit Polymerfasern SB4
- 14.11.2018: Nullmischung SB5 ohne Fasern

Für die Spritzversuche der Phase 1 wurden die Grundmischungen in der Betonmischanlage der VersuchsStollen Hagerbach AG hergestellt.

Die Betonmischanlage ist für einen untertägigen Betrieb ausgelegt und besteht aus den folgenden Komponenten:

- 10 Silos für Gesteinskörnungen (6 x Sand, 4 x Kies)
- 2 Silos und Schneckenförderer für den Zementaustrag von Big Bags oder Sackware
- Dosiereinrichtungen für Zusatzstoffe
- Zwangsmischanlage TEKA THZ 1500, 1.5 m³ Fassungsvermögen
- PC-gestützte Dorner Electronic Anlagensteuerung

Die Grundmischungen wurden als 1 m³ Chargen produziert und in Ladungen von 3-4 m³ zum Spritzort gefahren. Bei den Spritzbetonen SB3 und SB4 wurden mehrere Ladungen benötigt. Die einzelnen Ladungen sind wie folgt gekennzeichnet: GMX-1 bzw. SBX-1 ff. Die Chargen waren so verzögert, dass der Frischbeton sich über die Dauer der Versuche konstant verhält.

Die Spritzbetonapplikation erfolgte in der Phase 1 mit einem Normet Spraymec 8100 VC Spritzbetonmanipulator mit teleskopierbarem Ausleger und integrierter Beton- und Beschleunigermittel-Pumpe (BE-Mittelpumpe).



Abb.6 Normet Spraymec 8100 VC Spritzbetonmanipulator

Nachfolgend die technischen Daten des Spritzbetonmanipulators:

Trägergerät:		Betonpumpe:	
Länge	13.15 m	Förderleistung	3-30 m ³ /h
Breite	2.50 m	Förderdruck max.	51 bar
Höhe	2.83 m	Hydraulikdruck max.	250 bar
Gewicht	14.50 to		
BE-Mittelpumpe:		Schraubenkompressor:	
Förderdruck max.	12 bar	Förderleistung max.	12 m ³ /h
Dosierung	0.5-16 l/min	Elektromotor-Antrieb	75 kW
hydraulische Monopumpe		Luftmenge variabel einstellbar	

Die verwendete Spritzdüse weist folgende Konfiguration auf:

Kunststoff	
Länge	365 mm
Ø Eingang	65 mm
Ø Ausgang	40 mm

Die Geräteparameter wie Luftförderleistung, Förderleistung, Zementgehalt der Mischung und BE-Mittel Dosierung wurden vor Versuchsbeginn voreingestellt.

Die Spritzbetone der Phase 1 wurden mit einer Beton-Pumpleistung von 6 m³/h, einer BE-Mittel Dosierung von 6% und einer Luftförderleistung von 8 m³/h appliziert. Beim Spritzbeton SB4 wurden Serien mit einer Beton-Pumpleistung von 13 m³/h appliziert. Diese Mischungen sind mit "/13" gekennzeichnet.

Der Applikationsprozess wurde von einem EFNARC-zertifizierten Düsenführer durchgeführt.

Im Firstbereich wurden Felder mit den Dimensionen 200x80 cm für die Überkopf-Applikation mittels Markierspray eingezeichnet. An der Wand wurden Felder in den Dimensionen 120x120 cm angezeichnet.



Abb.7 Versuchsfelder Wand und First

Die Spritzkisten wurden in einem Winkel von rund 20° zur Senkrechten an der Wand aufgestellt. Nach der Herstellung wurden die Spritzkisten mit Folien zur Nachbehandlung abgedeckt.



Abb.8 Aufbau und Applikation Spritzkisten

Aus den Spritzfeldern am Objekt und den verschiedenen Spritzkisten wurden Prüfkörper für die Bestimmung der Druckfestigkeit nach 7 und 28 Tagen, die Prüfung der Wasserleitfähigkeit nach 28 Tagen und die Bestimmung des Fasergehalts entnommen. Die Prüfkörper für die Druckfestigkeit in der Phase 1 wurden bis zur Prüfung im Wasser und eine Serie zum Vergleich im Feuchtraum gelagert.

An den separat hergestellten Spritzkisten beim Faserspritzbeton wurde zusätzlich die Energieabsorption und der Fasergehalt bestimmt.

2.5 Ablauf Spritzversuche Phase 2

Im Mai und Juni 2019 wurden die folgenden Versuchstage der Phase 2 durchgeführt:

- 06.05.2019: Mischung mit Stahlfasern SB6 (abgebrochen)
- 06.05.2019: Nullmischung SB8 ohne Fasern
- 07.05.2019: Mischung mit Stahlfasern SB6.1
- 08.05.2019: Mischung mit Polymerfasern SB7 (abgebrochen)
- 12.06.2019: Mischung mit Polymerfasern SB7.1

Für die Spritzversuche der Phase 2 wurden die Grundmischungen vom einem nahen Transport-Betonwerk bezogen und mittels 4-achs Trommel-Fahrmischer zum Versuchsort geliefert.

Die Grundmischungen wurden als 2 m³ Chargen produziert und in einer Ladung von 6 m³ zum Spritzort gefahren. Die Chargen waren so verzögert, dass der Frischbeton sich über die Dauer der Versuche konstant verhält.

Die Spritzbetonapplikation erfolgte in Phase 2 mit einem Putzmeister PM 500 Spritzbetonmanipulator mit teleskopierbarem Ausleger und integrierter Beton- und Beschleunigermittel-Pumpe (BE-Mittelpumpe).



Abb.9 Putzmeister PM 500 Spritzbetonmanipulator

Nachfolgend die technischen Daten des Spritzbetonmanipulators:

Trägergerät:		Betonpumpe:	
Länge	7.80 m	Förderleistung	4-30 m ³ /h
Breite	2.40 m	Förderdruck max.	75 bar
Höhe	3.00 m	Hydraulikdruck max.	210 bar
Gewicht	16.00 to		
BE-Mittelpumpe:		Schraubenkompressor:	
Förderdruck max.	15 bar	Förderleistung max.	12.8 m ³ /h
Dosierung	0.5-12 l/min	Elektromotor-Antrieb	75 kW
Schlauchquetschpumpe		Luftmenge variabel einstellbar	

Die verwendeten Spritzdüsen weisen folgende Konfigurationen auf:

Stahl		Kunststoff	
Länge	255 mm	Länge	365 mm
Ø Eingang	65 mm	Ø Eingang	65 mm
Ø Ausgang	40 mm (50 mm)	Ø Ausgang	40 mm

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

Die Mischungen SB6 und SB7 wurden bis zum Abbruch der Versuche mit Luftförderleistungen von 5, 8 und 10 m³/h und mit den Kunststoff- und Stahldüsen appliziert.

Die Proben für die Untersuchungen der Nullmischung SB8 und der Mischung SB6.1 mit Stahlfasern wurden mit einer Luftförderleistung von 10 m³/h appliziert. Die Mischung SB7.1-1 wurde mit einer Luftförderleistung von 12.8 m³/h und die Mischung SB7.1-2 mit 6.4 m³/h appliziert. Ausser der Mischung SB8 (Stahldüse 50 mm) wurden die Spritzbetone der Phase 2 mit der Stahldüse 40 mm appliziert.

Der Applikationsprozess wurde von einem Application Instructor for Sprayed Concrete und EFNARC-zertifizierten Düsenführer durchgeführt.

Im Firstbereich wurden Felder mit den Dimensionen 200x80 cm für die Überkopf-Applikation mittels Markierspray eingezeichnet und die Ecken mit eingepöhrten Steckisen als Hilfsmittel zur Einhaltung der Schichtdicke abgegrenzt. An der Wand wurden Felder in den Dimensionen 120x120 cm angezeichnet.

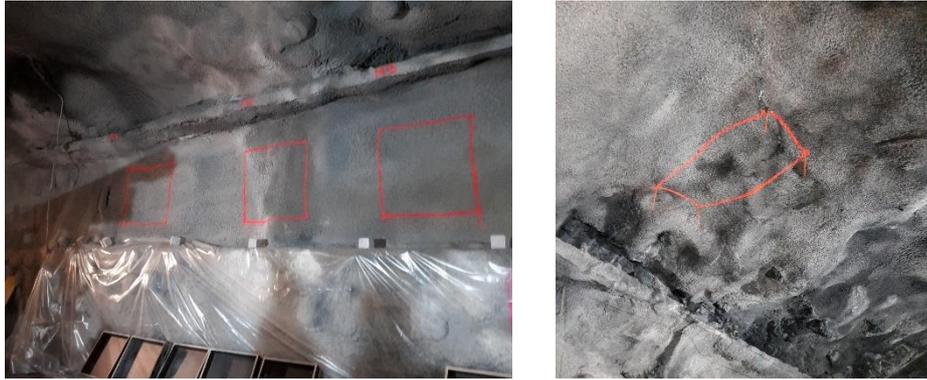


Abb.10 Versuchsfelder Wand und First

Entlang der Wand wurde eine Kunststoffolie für die Nachbehandlung der Spritzkisten montiert und die Spritzkisten in einem Winkel von rund 20° zur Senkrechten auf einer Palettenkonstruktion fixiert, um einen starren Untergrund zu schaffen und Vibrationen während des Applikationsvorgangs zu vermeiden. Der Zugang zu den Versuchsfeldern zur Entnahme der Kratzproben und Kernbohrungen erfolgte mittels einer dieselbetriebenen Scherenhebebühne.



Abb.11 Aufbau Spritzkisten und Hebebühne

Aus den Spritzfeldern am Objekt und den verschiedenen Spritzkisten wurden Prüfkörper für die Bestimmung der Druckfestigkeit 28 Tagen und Fasergehalt entnommen. Die Prüfkörper für die Druckfestigkeit wurden bis zur Prüfung im Wasser gelagert.

An den separat hergestellten Spritzkisten beim Faserspritzbeton wurde zusätzlich die Energieabsorption und der Fasergehalt bestimmt.

3 Ergebnisse

3.1 Spritzversuche Phase 1

3.1.1 Frischbetondaten Grundmischungen

Tab. 4 Frischbetondaten Grundmischungen Phase 1

Grundmischung	w/z-Wert [-]	Ausbreitmass [mm]	Luftgehalt [%]	Rohdichte [kg/m ³]	Zement Ergiebigkeit [%]
GM1	0.45	590	3.6	2319	-2
GM2	0.51	550	1.7	2329	1
GM3-1	0.44	640	2.9	2363	2
GM3-2	0.42	540	3.2	2351	0
GM4-1	0.43	540	5.2	2285	-4
GM4-2	0.41	550	6.3	2261	-5
GM5	0.43	500	2.9	2348	-1

3.1.2 Würfeldruckfestigkeiten Grundmischungen

Die Variationsbreite der 3 Würfeldruckfestigkeiten aus einer Ladung liegen zwischen 1 und 5%, ausser bei der Grundmischung GM4-2 bei 13%. Alle Einzelwerte wurden berücksichtigt, da die Anforderungen der SN EN 206 an die maximale Variationsbreite von 15% eingehalten ist.

Tab. 5 Würfeldruckfestigkeiten Grundmischungen GM1-GM5 (Mittelwerte von 3 Proben)

Grundmischung	7d Rohdichte [kg/m ³]	7d Würfeldruckfestigkeit [N/mm ²]	28d Rohdichte [kg/m ³]	28d Würfeldruckfestigkeit [N/mm ²]	Variationsbreite 28d Druckfestigkeit [%]
GM1	2327	42.3	2326	49.0	1.2
GM2	2337	34.5	2339	41.8	1.0
GM3-1			2359	50.2	5.4
GM3-2			2358	51.3	2.5
GM4-1	2274	37.8	2275	44.6	2.9
GM4-2			2267	42.7	12.6
GM5	2349	44.2	2358	50.4	4.8

3.1.3 Frühfestigkeiten Spritzbeton

Tab. 6 Frühfestigkeiten SB1 und SB2 [N/mm²]

Mischung	BE-%	6 Min	15 Min	30 Min	1h	3h	6h	12h	24h
SB1.1	6	0.12	0.18	0.27	0.44	0.90	2.7	7.1	16.2
SB1.2	8	0.15	0.24	0.33	0.49	0.91	2.9	7.7	19.0
SB2.1	6	0.04	0.04	0.07	0.13	0.32	0.73	3.3	7.3
SB2.2	8	0.09	0.17	0.19	0.23	0.54	1.7	6.2	10.8

Die Spritzbetone wurden mit Beschleunigerdosierungen 6% (x.1) und 8% (x.2) des Zementgehaltes gespritzt.

Die Frühfestigkeit wurde nur in der Phase 1 gemessen. Der relative Verlauf ist unter Berücksichtigung der Dosierungen des Beschleunigers und der w/z-Werte der Grundmischungen plausibel.

Der Bereich J2 [1] wurde nicht erreicht. Die Ursache wird in den tiefen Frischbetontemperaturen vermutet. Die Haftung des Spritzbetons war jedoch genügend für den Aufbau der Schichtstärken am Objekt.

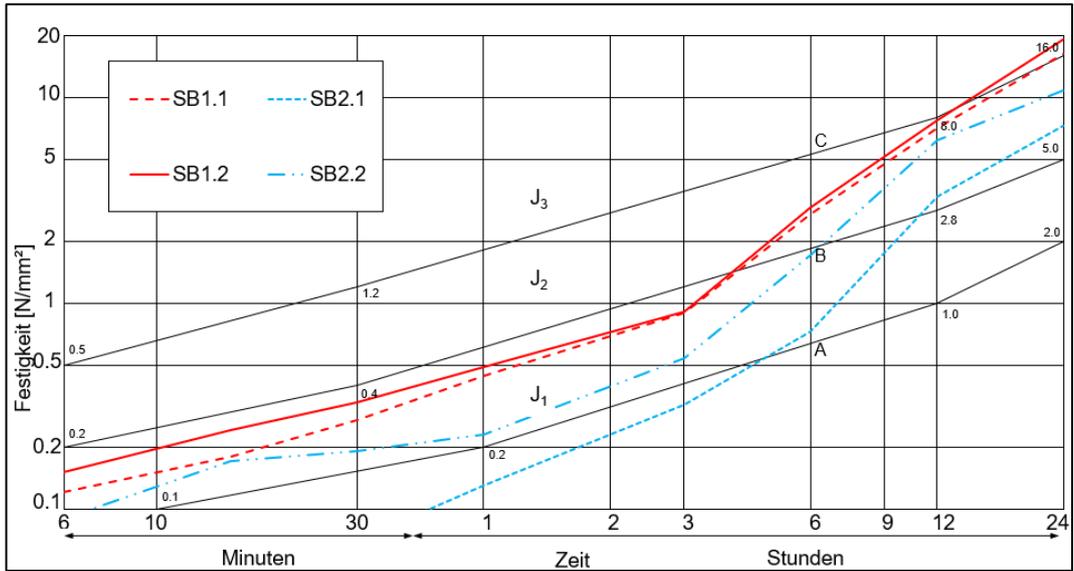


Abb.12 Verlauf der Frühfestigkeiten

Für die weiteren Versuche wurde die Beschleuniger-Dosierung von 6% des Zementgehaltes gewählt, da die Erhöhung der Beschleuniger-Dosierung die Sensibilität des Systems unnötig erhöht [16].

3.1.4 Bohrkerndruckfestigkeiten Spritzbeton

In der Phase 1 wurden pro Bereich 3 Prüfkörper (SN EN 13791) gewonnen.

Die Variationsbreite der 3 Bohrkerndruckfestigkeiten aus einer Stelle betragen beim SB1 11 bis 18%. Kein Einzelwert liegt 20% über dem Mittelwert (SN EN 14487-1, 7.5.1.2), deshalb wurden alle Werte beim Mittelwert berücksichtigt.

Tab. 7 Druckfestigkeiten Spritzbeton SB1 (Mittelwerte von 3 Proben)

Entnahme aus	Lagerung	7d	7d	28d	28d	Variationsbreite 28d Druckfestigkeit [%]
		Rohdichte [kg/m³]	Bohrkernfestigkeit [N/mm²]	Rohdichte [kg/m³]	Bohrkernfestigkeit [N/mm²]	
Spritzkiste 80	Feucht	2218	28.4	2232	36.9	17.6
Wand	Feucht	2280	31.3	2276	36.9	11.1

Die Variationsbreite der 3 Bohrkerndruckfestigkeiten aus einer Stelle betragen beim SB2 7 bis 20%. Kein Einzelwert liegt 20% über dem Mittelwert (SN EN 14487-1, 7.5.1.2), deshalb wurden alle Werte beim Mittelwert berücksichtigt.

Tab. 8 Druckfestigkeiten Spritzbeton SB2 (Mittelwerte von 3 Proben)

Entnahme aus	Lagerung	7d	7d	28d	28d	Variationsbreite 28d Druckfestigkeit [%]
		Rohdichte [kg/m³]	Bohrkernfestigkeit [N/mm²]	Rohdichte [kg/m³]	Bohrkernfestigkeit [N/mm²]	
Spritzkiste 80	Feucht	2249	29.9	2275	33.0	6.7
Wand	Feucht	2269	27.1	2278	32.7	19.6

Die Variationsbreite der 3 Bohrkerndruckfestigkeiten aus einer Stelle betragen beim SB3 2 bis 14%. Kein Einzelwert liegt 20% über dem Mittelwert (SN EN 14487-1, 7.5.1.2), deshalb wurden alle Werte beim Mittelwert berücksichtigt.

Tab. 9 Druckfestigkeiten Spritzbeton SB3 (Mittelwerte von 3 Proben)

Entnahme aus	Lagerung	7d		28d		Variationsbreite 28d Druckfestigkeit [%]
		Rohdichte [kg/m ³]	Bohrkern - festigkeit [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]	Bohrkern - festigkeit [N/mm ²]	
Spritzkiste 50	Feucht			2244	33.3	3.9
	Wasser			2283	36.8	13.6
Spritzkiste 80	Feucht			2289	38.9	1.5
	Wasser			2322	40.1	6.5
Spritzkiste 100	Feucht	2284	36.8	2288	39.3	3.1
	Wasser			2322	40.7	7.1
Wand	Feucht			2280	42.1	4.8
	Wasser			2284	40.5	12.1
	Objekt			2310	41.3	12.3
First	Feucht			2290	37.7	12.5
	Wasser			2305	39.0	9.5
	Objekt			2273	36.2	1.9

Die Variationsbreite der 3 Bohrkerndruckfestigkeiten aus einer Stelle betragen beim SB4 1 bis 19%. Kein Einzelwert liegt 20% über dem Mittelwert (SN EN 14487-1, 7.5.1.2), deshalb wurden alle Werte beim Mittelwert berücksichtigt.

Tab. 10 Druckfestigkeiten Spritzbeton SB4 (Mittelwerte von 3 Proben)

Entnahme aus	Lagerung	7d		28d		Variationsbreite 28d Druckfestigkeit [%]
		Rohdichte [kg/m ³]	Bohrkern - festigkeit [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]	Bohrkern - festigkeit [N/mm ²]	
Spritzkiste 50	Feucht			2313	41.0	2.4
	Wasser			2277	40.5	15.8
Spritzkiste 80	Feucht			2271	36.7	8.4
	Wasser			2290	43.3	9.5
Spritzkiste 80/13	Feucht			2280	36.5	13.2
	Wasser			2241	38.6	18.7
Spritzkiste 100	Feucht	2275	29.3	2274	35.4	7.1
	Wasser			2282	40.3	4.2
Wand	Feucht			2223	37.5	11.7
	Wasser			2263	42.4	0.7
	Objekt			2229	35.5	14.1
Wand/13	Feucht			2246	37.2	9.7
	Wasser			2255	38.1	7.9
	Objekt			2228	31.4	7.3
First	Feucht			2263	37.6	10.1
	Wasser			2246	36.2	15.7
	Objekt			2265	30.9	13.3
First/13	Feucht			2204	30.6	3.3
	Wasser			2246	38.4	6.3
	Objekt			2209	30.3	0.7

Die Variationsbreite der 3 Bohrkerndruckfestigkeiten aus einer Stelle betragen beim SB5 2 bis 17%. Kein Einzelwert liegt 20% über dem Mittelwert (SN EN 14487-1, 7.5.1.2), deshalb wurden alle Werte beim Mittelwert berücksichtigt.

Tab. 11 Druckfestigkeiten Spritzbeton SB5 (Mittelwerte von 3 Proben)

Entnahme aus	Lagerung	7d		28d		Variationsbreite 28d Druckfestigkeit [%]
		Rohdichte [kg/m ³]	Bohrkern - festigkeit [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]	Bohrkern - festigkeit [N/mm ²]	
Spritzkiste 50	Feucht			2295	37.1	10.2
	Wasser			2319	40.5	3.2
Spritzkiste 80	Feucht			2277	38.1	2.4
	Wasser			2309	37.0	12.4
Spritzkiste 100	Feucht	2265	29.7	2263	36.7	4.6
	Wasser			2325	36.8	9.2
Wand	Feucht	2260	31.3	2259	40.0	7.5
	Wasser			2281	38.5	13.0
	Objekt	2268	34.0	2248	39.9	16.8
First	Feucht			2289	34.5	8.1
	Wasser			2270	35.1	10.3
	Objekt			2247	38.7	11.1

3.1.5 Wasserleitfähigkeiten

Tab. 12 Wasserleitfähigkeiten

Mischung	Entnahme aus	Lagerung	Wasserleitfähigkeit q _{w,d200} [g/m ² h]
SB3-1	Spritzkiste 50	Wasser	13
	Spritzkiste 80	Wasser	6
	Spritzkiste 100	Wasser	7
GM3-2	Würfel	Wasser	6
SB3-2	Wand	Wasser	6
	First	Wasser	8
GM4-1	Würfel	Wasser	6
SB4-1	Spritzkiste 50	Wasser	6
	Spritzkiste 80	Wasser	8
	Spritzkiste 80/13	Wasser	9
	Spritzkiste 100	Wasser	6
SB4-2	Wand	Wasser	9
	Wand/13	Wasser	6
	First	Wasser	9
GM5-1	Würfel	Wasser	6
SB5-1	Spritzkiste 50	Wasser	10
	Spritzkiste 80	Wasser	6
	Spritzkiste 100	Wasser	8
	Wand	Wasser	6
	First	Wasser	7

3.1.6 Fasergehalt und Energieabsorption

Tab. 13 Fasergehalte und Verluste GM3, SB3; Soll 32 kg/m³

Mischung	Entnahme aus	Probe 1 [kg/m ³]	Probe 2 [kg/m ³]	Probe 3 [kg/m ³]	Mittelwert [kg/m ³]	Verlust [%]
GM3-1	Würfel	32.3	28.6	35.1	32	0
SB3-1	Spritzkiste 50	13.3	9.1	8.7	10	69
	Spritzkiste 80	9.2	15.3	10.0	12	63
	Spritzkiste 100	11.7	10.3	10.6	11	66
GM3-2	Würfel	25.3	26.1	31.5	28	13
SB3-2	Wand	11.0	11.9	11.7	12	63
	First	11.4	14.3	11.8	13	59

Tab. 14 Fasergehalte und Verluste GM4, SB4; Soll 5 kg/m³

Mischung	Entnahme aus	Probe 1 [kg/m ³]	Probe 2 [kg/m ³]	Probe 3 [kg/m ³]	Mittelwert [kg/m ³]	Verlust [%]
GM4-1	Würfel	4.4	4.2	4.4	4.3	14
SB4-1	Spritzkiste 50	2.7	2.9	3.2	2.9	42
	Spritzkiste 80	2.6	2.6	1.3	2.2	56
	Spritzkiste 80/13	3.3	3.6	4.3	3.7	26
	Spritzkiste 100	2.0	3.0	2.0	2.3	54
GM4-2	Würfel	4.8	5.4	4.8	5.0	0
SB4-2	Wand	1.6	2.5	2.9	2.3	54
	Wand 13	4.0	3.3	3.6	3.6	28
	First	2.0	2.1	2.3	2.1	58
	First 13	3.1	2.1	3.2	2.8	44

Tab. 15 SB3 Stahlfasergehalte Soll 32 kg/m³ und Energieabsorption

Mischung	Entnahme aus	Fasergehalt [kg/m ³]	Faserverlust [%]	Energieabsorption bei 25 mm [J]
SB3-1	Spritzkiste 80-1	9.2	71	467
	Spritzkiste 80-2	15.3	52	882
	Spritzkiste 80-3	10.0	63	590
SB3-1	Spritzkiste 100-1	11.7	63	811
	Spritzkiste 100-2	10.3	68	726
	Spritzkiste 100-3	10.6	67	605

Tab. 16 SB4 Polymerfasergehalte Soll 5 kg/m³ und Energieabsorption

Mischung	Entnahme aus	Fasergehalt [kg/m ³]	Faserverlust [%]	Energieabsorption bei 25 mm [J]
SB4-1	Spritzkiste 80-1	2.6	48	556
	Spritzkiste 80-2	2.6	48	536
	Spritzkiste 80-3	1.3	74	393
SB4-1	Spritzkiste 80/13-1	3.3	34	616
	Spritzkiste 80/13-2	3.6	28	633
	Spritzkiste 80/13-3	4.3	14	720
SB4-1	Spritzkiste 100-1	2.0	60	383
	Spritzkiste 100-2	3.0	40	350 ¹⁾
	Spritzkiste 100-3	2.0	60	431

¹⁾Platte mit vorgängigem Riss, bei Auswertungen nicht berücksichtigt

3.2 Spritzversuche Phase 2

3.2.1 Frischbetondaten Grundmischungen

Tab. 17 Frischbetondaten Grundmischungen Phase 2

Grundmischung	w/z-Wert [-]	Ausbreitmass [mm]	Luftgehalt [%]	Rohdichte [kg/m ³]	Zement Ergiebigkeit [%]
GM6 ¹⁾	0.42	500	7.2	2251	-6
GM6.1	0.43	450	5.2	2300	-5
GM7	0.46	470	3.7	2299	-10
GM7.1-1	0.49	490	4.1	2298	-2
GM7.1-2	0.49	490	4.4	2297	-3
GM8	0.46	490	3.8	2307	-4

¹⁾CEM II/A-LL

3.2.2 Würfeldruckfestigkeiten Grundmischungen

Die Variationsbreite der 3 Würfeldruckfestigkeiten aus einer Ladung liegen, zwischen 1 und 4%, Alle Einzelwerte wurden berücksichtigt, da die Anforderungen der SN EN 206 an die maximale Variationsbreite von 15% eingehalten ist.

Tab. 18 Würfeldruckfestigkeiten Grundmischungen GM6-GM8 (Mittelwerte von 3 Proben)

Grundmischung	7d Rohdichte [kg/m ³]	7d Würfeldruckfestigkeit [N/mm ²]	28d Rohdichte [kg/m ³]	28d Würfeldruckfestigkeit [N/mm ²]	Variationsbreite 28d Druckfestigkeit [%]
GM6.1			2339	72.4	3.0
GM7			2322	66.4	3.9
GM7.1-1			2297	63.6	3.1
GM7.1.-2			2286	63.4	2.8
GM8			2329	67.0	0.9

3.2.3 Bohrkerndruckfestigkeiten Spritzbeton

In der Phase 2 wurden pro Bereich 5 Prüfkörper (SN EN 14487-1) gewonnen.

Die SN EN 14487-1 fordert in Ziffer 7.5.1.2 Druckfestigkeit:

Wenn der Wert von einem oder zwei Bohrkernen höher als ± 20 % des durchschnittlichen Wertes ist, ist (sind) das (die) Ergebnis(se) der Berechnung zu verwerfen, sofern der Durchschnitt an mindestens drei Bohrkernen ermittelt wurde.

Bis auf 3 Serien beim SB 7.1 erfüllten alle Serien diese Anforderung. Die betroffenen Werte der Serien SB 7.1 wurden verworfen und die Mittelwerte aus 4 Werten berechnet.

Die Variationsbreite der 5 Bohrkerndruckfestigkeiten aus einer Stelle betragen beim SB6 7 bis 18%. Kein Einzelwert liegt 20% über dem Mittelwert (SN EN 14487-1, 7.5.1.2), deshalb wurden alle Werte beim Mittelwert berücksichtigt.

Tab. 19 Druckfestigkeiten Spritzbeton SB6 (Mittelwerte von 5 Proben)

Entnahme aus	Lagerung	7d Rohdichte [kg/m ³]	7d Bohrkernfestigkeit [N/mm ²]	28d Rohdichte [kg/m ³]	28d Bohrkernfestigkeit [N/mm ²]	Variationsbreite 28d Druckfestigkeit [%]
Wand	Wasser			2278	38.7	6.5
	Objekt			2281	24.6	17.5

Die Variationsbreite der 5 Bohrkerndruckfestigkeiten aus einer Stelle betragen beim SB6 1 4 bis 16%. Kein Einzelwert liegt 20% über dem Mittelwert (SN EN 14487-1, 7.5.1.2), deshalb wurden alle Werte beim Mittelwert berücksichtigt.

Tab. 20 Druckfestigkeiten Spritzbeton SB6.1 (Mittelwerte von 5 Proben)

Entnahme aus	Lagerung	7d	7d	28d	28d	Variationsbreite 28d Druckfestigkeit [%]
		Rohdichte [kg/m ³]	Bohrkernfestigkeit [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]	Bohrkernfestigkeit [N/mm ²]	
Spritzkiste 50	Wasser			2280	48.2	16.2
Spritzkiste 80	Wasser			2270	48.4	7.6
Spritzkiste 100	Wasser			2271	51.3	4.1
Wand	Wasser			2304	53.1	13.9
	Objekt			2271	37.4	9.1
First	Wasser			2294	54.7	9.0
	Objekt			2280	28.9	13.8

Die Variationsbreite der 5 Bohrkerndruckfestigkeiten aus einer Stelle betragen beim SB7 4 bis 32%. Kein Einzelwert liegt 20% über dem Mittelwert (SN EN 14487-1, 7.5.1.2), deshalb wurden alle Werte beim Mittelwert berücksichtigt.

Tab. 21 Druckfestigkeiten Spritzbeton SB7 (Mittelwerte von 5 Proben)

Entnahme aus	Lagerung	7d	7d	28d	28d	Variationsbreite 28d Druckfestigkeit [%]
		Rohdichte [kg/m ³]	Bohrkernfestigkeit [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]	Bohrkernfestigkeit [N/mm ²]	
Spritzkiste 80	Wasser			2281	46.5	18.1
Wand	Wasser			2241	49.7	32.4
	Objekt			2236	40.0	4.8

Die Variationsbreite der 5 Bohrkerndruckfestigkeiten aus einer Stelle betragen beim SB7.1-1 15 bis 26%. Ein Einzelwert liegt bei einer Serie (Spritzkiste 80) 20% über dem Mittelwert (SN EN 14487-1, 7.5.1.2). Der Wert wurde verworfen und der Mittelwert der Serie aus 4 Werten berechnet.

Tab. 22 Druckfestigkeiten Spritzbeton SB7.1-1 (Mittelwerte von 5 Proben)

Entnahme aus	Lagerung	7d	7d	28d	28d	Variationsbreite 28d Druckfestigkeit [%]
		Rohdichte [kg/m ³]	Bohrkernfestigkeit [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]	Bohrkernfestigkeit [N/mm ²]	
Spritzkiste 50	Wasser			2277	46.1	18.0
Spritzkiste 80	Wasser			2262	48.2 (45.4 ¹⁾)	25.7 (44.7 ¹⁾)
Spritzkiste 100	Wasser			2295	45.4	14.5
Wand	Wasser			2318	53.2	24.4
	Objekt			2226	46.8	14.7

¹⁾In Klammern alle Werte ohne die Verworfenen

Die Variationsbreite der 5 Bohrkerndruckfestigkeiten aus einer Stelle betragen beim SB7.1-2 14 bis 27%. Ein Einzelwert lag bei zwei Serien (Wand Lagerung Objekt, Spritzkiste 100) 20% über dem Mittelwert (SN EN 14487-1, 7.5.1.2). Diese Werte wurden verworfen und der Mittelwert der Serien aus 4 Werten berechnet.

Tab. 23 Druckfestigkeiten Spritzbeton SB7.1-2 (Mittelwerte von 5 Proben)

Entnahme aus	Lagerung	7d	7d	28d	28d	Variationsbreite 28d Druckfestigkeit [%]
		Rohdichte [kg/m ³]	Bohrkernfestigkeit [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]	Bohrkernfestigkeit [N/mm ²]	
Spritzkiste 50	Wasser			2265	48.1	17.0
Spritzkiste 80	Wasser			2286	50.2	21.7
Spritzkiste 100	Wasser			2278	45.7 (43.4 ¹⁾)	23.9 (38.7 ¹⁾)
Wand	Wasser			2288	50.8	27.4
	Objekt			2228	35.5 (37.7 ¹⁾)	13.5 (33.7 ¹⁾)

¹⁾In Klammern alle Werte ohne die Verworfenen

Die Variationsbreite der 5 Bohrkerndruckfestigkeiten aus einer Stelle betragen beim SB8 5 bis 26%. Kein Einzelwert liegt 20% über dem Mittelwert (SN EN 14487-1, 7.5.1.2), deshalb wurden alle Werte beim Mittelwert berücksichtigt.

Tab. 24 Druckfestigkeiten Spritzbeton SB8 (Mittelwerte von 5 Proben)

Entnahme aus	Lagerung	7d	7d	28d	28d	Variationsbreite 28d Druckfestigkeit [%]
		Rohdichte [kg/m ³]	Bohrkernfestigkeit [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]	Bohrkernfestigkeit [N/mm ²]	
Spritzkiste 50	Wasser			2290	50.6	10.1
Spritzkiste 80	Wasser			2230	45.8	16.2
Spritzkiste 100	Wasser			2274	45.2	12.4
Wand	Wasser			2302	53.6	4.5
	Objekt			2272	31.6	11.7
First	Wasser			2259	47.2	4.9
	Objekt			2284	42	25.7

Beim SB8 wurde eine Druckfestigkeit aus der Wand nach 113 Tagen gebohrt und am nächsten Tag geprüft.

Tab. 25 Druckfestigkeiten Spritzbeton SB8 (Mittelwerte von 5 Proben)

Entnahme aus	Lagerung	114d Rohdichte [kg/m ³]	114d Bohrkernfestigkeit [N/mm ²]	Variationsbreite 28d Druckfestigkeit [%]
Wand	Objekt	2265	46.1	16.1

3.2.4 Fasergehalt und Energieabsorption

Tab. 26 Stahlfasergehalte und Verluste GM6, SB6; Soll 32 kg/m³

Mischung	Entnahme aus	Probe 1 [kg/m ³]	Probe 2 [kg/m ³]	Probe 3 [kg/m ³]	Mittelwert [kg/m ³]	Verlust [%]
GM6 ¹⁾	Fahrmischer	30.3	29.9	29.9	30.0	6
SB6	Wand Kratzprobe	15.9	14.2 ²⁾	17.7 ³⁾	15.9	50
	Wand Bohrkern	14.5			14.5	55

¹⁾Mischung mit CEM II/A-LL

²⁾auf Stahldüse 50 mm gewechselt

³⁾mit Stahldüse 50 mm und Luftförderleistung auf 5 m³/h reduziert

Tab. 27 *Stahlfasergehalte und Verluste GM6.1, SB6.1; Soll 32 kg/m³*

Mischung	Entnahme aus	Probe	Probe	Probe	Mittelwert	Verlust
		1/4	2/5	3/6		
		[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[%]
GM6.1	Fahrmischer	30.7	28.2	30.0	29.6	7
		29.4	30.0	29.4		
SB6.1	Wand Kratzprobe	20.9			20.9	35
	Wand Bohrkern	20.4			20.4	36
SB6.1 5m3	Wand Kratzprobe	17.6			17.6	45
SB6.1	First Bohrkern	17.4			17.4	46
	Spritzkiste 50 Kratzprobe	20.0			20.0	37
	Spritzkiste 50 Bohrkern	21.9			21.9	32
	Spritzkiste 80 Kratzprobe	19.8			19.8	38
	Spritzkiste 100 Kratzprobe	27.2			27.2	15

Bei einigen Spritzkisten bzw. Prüfplatten wurde der Fasergehalt nach der Bestimmung der Energieabsorption detaillierter bestimmt. In der Tab. 28, Tab. 30, Tab. 32 und Tab. 33 sind Prüfplatten ausgewiesen, bei denen der Fasergehalt im Bereich der Risse nach der Prüfung der Energieabsorption und in der restlichen Prüfplatte bestimmt wurde (siehe Kapitel 2.2).

Tab. 28 *Stahlfasergehalte und Verluste SB6.1; Soll 32 kg/m³*

Mischung	Fasergehalte	Bereich	restliche	Mittelwert gesamte	Verlust
		Riss	Prüfplatte	Prüfplatte	
		[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[%]
SB6.1	Spritzkiste 80-1	20.8	20.9	20.9	35
	Spritzkiste 80-2			19.5	39
	Spritzkiste 80-3			23.1	28
SB6.1	Spritzkiste 100-1			22.6	30
	Spritzkiste 100-2	23.7	23.0	23.2	28
	Spritzkiste 100-3	21.9	21.4	21.6	33

Die Spritzkiste SB6.1 100-1 wurde in Sektoren geteilt und die Prüfplatte für die Bestimmung der Energieabsorption aus der Platte gewonnen. Nach der Prüfung der Energieabsorption wurde Fasergehalt der einzelnen Rasterfelder der Prüfplatte und der Randabschnitte der Spritzkiste bestimmt (siehe Abb. 13.).

Der Fasergehalt der grau markierten Prüfplatte SB6.1 100-1 beträgt 22.6 kg/m³.

26.2	24.2	22.2	
	23.7	22.2	18.3
28.0	20.5	24.0	22.8
	23.4	24.3	23.8
24.5	20.6	22.5	

Abb. 13 *SB6.1 Spritzkiste 100-1, Fasergehalte pro Rasterfeld in kg/m³, Prüfplatte grau markiert, Raster in Prüfplatte 20x20 cm*

Um den sehr hohen Aufwand für die Bestimmung der Fasergehalte der vollständigen Rasterfelder zu reduzieren, wurde bei der Spritzkiste SB6.1 80-2 pro Rasterfeld ein Bohrkern \varnothing 100 mm untersucht.

Der Fasergehalt der grau markierten Prüfplatte SB6.1 80-2 beträgt 19.5 kg/m^3

27.2	27.1	28.0	25.6	29.0
23.7	17.9	21.6	20.2	33.2
22.3	17.9	22.4	19.6	25.1
17.1	16.6	23.3	16.2	21.4
31.7	22.8	18.1	20.8	30.2

Abb.14 Spritzkiste SB6.1 80-2, pro Rasterfeld 1 Bohrkern \varnothing 100 mm Fasergehalte in kg/m^3 , Prüfplatte grau markiert, Raster in Prüfplatte $20 \times 20 \text{ cm}$

Tab. 29 Polymerfasergehalte und Verluste GM7, SB7; Soll 5 kg/m^3

Mischung	Entnahme aus	Probe 1 [kg/m^3]	Probe 2 [kg/m^3]	Probe 3 [kg/m^3]	Mittelwert [kg/m^3]	Verlust [%]
GM7	Fahrmischer	6.8	5.5		6.2	-23
SB7	Wand Kratzprobe	3.2			3.2	36
SB7	Wand Bohrkern	3.3			3.3	34
SB7	Spritzkiste 80 Kratzprobe	2.3			2.3	53

Tab. 30 Polymerfasergehalte und Verluste SB7; Soll 5 kg/m^3

Mischung	Fasergehalte	Bereich Riss [kg/m^3]	restliche Prüfplatte [kg/m^3]	Mittelwert gesamte Prüfplatte [kg/m^3]	Verlust [%]
SB7	Spritzkiste 80-1			4.6	8
	Spritzkiste 80-2	4.2	4.5	4.4	12
	Spritzkiste 80-3			4.8	4

Tab. 31 Polymerfasergehalte und Verluste GM7.1-1, SB7.1-1; Soll 5 kg/m^3

Mischung	Entnahme aus	Probe 1/4 [kg/m^3]	Probe 2/5 [kg/m^3]	Probe 3/6 [kg/m^3]	Mittelwert [kg/m^3]	Verlust [%]
GM7.1-1	Fahrmischer	5.6 5.1	5.4	5.2	5.3	-6
SB7.1-1	Wand Kratzprobe	4.3			4.3	13
	Wand Bohrkern	4.1			4.1	18
	Spritzkiste 50 Kratzprobe	4.3			4.3	14
	Spritzkiste 50 Bohrkern	5.3			5.3	-6
	Spritzkiste 80 Kratzprobe	4.5			4.5	10
	Spritzkiste 100 Kratzprobe	4.6			4.6	7

Tab. 32 Polymerfasergehalte und Verluste SB7.1-1; Soll 5 kg/m³

Mischung	Fasergehalte	Bereich Riss [kg/m ³]	restliche Prüfplatte [kg/m ³]	Mittelwert gesamte Prüfplatte [kg/m ³]	Verlust [%]
SB7.1-1	Spritzkiste 80-1			4.7	7
	Spritzkiste 80-2	5.3	4.8	5.1	-2
	Spritzkiste 80-3	4.7	4.9	4.8	4
SB7.1-1	Spritzkiste 100-1			4.2	16
	Spritzkiste 100-2	3.9	3.8	3.9	22
	Spritzkiste 100-3			4.4	12

Bei der Spritzkiste SB7.1-1 80-1 wurde pro Rasterfeld ein Bohrkern Ø 100 mm untersucht. Der Fasergehalt der grau markierten Prüfplatte SB6.1 80-2 beträgt 4.7 kg/m³

10.0	6.9	7.1	6.5	6.8
7.1	4.2	6.0	4.5	4.3
5.3	5.8	4.8	4.4	6.8
7.4	3.6	4.3	4.4	6.9
6.7	5.5	4.7	4.5	6.4

Abb. 15 Spritzkiste SB7.1-1 80-1, pro Rasterfeld 1 Bohrkern Ø 100 mm Fasergehalte in kg/m³, Prüfplatte grau markiert, Raster in Prüfplatte 20x20 cm**Tab. 33** Polymerfasergehalte und Verluste GM7.1-2, SB7.1-2; Soll 5 kg/m³

Mischung	Entnahme aus	Probe 1/4 [kg/m ³]	Probe 2/5 [kg/m ³]	Probe 3/6 [kg/m ³]	Mittelwert [kg/m ³]	Verlust [%]
GM7.1-2	Fahrmischer	4.9 4.7	4.7	4.7	4.8	5
SB7.1-2	Wand Kratzprobe	3.6			3.6	28
	Wand Bohrkern	3.2			3.2	36
	Spritzkiste 50 Kratzprobe	4.7			4.7	6
	Spritzkiste 50 Bohrkern	5.2			5.2	-4
	Spritzkiste 80 Kratzprobe	4.5			4.5	10
	Spritzkiste 100 Kratzprobe	3.8			3.8	23

Tab. 34 Polymerfasergehalte und Verluste SB7.1-2; Soll 5 kg/m³

Mischung	Fasergehalte	Bereich Riss [kg/m ³]	restliche Prüfplatte [kg/m ³]	Mittelwert gesamte Prüfplatte [kg/m ³]	Verlust [%]
SB7.1-2	Spritzkiste 80-1			4.0	20
	Spritzkiste 80-2	3.8	4.6	4.2	16
	Spritzkiste 80-3			4.0	20
SB7.1-2	Spritzkiste 100-1	4.9	4.1	4.4	12
	Spritzkiste 100-2	5.1	4.3	4.6	8
	Spritzkiste 100-3	4.4	3.5	3.9	22

Tab. 35 SB6.1 *Stahlfasergehalte Soll 32 kg/m³ und Energieabsorption*

Mischung	Entnahme aus	Fasergehalt [kg/m ³]	Faserverlust [%]	Energieabsorption bei 25 mm [J]
SB6.1	Spritzkiste 80-1	20.9	35	932
	Spritzkiste 80-2	19.5	39	819
	Spritzkiste 80-3	23.1	28	818
SB6.1	Spritzkiste 100-1	22.6	30	989
	Spritzkiste 100-2	23.2	28	890
	Spritzkiste 100-3	21.6	33	826

Tab. 36 SB7 *Polymerfasergehalte Soll 5 kg/m³ und Energieabsorption*

Mischung	Entnahme aus	Fasergehalt [kg/m ³]	Faserverlust [%]	Energieabsorption bei 25 mm [J]
SB7	Spritzkiste 80-1	4.6	8	792
	Spritzkiste 80-2	4.4	12	767
	Spritzkiste 80-3	4.8	4	659

Tab. 37 SB7-1-1 *Polymerfasergehalte Soll 5 kg/m³ und Energieabsorption*

Mischung	Entnahme aus	Fasergehalt [kg/m ³]	Faserverlust [%]	Energieabsorption bei 25 mm [J]
SB7-1-1	Spritzkiste 80-1	4.7	7	778
	Spritzkiste 80-2	5.1	-2	831
	Spritzkiste 80-1	4.8	4	1009
SB7-1-1	Spritzkiste 100-1	4.2	16	801
	Spritzkiste 100-2	3.9	22	950
	Spritzkiste 100-3	4.4	12	738

Tab. 38 SB7-1-2 *Polymerfasergehalte Soll 5 kg/m³ und Energieabsorption*

Mischung	Entnahme aus	Fasergehalt [kg/m ³]	Faserverlust [%]	Energieabsorption bei 25 mm [J]
SB7-1-2	Spritzkiste 80-1	4.0	20	788
	Spritzkiste 80-2	4.2	16	751
	Spritzkiste 80-1	4.0	20	663
SB7-1-2	Spritzkiste 100-1	4.4	12	643
	Spritzkiste 100-2	4.6	8	576
	Spritzkiste 100-3	3.9	22	755

4 Diskussion

4.1 Wiederholbarkeit der Versuche

In der Phase 2 wurde gegenüber der Phase 1 die Grundmischungen in einem anderen Betonwerk hergestellt, ein anderes Spritzgerät und ein anderer Düsenführer eingesetzt. Mit denselben Ausgangsstoffen wie in Phase 1, inklusive dem Zement CEM II/A-LL, wurde am ersten Versuchstag der Phase 2 der Spritzbeton SB6 appliziert. Aufgrund der erneut hohen Faserverluste wie in Phase 1 wurden die Versuche anschliessend abgebrochen.

Eine Serie der Druckfestigkeit aus der Wand vom SB6 wurde dennoch bestimmt.

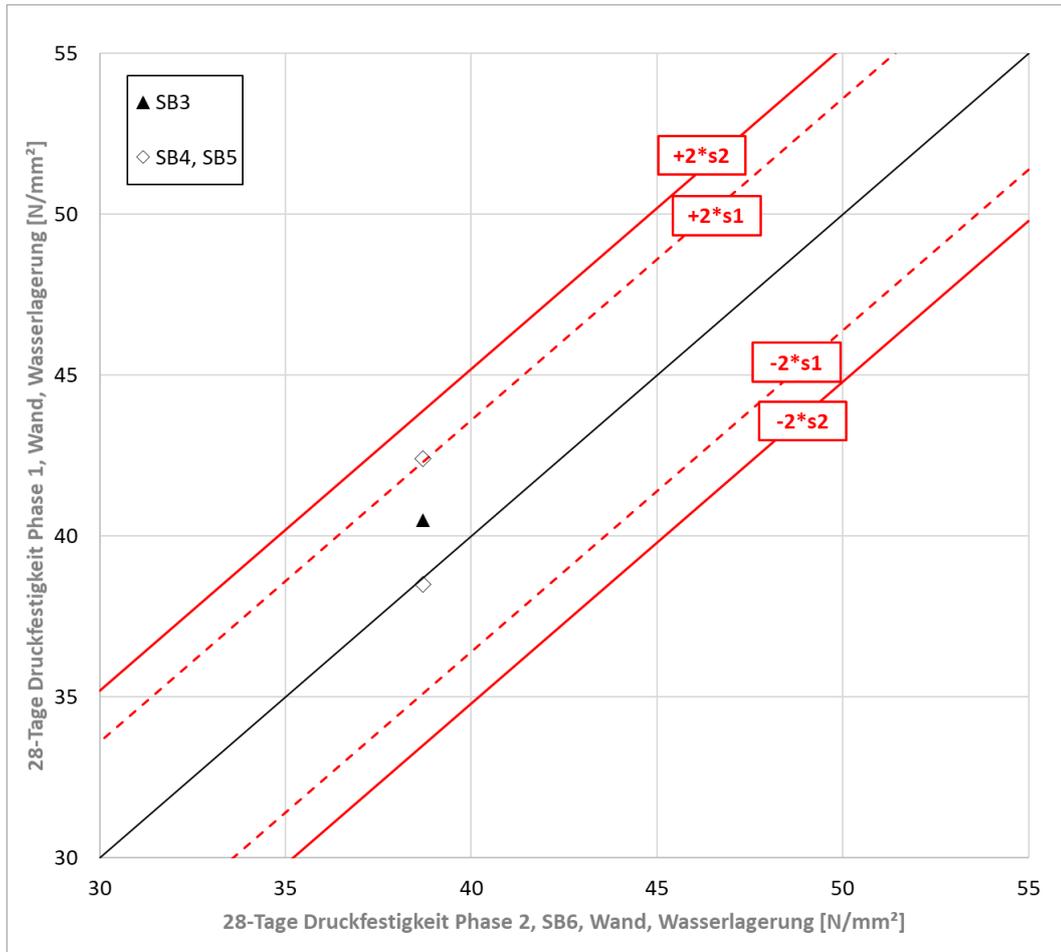


Abb. 16 Vergleich des Spritzbetons SB6 der Phase 2 mit den Spritzbetonen aus Phase 1 (Bohrkerne aus der Wand, Lagerung im Wasser bis zur Prüfung)

Die Standardabweichung innerhalb einer Prüfserie beträgt in den Versuchen im Mittel 1.8 ($=s1$) bis 2.6 N/mm² ($=s2$), siehe auch Kapitel 4.2.3. In der Abb. 16 sind die Resultate der Druckfestigkeiten der beiden Phasen verglichen.

Mit Sicherheit können die Druckfestigkeiten aus den beiden Phasen nicht unterschieden werden, da die Werte weniger als 2-mal die Standardabweichung auseinander liegen.

Die Fasergehalte der vergleichbaren Grundmischungen SB3 und SB6 sind in der *Abb.17* dargestellt.

Im Mittel liegt die Standardabweichung bei der Fasergehaltsbestimmung in diesen Versuchen am Spritzbeton bei 17% des Mittelwertes.

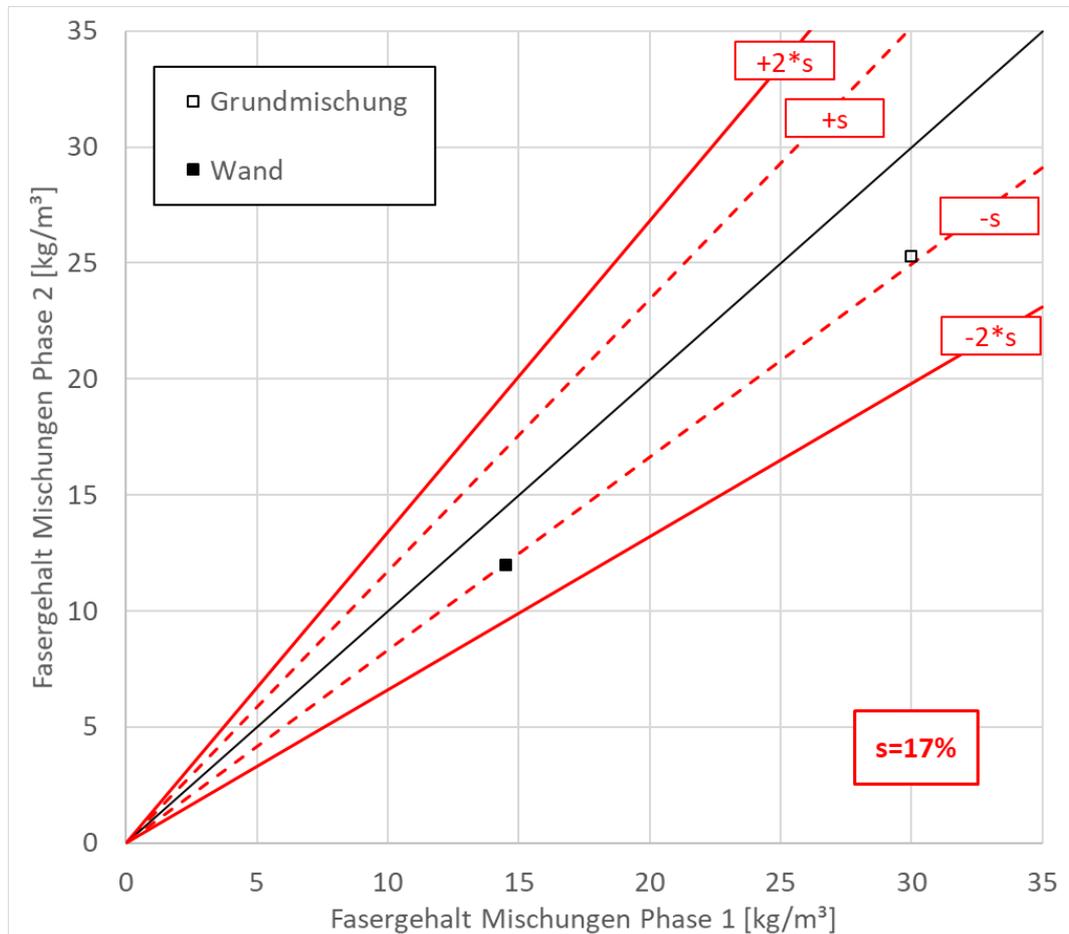


Abb.17 Vergleich des Spritzbetons SB6 Phase 2 mit den Spritzbeton SB3 Phase 1

Die Fasergehalte in den Grundmischungen und in den Spritzbetonen (Prüfkörper aus der Wand) der beiden Phasen lassen sich nicht mit Sicherheit unterscheiden.

Der Vergleich der Druckfestigkeiten und Fasergehalte der Spritzbetone SB3 und SB6 zeigen, dass die Versuche wiederholbar sind und auf andere Herstell- und Verarbeitungsbedingungen übertragen werden können.

4.2 Druckfestigkeit

4.2.1 Vergleich Wasserlagerung und Feuchtraumlagerung

In der Phase 1 wurden die Prüfkörper für die Bestimmung der Bohrkerndruckfestigkeit nach der Entnahme nach 2 Tagen bis zur Prüfung nach 28 Tagen zum Vergleich in Wasser und im Feuchtraum gelagert. Die Feuchtraumlagerung entspricht den Anforderungen der SN 12390-2 NA Ziffer 5.5.2 ($20\pm 2^\circ\text{C}$, Luftfeuchte $\geq 95\%$).

Tendenziell liegen die Druckfestigkeiten der Prüfkörper der Wasserlagerung über den Druckfestigkeiten der Prüfkörper der Feuchtraumlagerung. Mit Sicherheit können die Druckfestigkeiten aus den beiden Lagerungsarten bis zur Prüfung nicht unterschieden werden. Die Unterschiede bei den Druckfestigkeiten an Prüfkörpern aus den Spritzkisten 50 sind jedoch tendenziell grösser.

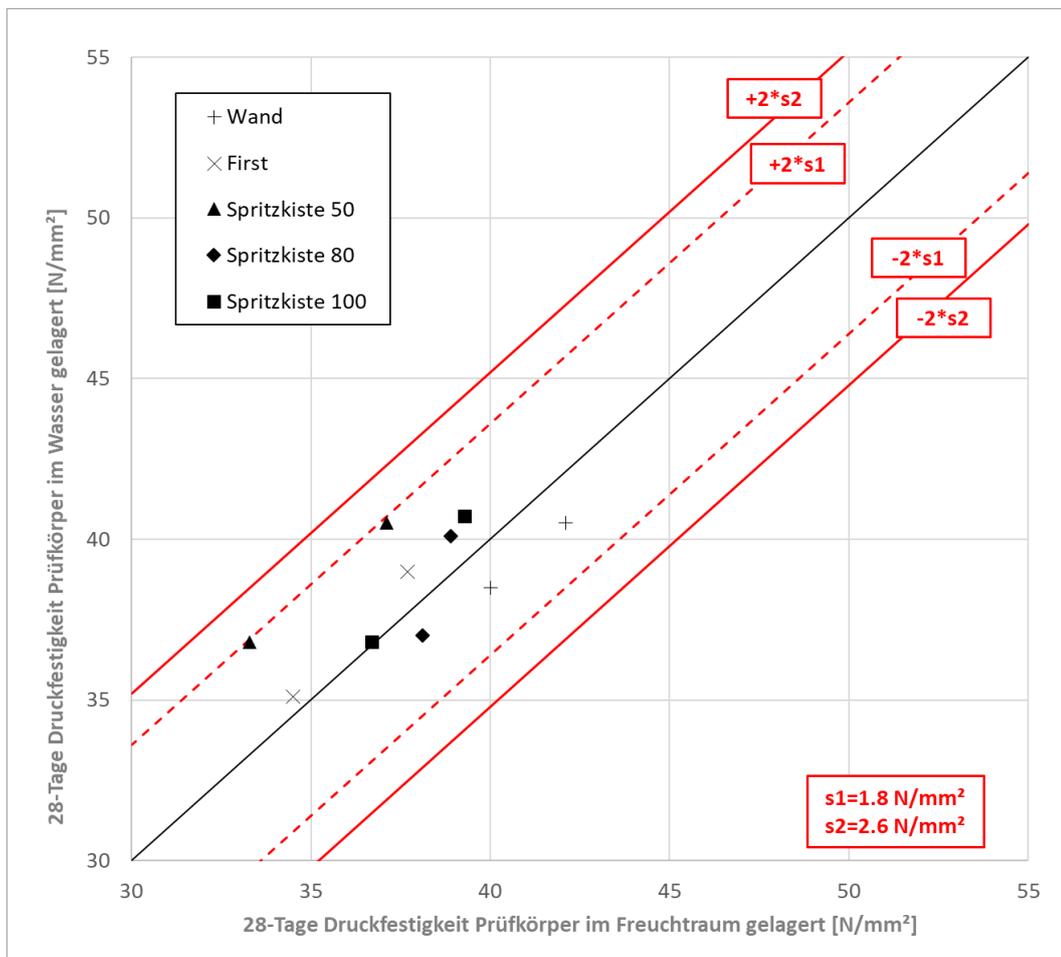


Abb. 18 Vergleich Feuchtraumlagerung zu Wasserlagerung in Phase 1

In der Phase 2 wurden die Prüfkörper bis zur Prüfung der Druckfestigkeit in Wasser gelagert.

4.2.2 Auswirkungen der Variation der Grundmischungen auf die Spritzbetone

In Phase 1 wurde bei der Grundmischung GM2 der w/z-Wert bewusst höher gewählt, um eine Variation bei den Druckfestigkeiten zu bewirken. Der Einfluss des w/z-Wertes ist bei den Würfel- und Bohrkern-Druckfestigkeiten der Grundmischungen GM1 und GM2 (Abb. 19) erkennbar.

Der Einfluss des w/z-Wertes der Grundmischungen auf die Bohrkern-Druckfestigkeit des Spritzbetons ist bei den Mischungen mit CEM II/A-LL geringer als der Einfluss des w/z-Wertes der Grundmischungen auf die Würfel-Druckfestigkeit der Grundmischung. Bei den Mischungen mit CEM II/A-D ist der Einfluss deutlich geringer.

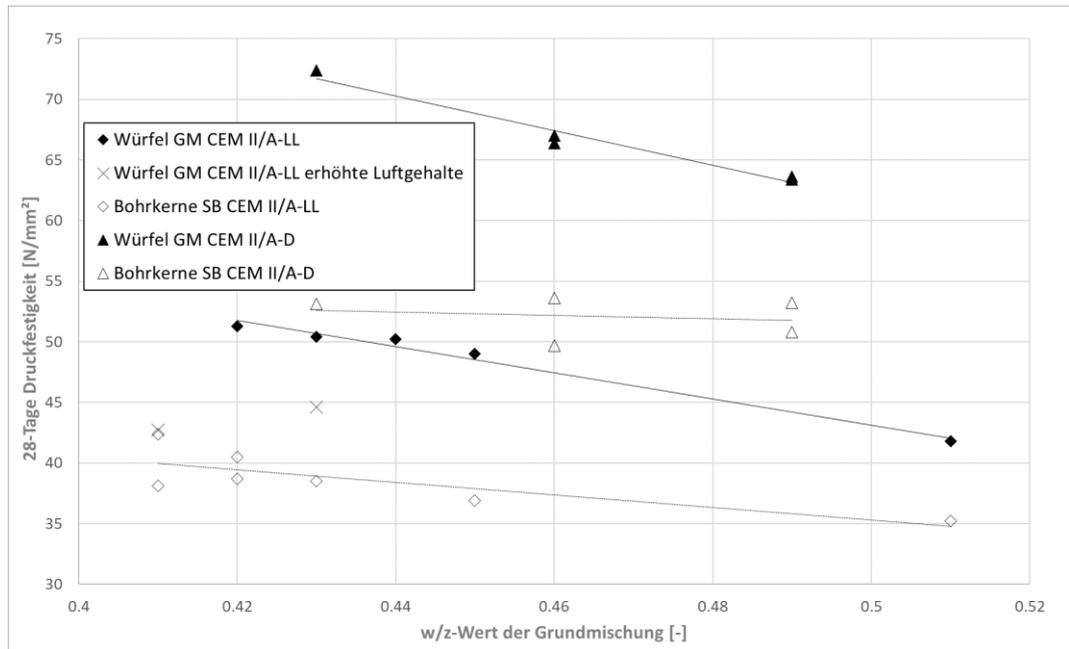


Abb. 19 Einfluss des w/z-Wertes der Grundmischung auf die Druckfestigkeiten

Bei der Grundmischung GM4 traten erhöhte Luftgehalte auf, welche eine Reduktion der Würfel-Druckfestigkeiten in ähnlicher Höhe wie die w/z-Wert-Erhöhung bei der Grundmischung GM2 bewirkte (X in Abb. 19 Werte).

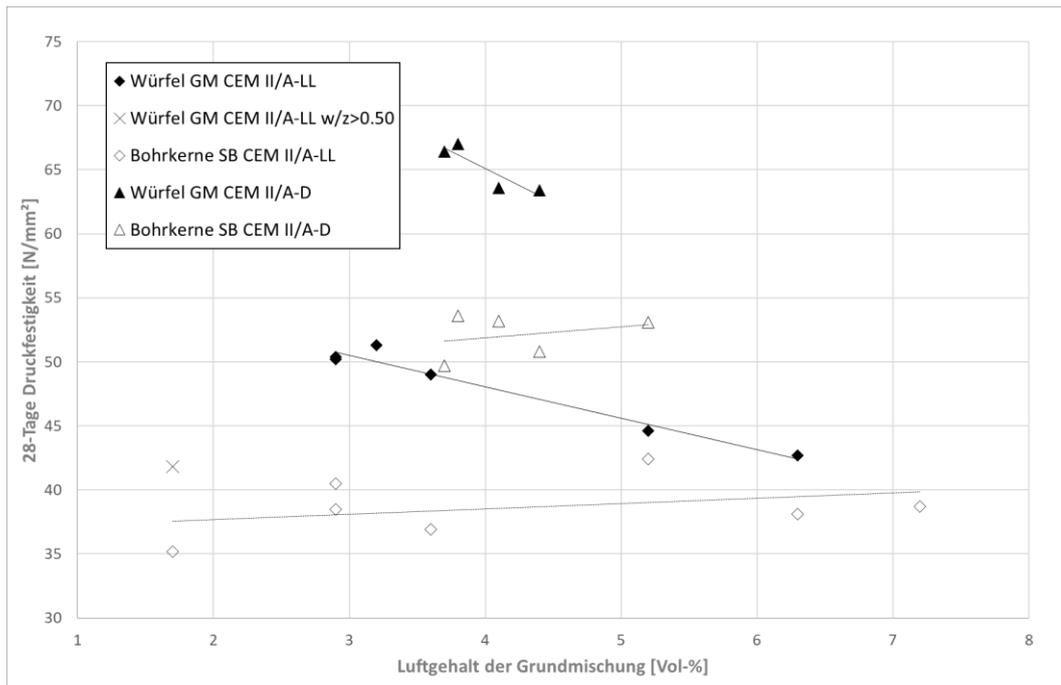


Abb.20 Einfluss des Luftgehaltes der Grundmischung auf die Druckfestigkeiten

Der Einfluss der Luftgehalte in der Grundmischung auf die Würfeldruckfestigkeit der Grundmischung ist deutlich erkennbar (Abb.20).

Bei den Bohrkerndruckfestigkeiten der Spritzbetone ist keine Reduktion der Festigkeit aufgrund erhöhter Luftgehalte im Frischbeton der Grundmischung erkennbar. Dass erhöhte Luftgehalte im Frischbeton der Grundmischung nicht zwingend tiefere Festigkeiten bei den Spritzbetonen bedeuten, entspricht den Erwartungen.

4.2.3 Streuung innerhalb einer Prüfsreihe der 28d-Druckfestigkeit

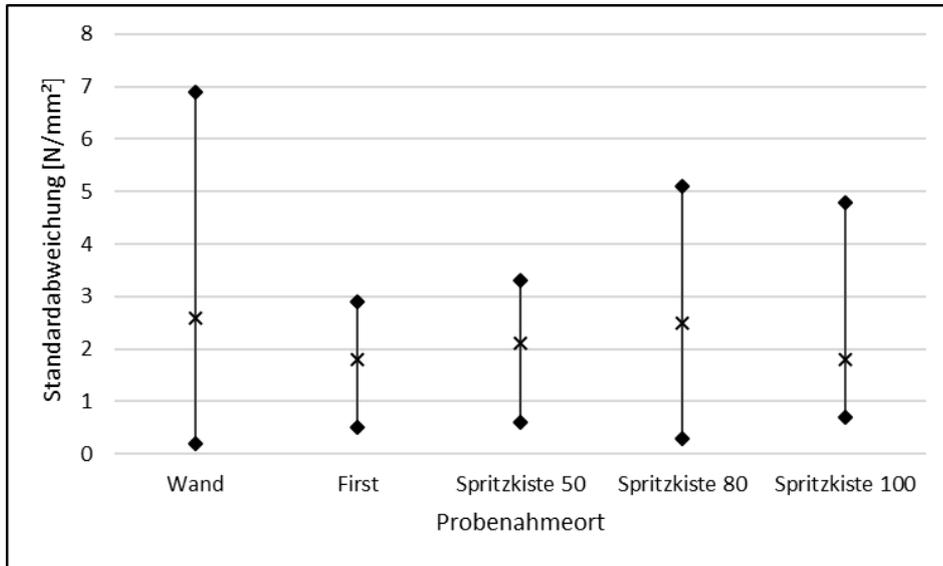


Abb.21 Standardabweichungen 28d-Druckfestigkeiten innerhalb einer Prüfsreihe (Wasserlagerung)

Die Mittelwerte der Standardabweichung innerhalb einer Prüfsreihe (Wasserlagerung) liegen bei den Probenahmeorte zwischen 1.8 und 2.6 N/mm² (Abb.21). Die Prüfsreihen mit Prüfkörpern aus der Wand ergaben die grösste Bandbreite der Standardabweichungen.

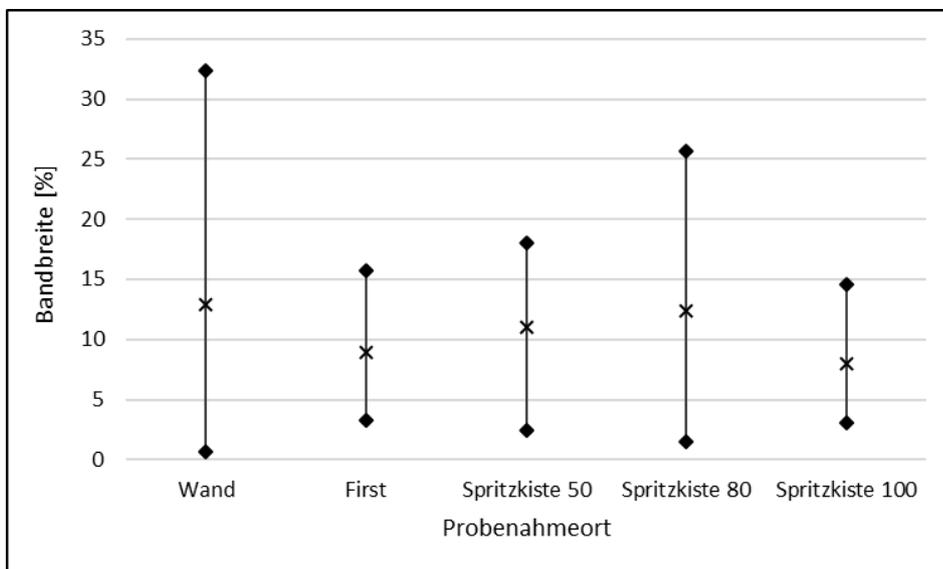


Abb.22 Bandbreite 28d-Druckfestigkeiten innerhalb einer Prüfsreihe (Wasserlagerung)

Im Mittel liegen die Bandbreiten innerhalb einer Prüfsreihe (Wasserlagerung) zwischen 8 und 13% des Mittelwertes der Prüfsreihe. Die maximalen Bandbreiten innerhalb einer Prüfsreihe liegen teilweise deutlich über 15% des Mittelwertes der Prüfsreihe.

In der SN EN 206 wird für separat hergestellte Würfel aus einer Charge eine Bandbreite von 15% des Mittelwertes der Prüfsreihe als Obergrenze für die Akzeptanz der Einzelwerte festgelegt. Die vorliegende Bandbreite bei Spritzbeton ist höher.

4.2.4 Vergleichbarkeit der Probenahmeorte

Im Folgenden sind die mittleren Druckfestigkeiten der Prüfserien eines Probenahmeortes auf die Druckfestigkeit der Prüfserie aus der Wand normiert.

Tab. 39 Phase 1

Probenahmeort	Wasserlagerung	Feuchtraumlagerung
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%

Tab. 40 Phase 2

Probenahmeort	Wasserlagerung
Wand	100%
First	88 bis 103%
Spritzkiste 50	87 bis 95%
Spritzkiste 80	85 bis 99%
Spritzkiste 100	85 bis 98%

Die Druckfestigkeiten der Prüfkörper aus dem Firstbereich erreichen rund 80 bis 100% der Druckfestigkeiten der Prüfkörper aus dem Wandbereich.

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

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

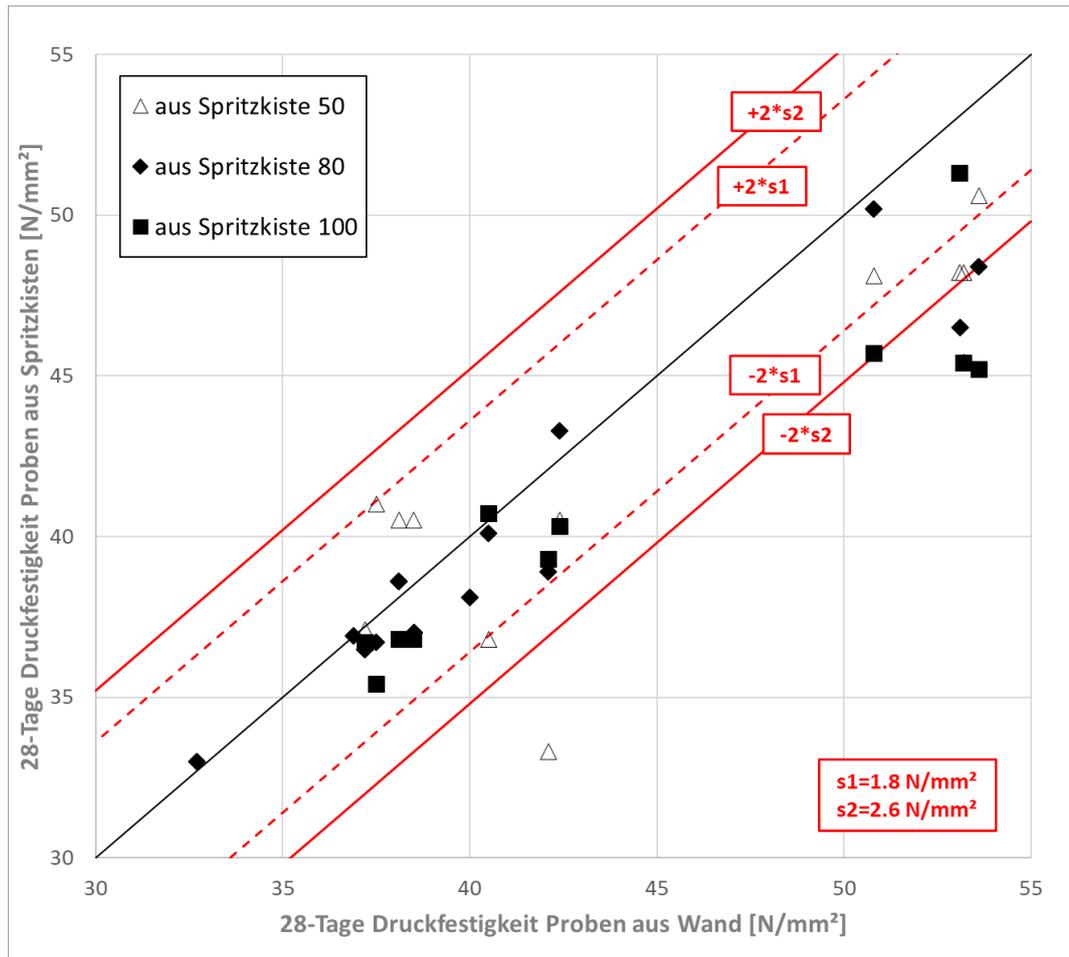


Abb.23 Vergleich der Druckfestigkeiten von Prüfkörpern aus der Wand mit den Druckfestigkeiten von Prüfkörpern aus den Spritzkisten

Bis auf einzelne Werte können die 28-Tage Druckfestigkeiten von Prüfkörpern aus der Wand nicht mit Sicherheit von den 28-Tage Druckfestigkeiten von Prüfkörpern aus Spritzkisten unterschieden werden (siehe Abb.23, Unterschiede geringer als 2*Standardabweichung innerhalb einer Prüfserie).

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

Bei höheren Festigkeiten sind grössere Abweichungen erkennbar.

Die Aussage bezieht sich auf Proben, welche zum selben Zeitpunkt (nach 2 Tagen) gewonnen und anschliessend bis zur Prüfung konditioniert gelagert wurden.

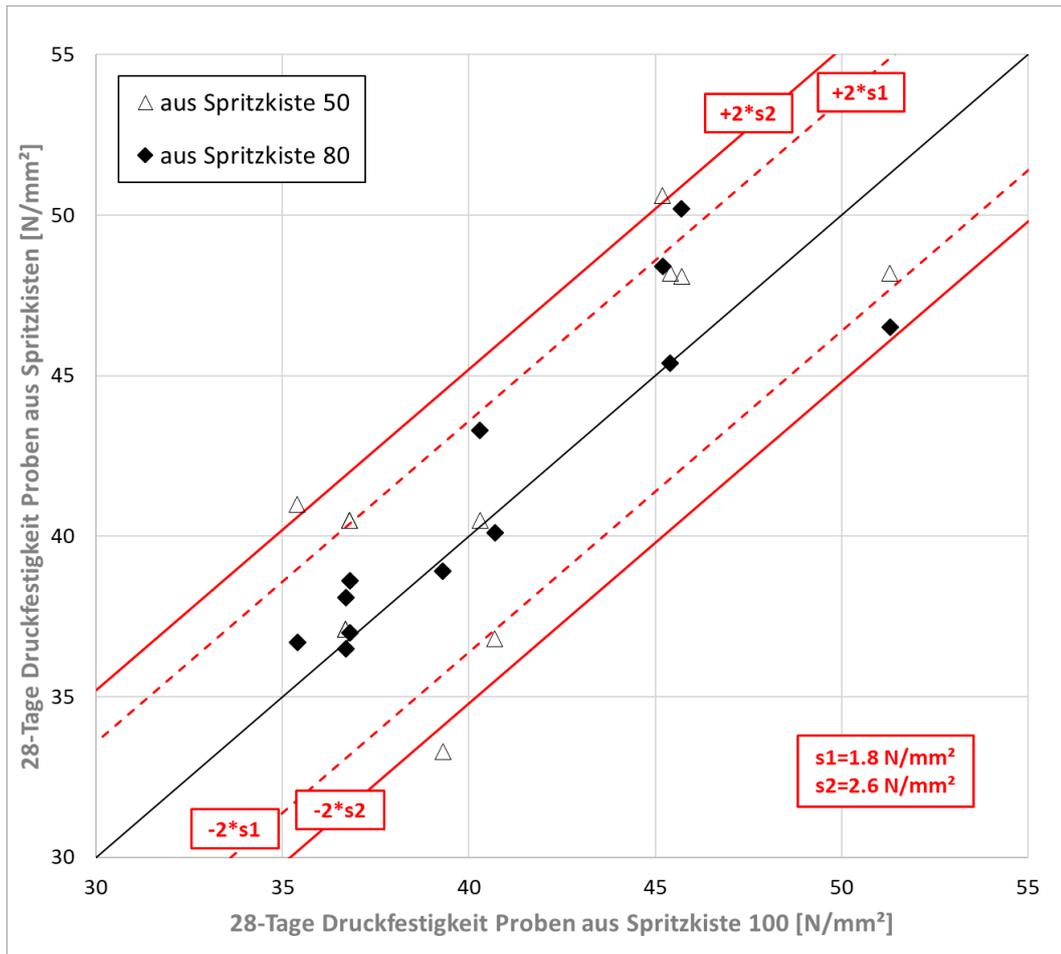


Abb.24 Vergleich der Druckfestigkeiten von Prüfkörpern aus der Spritzkiste 100 mit den Druckfestigkeiten von Prüfkörpern aus den Spritzkisten 50 / 80

Die 28-Tage Druckfestigkeiten der Prüfkörper aus den Spritzkisten 80 können nicht mit Sicherheit von den 28-Tage Druckfestigkeiten der Prüfkörper aus den Spritzkisten 100 unterscheiden werden.

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

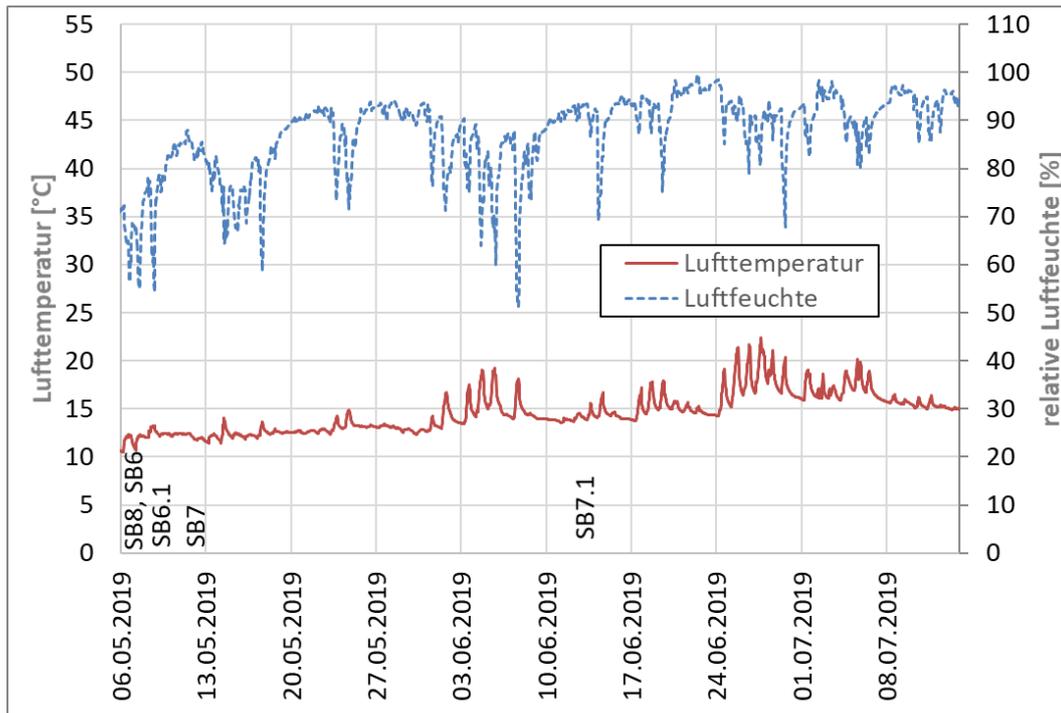


Abb.26 Klimadaten Phase 2

Beim SB6 ist die Druckfestigkeit der Prüfkörper aus der Wand bis zur Prüfung am Objekt gelagert deutlich tiefer als die Druckfestigkeit der konditioniert gelagerten Prüfkörpern. Bei den Prüfkörpern der gleichen Mischung aus dem First ist der Unterschied jedoch gering.

Beim SB7.1-2 ist die die Druckfestigkeit der Prüfkörper aus der Wand bis zur Prüfung am Objekt gelagert deutlich tiefer als die Druckfestigkeit der konditioniert gelagerten Prüfkörpern. Die analogen Druckfestigkeiten des nur wenige Meter entfernten, zum gleichen Zeitpunkt applizierten SB7.1-1, unterscheiden sich jedoch nicht wesentlich.

Ohne konditionierte Nachbehandlung ist der Verlauf der Festigkeitsentwicklung des Spritzbetons am Objekt einer grossen Bandbreite unterworfen.

4.2.6 Vergleich Wand zu First (Überkopf)

Die 28-Tage Druckfestigkeiten der Prüfkörper aus der Wand können bis auf 4 Prüfserien nicht mit Sicherheit von den 28-Tage Druckfestigkeiten der Prüfkörper aus dem Firstbereich unterschieden werden (Abb.27).

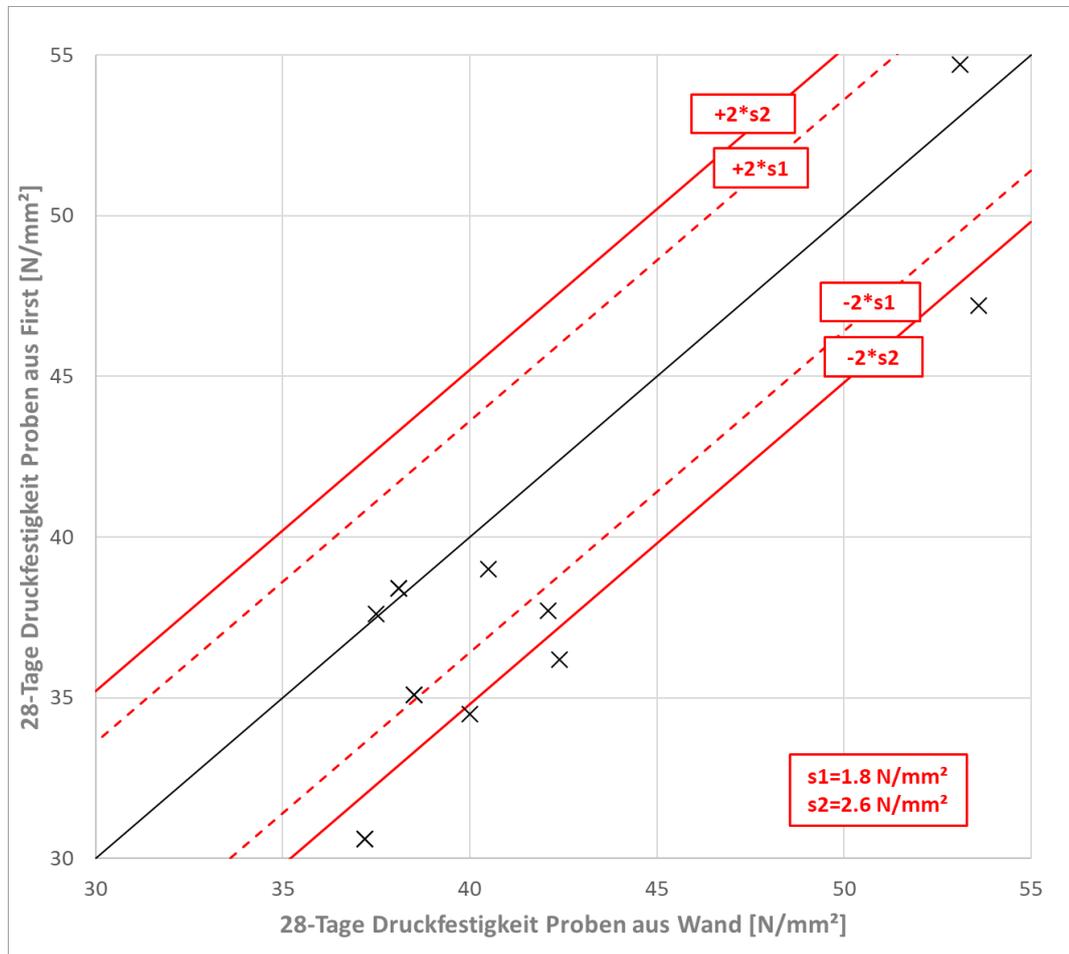


Abb.27 Vergleich Prüfkörper aus der Wand zum First

Die Mittelwerte der 28-Tage Druckfestigkeiten aus dem First erreichen 82 bis 103% der 28-Tage Druckfestigkeiten aus der Wand. Die meisten Werte der 28-Tage Druckfestigkeit der Prüfkörper aus dem First liegen zwischen 85 und 100% der 28-Tage Druckfestigkeit der Prüfkörper aus der Wand.

Die Aussage bezieht sich auf Proben, welche zum selben Zeitpunkt (nach 2 Tagen) gewonnen und anschliessend bis zur Prüfung konditioniert gelagert wurden.

4.3 Wasserleitfähigkeiten

Bei 2 von 3 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 ergeben tendenziell höhere Wasserleitfähigkeiten als an den Prüfkörpern aus der Wand.

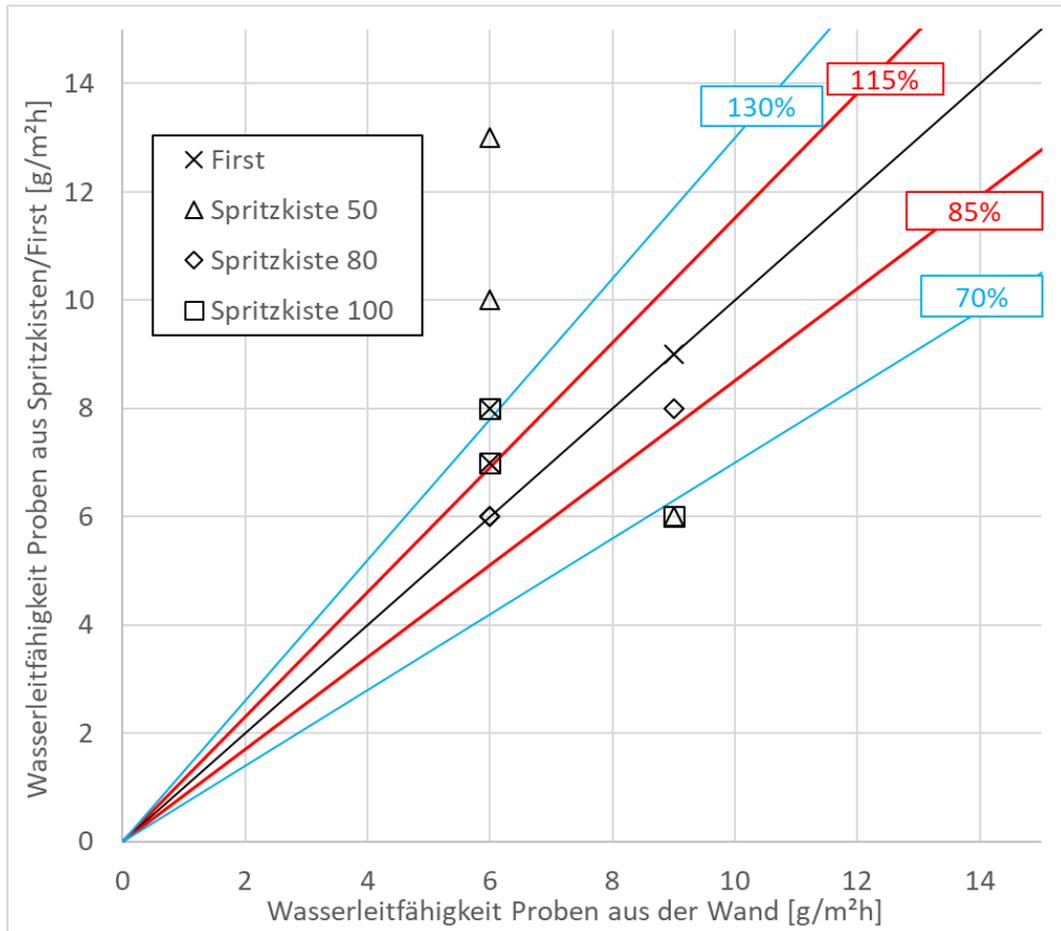


Abb.28 Wasserleitfähigkeit Spritzbeton an Prüfkörpern aus der Wand im Vergleich zu den anderen Probeentnahmeorten

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 ungünstigere Werte gemessen werden.

4.4 Fasergehalte

4.4.1 Streuung innerhalb einer Prüferserie

In der Phase 1 wurden mehrere Bestimmungen des Fasergehaltes eines Entnahmeortes durchgeführt (Einzelwerte siehe *Tab. 13* und *Tab. 14*).

In den folgenden Tabellen sind die Standardabweichungen in % des Mittelwertes aufgeführt.

Tab. 41 *Stahlfasern Standardabweichungen Fasergehalte in % des Mittelwertes*

Mischung	Entnahme aus	Mittelwert [kg/m ³]	Standardabweichung [kg/m ³]	Standardabweichung [%]
GM3-1	Würfel	32.0	3.3	
GM3-2	Würfel	27.6	3.4	
	Grundmischung	29.8	3.4	11
SB3-1	Spritzkiste 50	10.4	2.5	24
SB3-1	Spritzkiste 80	11.5	3.3	29
SB3-1	Spritzkiste 100	10.9	0.7	6
SB3-2	Wand	11.5	0.5	4
SB3-2	First	12.5	1.6	13

Tab. 42 *Polymerfasern Standardabweichungen Fasergehalte in % des Mittelwertes*

Mischung	Entnahme aus	Mittelwert [kg/m ³]	Standardabweichung [kg/m ³]	Standardabweichung [%]
GM4-1	Würfel	4.3		
GM4-2	Würfel	5.0		
	Grundmischung	4.7	0.2	4
SB4-1	Spritzkiste 50	2.9	0.3	10
SB4-1	Spritzkiste 80	2.2	0.8	
	Spritzkiste 80/13	3.7	0.5	
	Ø Spritzkiste 80	3.0	0.7	23
SB4-1	Spritzkiste 100	2.3	0.6	26
SB4-2	Wand	2.3	0.7	
	Wand 13	3.6	0.4	
	Ø Wand	3.0	0.6	20
SB4-2	First	2.1	0.2	
	First 13	2.8	0.6	
	Ø First	2.5	0.4	16

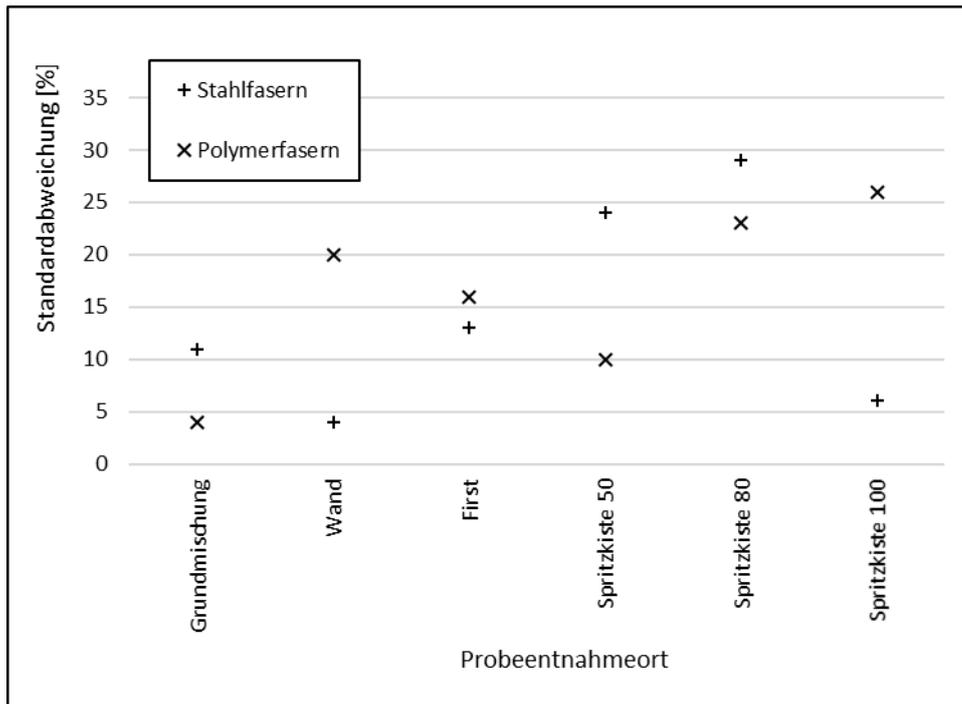


Abb.29 Standardabweichungen innerhalb einer Prüfserie in % des Mittelwertes

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

4.4.2 Einfluss Zementwechsel

In der Phase 2 wurde ausser bei einer Mischung (SB6) der Zement CEM II/A-D anstelle des Zementes CEM II/A-LL eingesetzt. Neben dem Zement wurden auch andere Gerätschaften und Düsenführer eingesetzt. Wie in Kapitel 4.1 dargelegt, werden diese Unterschiede in den vorliegenden Versuchen in Bezug auf den Fasergehalt nicht relevant.

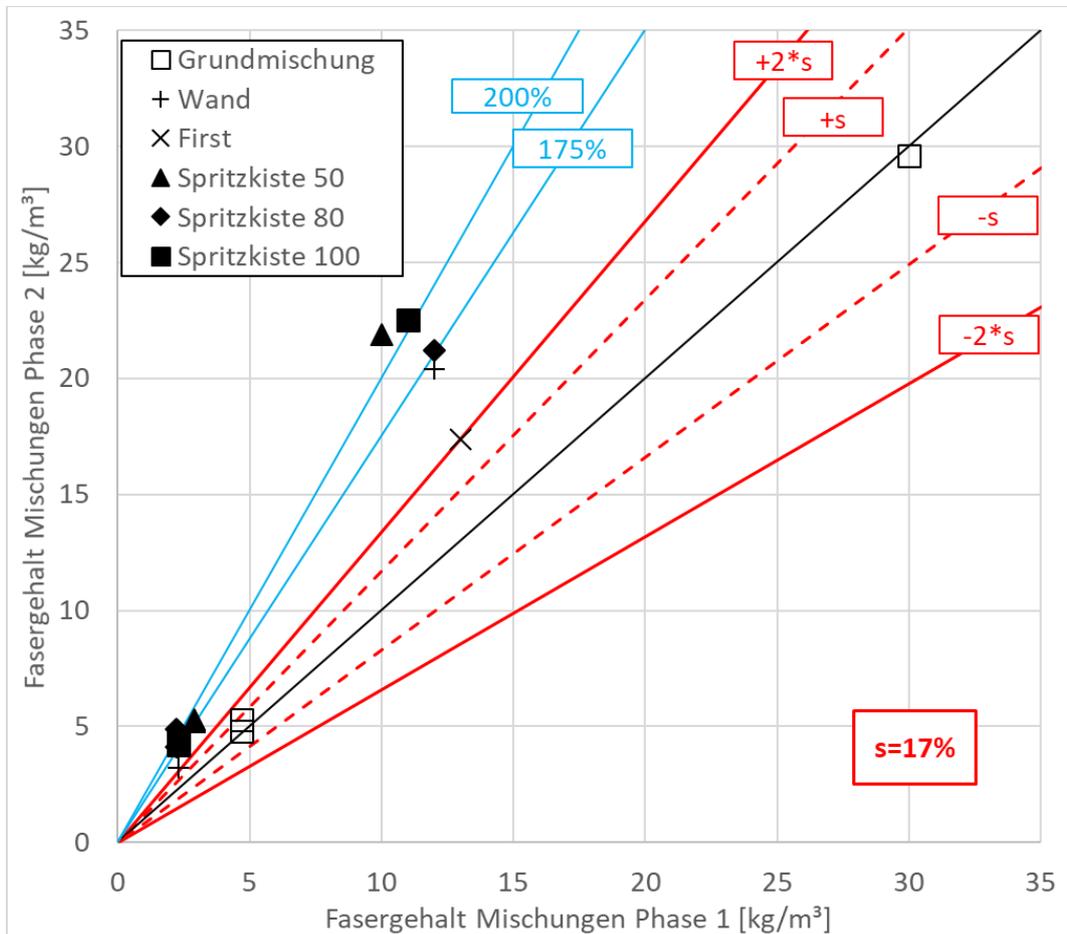


Abb.30 Vergleich der Fasergehalte der Mischungen aus Phase 1 und Phase 2

Mit dem Wechsel des Zementes konnten in der Phase 2 die Fasergehalte in den Spritzbetonen gegenüber der Phase 1 dagegen deutlich erhöhet werden, bei vergleichbaren Fasergehalten in den Grundmischungen der beiden Phasen (Abb.30).

4.4.3 Einfluss Pump-Förderleistung auf den Polymer-Fasergehalt

In der Phase 1 wurde bei der Applikation des Spritzbetons SB4 mit Polymerfasern die Pump-Förderleistung von der Einstellung 6 m³/h auf 13 m³/h bei gleicher Luftförderleistung erhöht und Versuchsfelder an der Wand, im First und in Spritzkisten 80 appliziert.

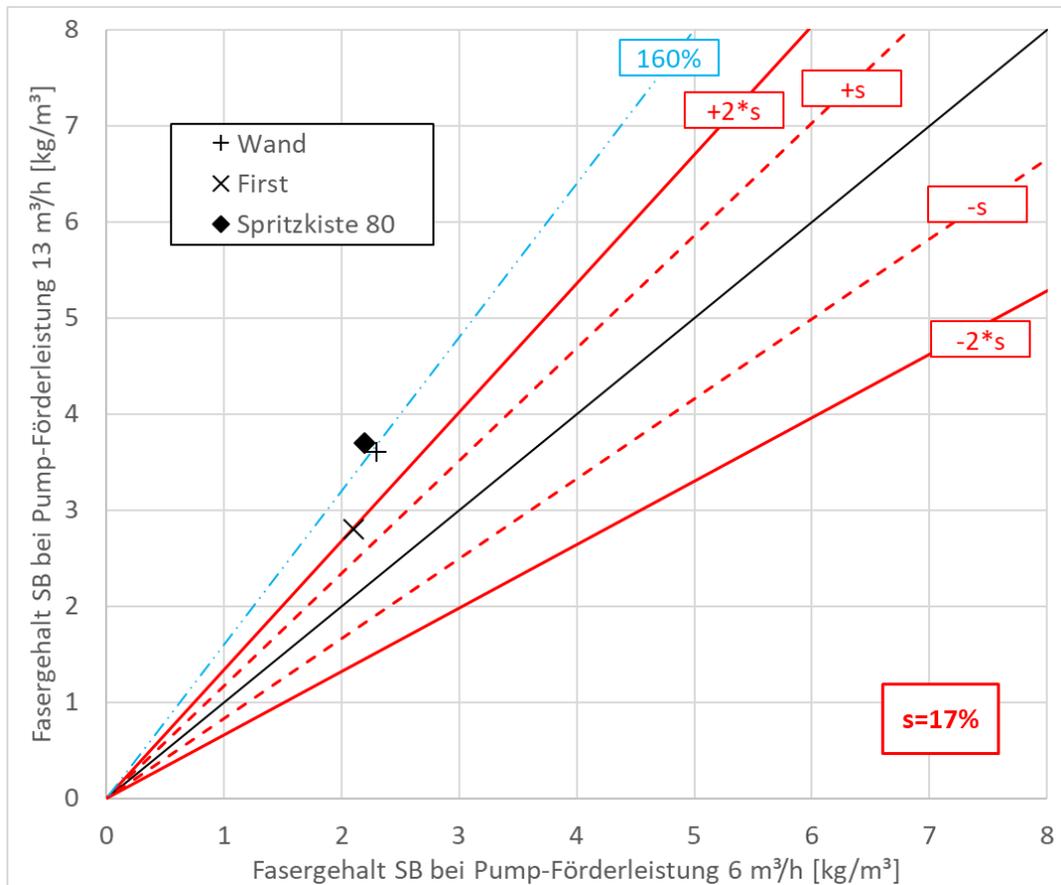


Abb.31 Vergleich Fasergehalte der Spritzbetone bei Pump-Förderleistung 6 bzw. 13 m³/h

Mit den erhöhten Pump-Förderleistungen wurden an der Wand und in der Spritzkiste 80 markant höhere Fasergehalte, im First höhere Fasergehalte erreicht (Abb.31).

4.4.4 Einfluss Luftförderleistung auf den Polymer-Fasergehalt

In der Phase 2 wurde bei der Applikation des Spritzbetons SB7 mit Polymerfasern die Luftförderleistung von 12.8 m³/h (SB7.1-1) auf 6.4 m³/h reduziert und Versuchsfelder an der Wand und in die Spritzkisten 50, 80 und 100 appliziert.

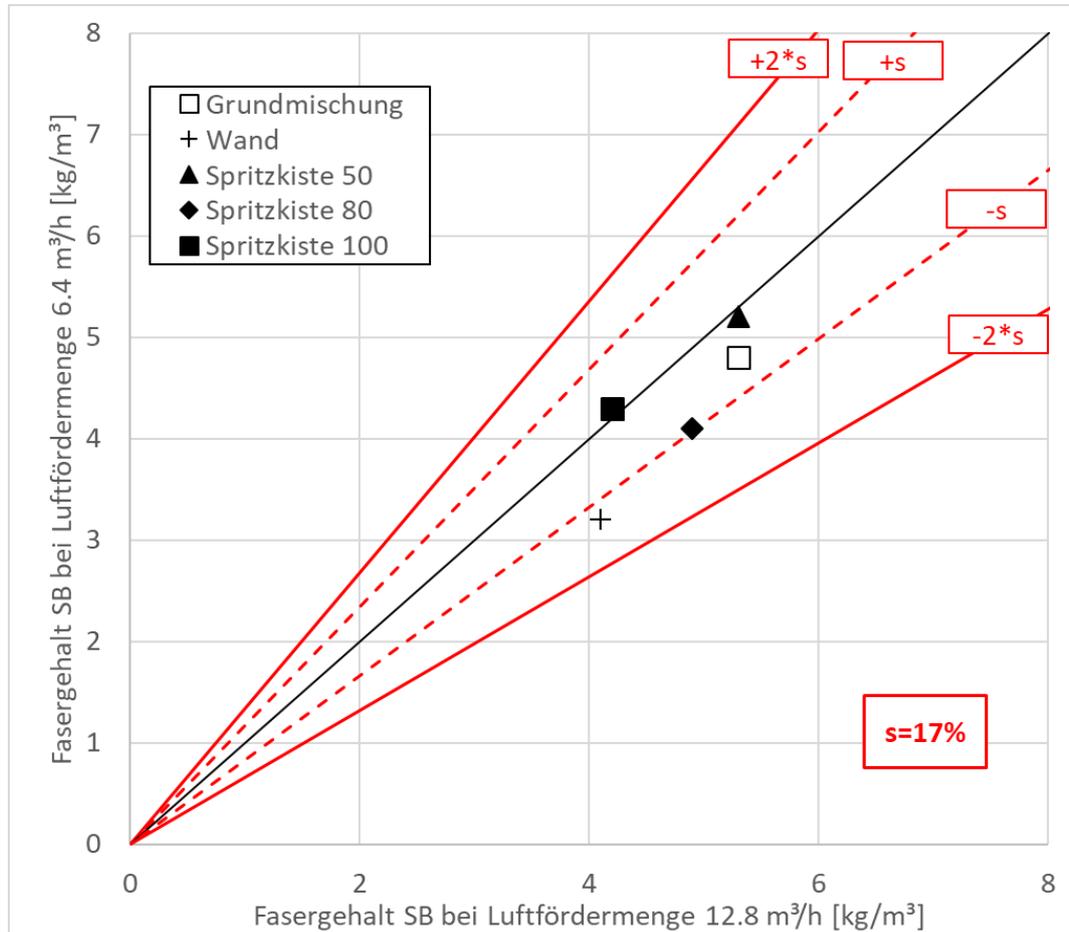


Abb.32 Vergleich Fasergehalte der Spritzbetone bei Luftförderleistung 12.8 bzw. 6.4 m³/h

Mit der reduzierten Luftförderleistung wurde in der Tendenz ein gering tieferer Fasergehalt gemessen. Die Fasergehalte lassen sich jedoch nicht mit Sicherheit unterscheiden (Abb.32).

4.4.5 Vergleich Fasergehalt Spritzbeton an der Wand und in Spritzkisten

Bis auf 2 Werte lassen sich die Fasergehalte bestimmt an Prüfkörpern des Spritzbetons aus der Wand und aus den Spritzkisten nicht mit Sicherheit unterscheiden (Abb.33 Abb.34).

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

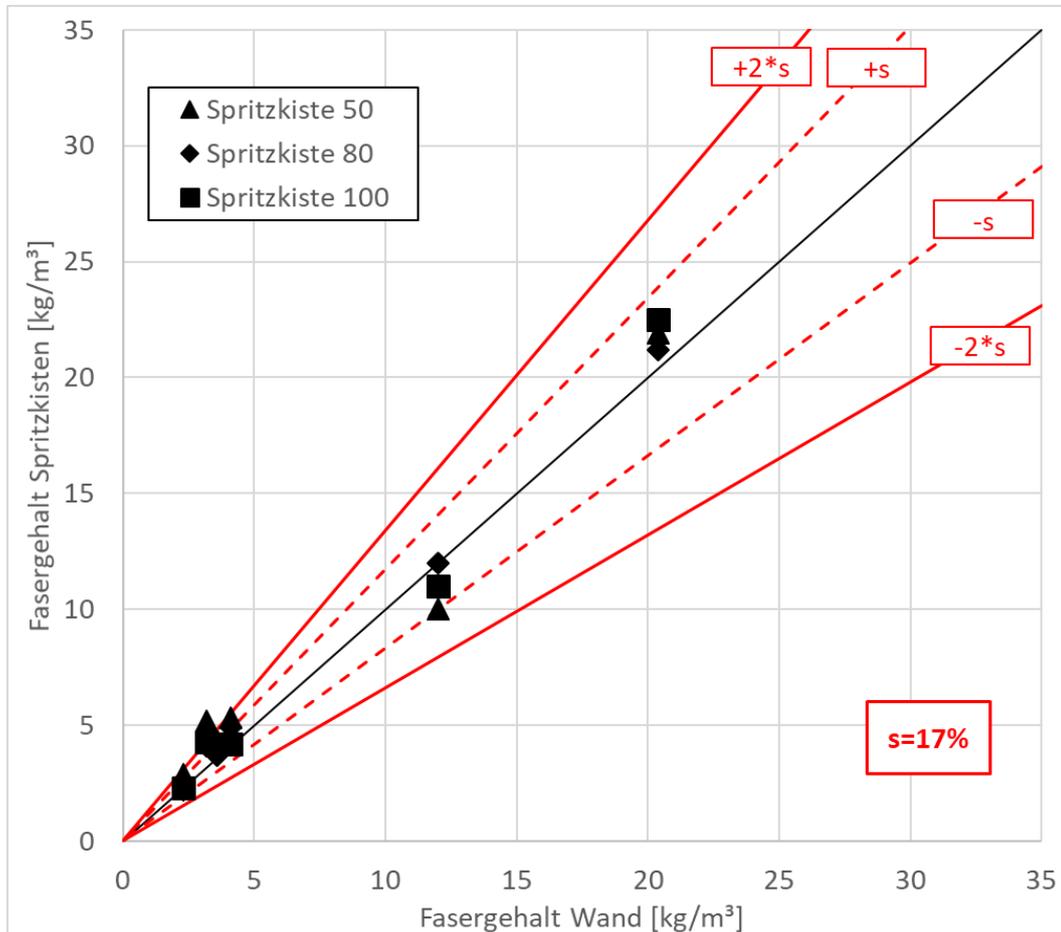


Abb.33 Vergleich Fasergehalte an der Wand und in den Spritzkisten, alle Werte

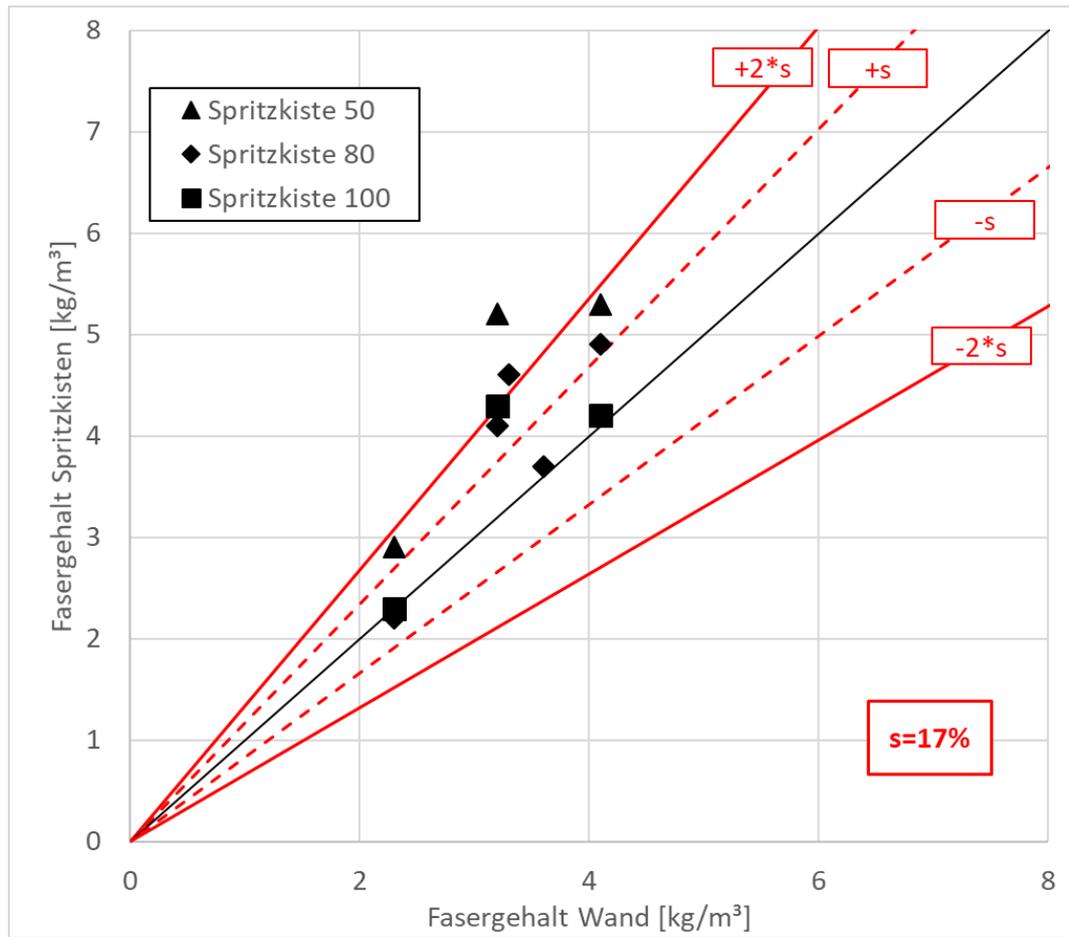


Abb.34 Vergleich Fasergehalte an der Wand und in den Spritzkisten, Polymerfasern

4.4.6 Vergleich der Fasergehalte Spritzbeton in den Spritzkisten

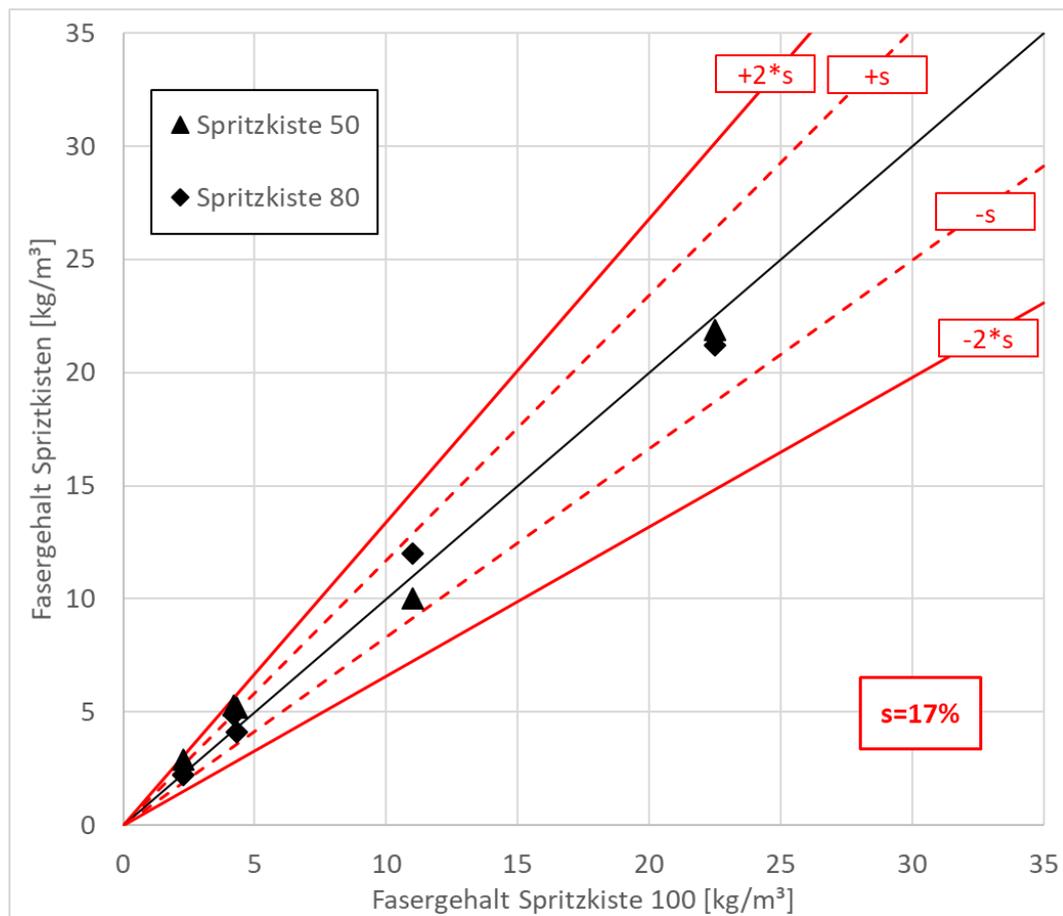


Abb.35 Vergleich Fasergehalte Spritzbeton in den Spritzkisten, alle Werte

Die Fasergehalte bestimmt an Prüfkörpern aus den Spritzkisten 50 und 80 lassen sich nicht mit Sicherheit von den Fasergehalten bestimmt an Prüfkörpern aus den Spritzkisten 100 unterscheiden.

Bei den Spritzbetonen mit Polymerfasern besteht jedoch eine Tendenz von höheren Fasergehalten in den Prüfkörpern aus den Spritzkisten 50 gegenüber den Prüfkörpern aus den Spritzkisten 100 (Abb.36).

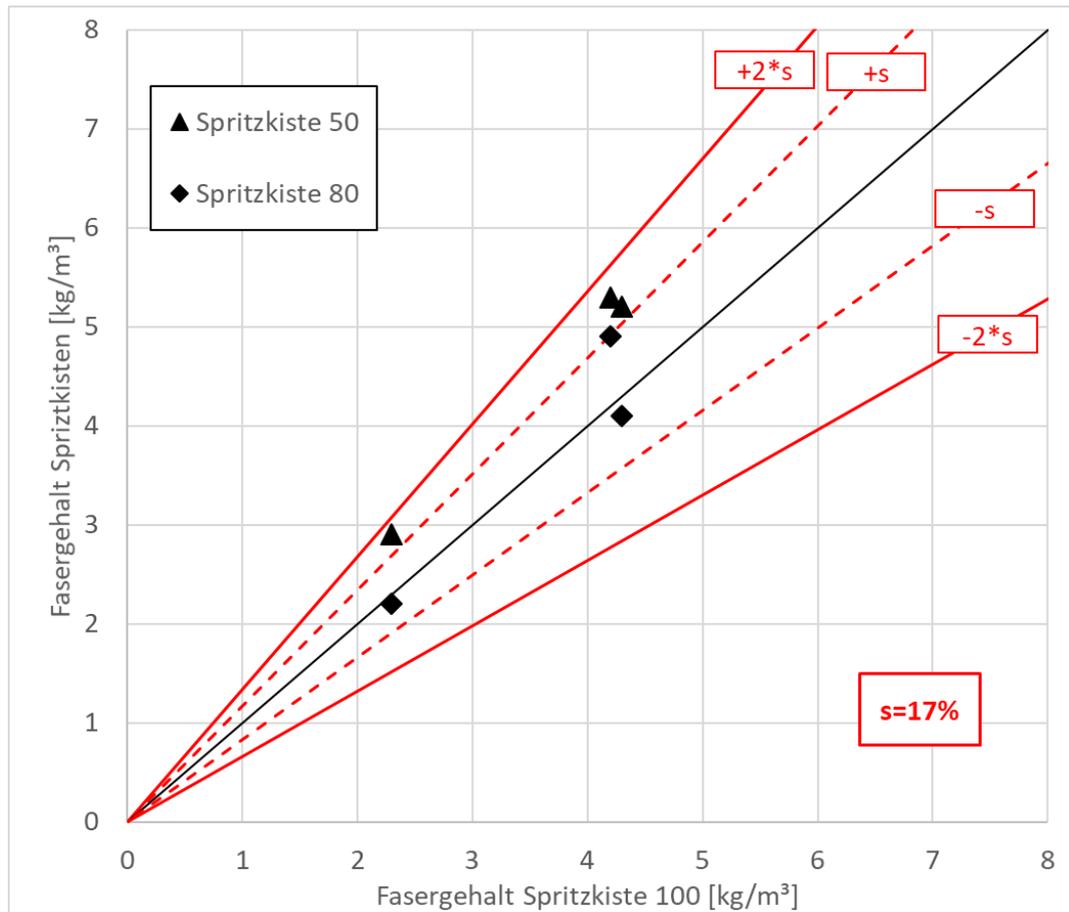


Abb.36 Vergleich Fasergehalte Spritzbeton in den Spritzkisten, Polymerfasern

4.4.7 Vergleich Fasergehalte Festbeton und Kratzproben

Die Kratzproben wurden an der Wand aus demselben Bereich und bei den Spritzkisten 50 aus derselben Spritzkiste wie die Fasergehaltsbestimmung des Festbetons gewonnen.

Bei den Spritzkisten 80 und 100 wurden die Fasergehaltsbestimmungen des Festbetons an den Prüfplatten nach der Prüfung der Energieabsorption bestimmt, die Kratzproben an separaten Spritzkisten.

Tab. 43 Fasergehalte Vergleich Spritzkisten (Kratzproben) – Objekt an der Wand

Probenahmeort	SB6.1	SB7	SB7.1-1	SB7.1-2
Spritzkiste 50	37%		14%	6%
Spritzkisten 80	38%	53%	10%	10%
Spritzkiste 100	15%		7%	23%
Objekt an der Wand	35%	36%	13%	28%

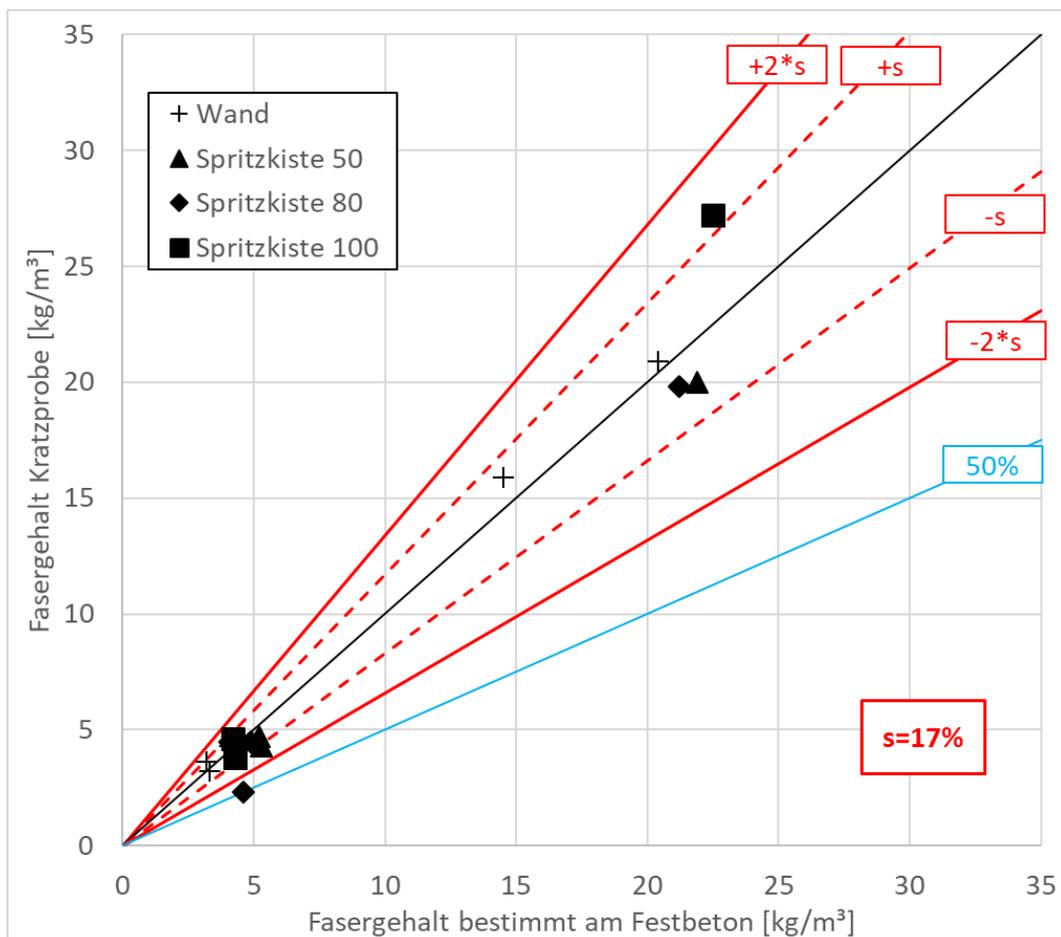


Abb.37 Vergleich Fasergehalte bestimmt am Festbeton und Kratzproben, alle Werte

Die in Phase 2 an Kratzproben aus dem jungen Spritzbeton bestimmten Fasergehalte lassen sich bis auf einen Wert bei den Polymerfasern nicht mit Sicherheit unterscheiden.

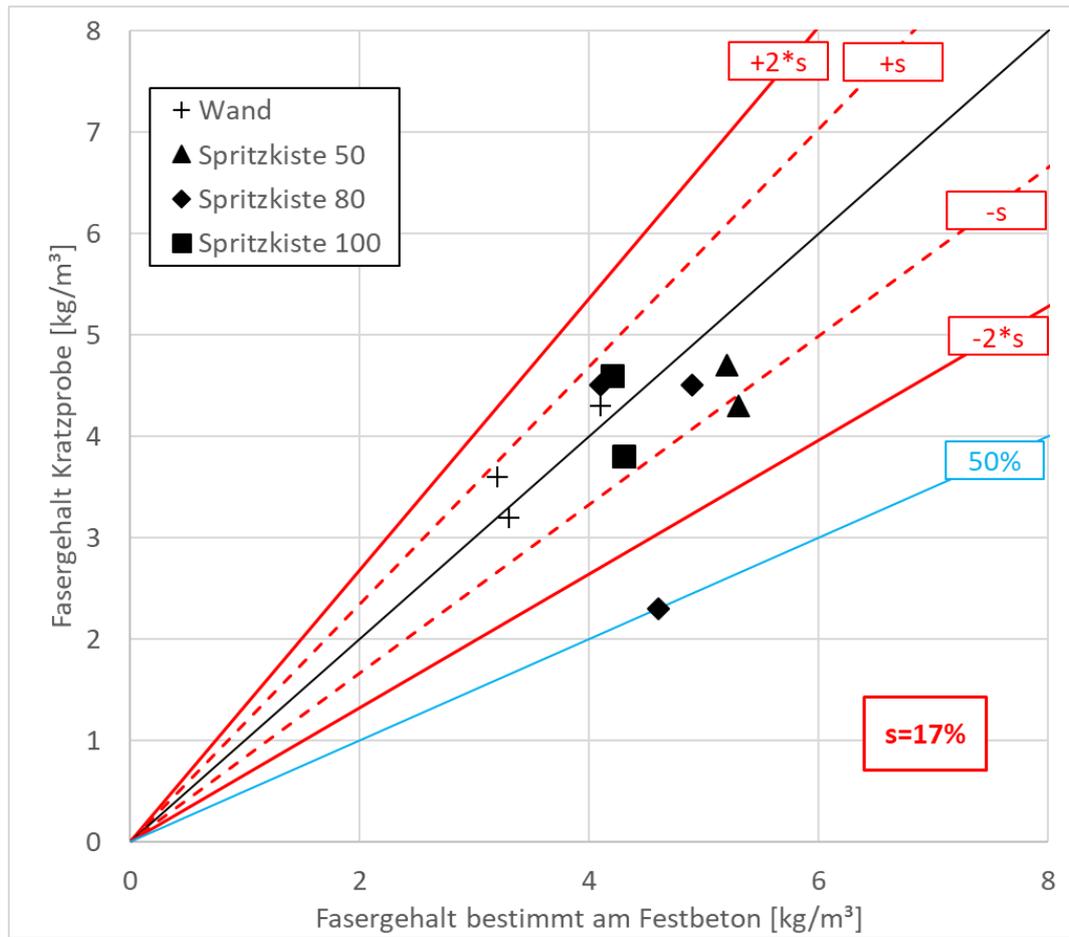


Abb.38 Vergleich Fasergehalte von Festbeton und Kratzproben, Polymerfasern

Der Fasergehalt der Kratzprobe mit einem Gehalt von 50% vom Fasergehalt am Festbeton geprüft, und der Fasergehalt am Festbeton, wurden nicht an Proben aus derselben Spritzkiste 80 geprüft. Die Bestimmung des Fasergehaltes des Festbetons bei diesen Serien wurde an Prüfkörpern nach der Prüfung der Energieabsorption bestimmt.

Die Spritzversuche mit dem Ausreisser wurden nach der Bestimmung des Fasergehaltes an der Kratzprobe aus der Spritzkiste 80 abgebrochen, da der Fasergehalt 3.2 kg/m³ betrug (Faserverlust über 50%). Der Faserverlust bestimmt an Prüfkörpern einer Kratzprobe der Wand ergaben 3.3 kg/m³ und bestätigen den Wert der Kratzprobe aus der Spritzkiste 80. In der Grundmischung wurden bis zum Abbruch der Versuche Fasergehalte von 5.5 bis 6.8 kg/m³ gemessen.

Die Gründe für die Unterschiede zwischen dem Fasergehalt der Kratzprobe bestimmt an Prüfkörpern aus einer Spritzkiste 80 und dem Fasergehalt bestimmt am Festbeton aus einer anderen Spritzkiste 80 ist im vorliegenden Fall mit grosser Sicherheit mit unterschiedlichen Fasergehalten in den verschiedenen Spritzkisten zu erklären.

4.4.8 Fasergehalt in Spritzkisten für die Bestimmung der Energieabsorption

Die Energieabsorption wurde an Prüfplatten geprüft, welche aus Spritzkisten 80 und 100 gewonnen wurden.

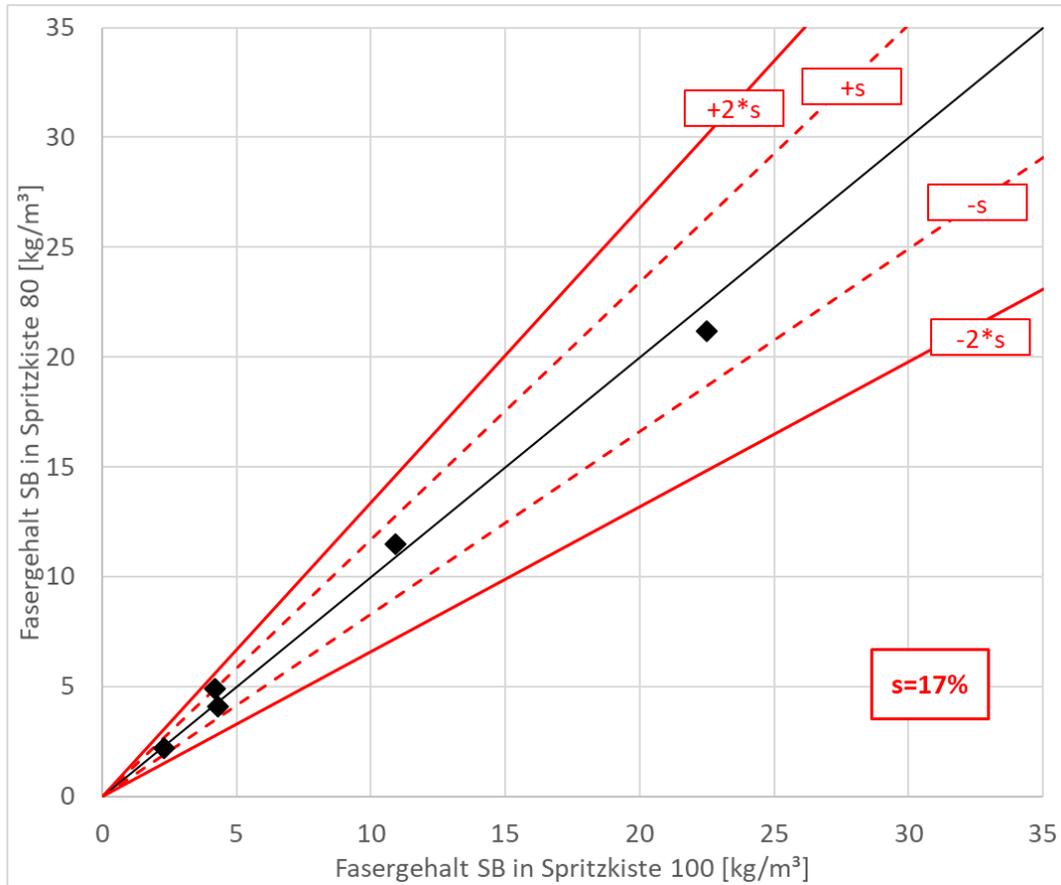


Abb.39 Vergleich Mittelwert der Fasergehalte aus 3 Spritzkisten 80 bzw. 100

Die Mittelwerte der Fasergehalte bestimmt von 3 Prüfplatten aus Spritzkisten 80 lassen sich nicht mit Sicherheit von den Mittelwerten der Fasergehalte von 3 Prüfplatten aus Spritzkisten 100 unterscheiden (Abb.39).

4.4.9 Vergleich der Fasergehalte im Rissbereich und im restlichen Bereich der Prüfplatte für die Energieabsorption

Bei einigen Prüfplatten wurde der Fasergehalt nach der Prüfung der Energieabsorption im Bereich der Risse und im restlichen Bereich der Prüfplatte bestimmt (Kapitel 2.2).



Abb.40 Prüfplatte nach Prüfung Energieabsorption mit markiertem "Bereich Riss" und "restliche Prüfplatte"

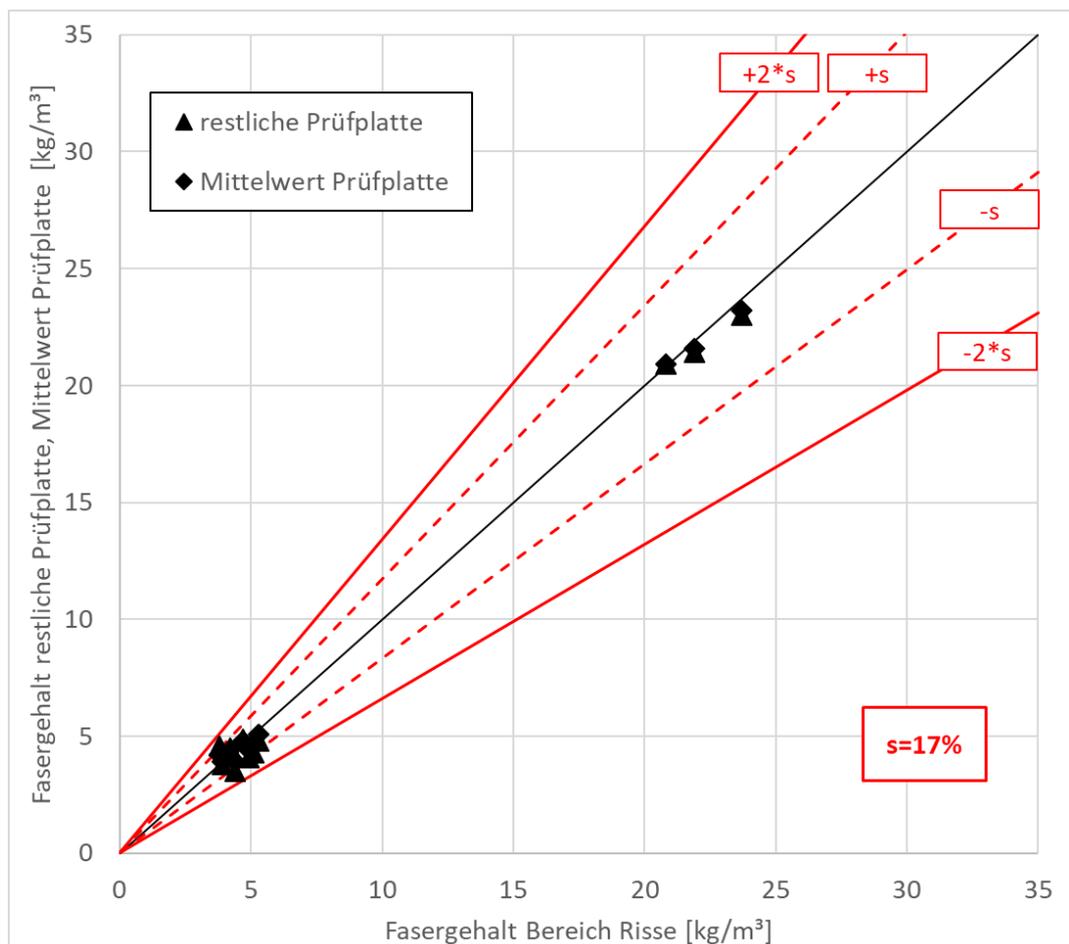


Abb.41 Vergleich Fasergehalte im Rissbereich und restliche Prüfplatte, alle Werte

Die detaillierte Bestimmung der Fasergehalte im Bereich der Risse nach der Prüfung der Energieabsorption und der restlichen Prüfplatte ergaben beim Stahlfaserspritzbeton SB6 keine relevanten Unterschiede. Der Faserverlust im Rissbereich lag zwischen 100 und 102% des Mittelwertes des Faserverlustes der gesamten Prüfplatte. Der Faserverlust im

restlichen Bereich der Prüfplatte lag zwischen 99 und 100% des Mittelwertes des Faserverlustes der gesamten Prüfplatte. Der Unterschied im Fasergehalt zwischen dem Rissbereich und der restlichen Prüfplatte lag zwischen 0 und 2% bezogen auf den Soll-Fasergehalt.

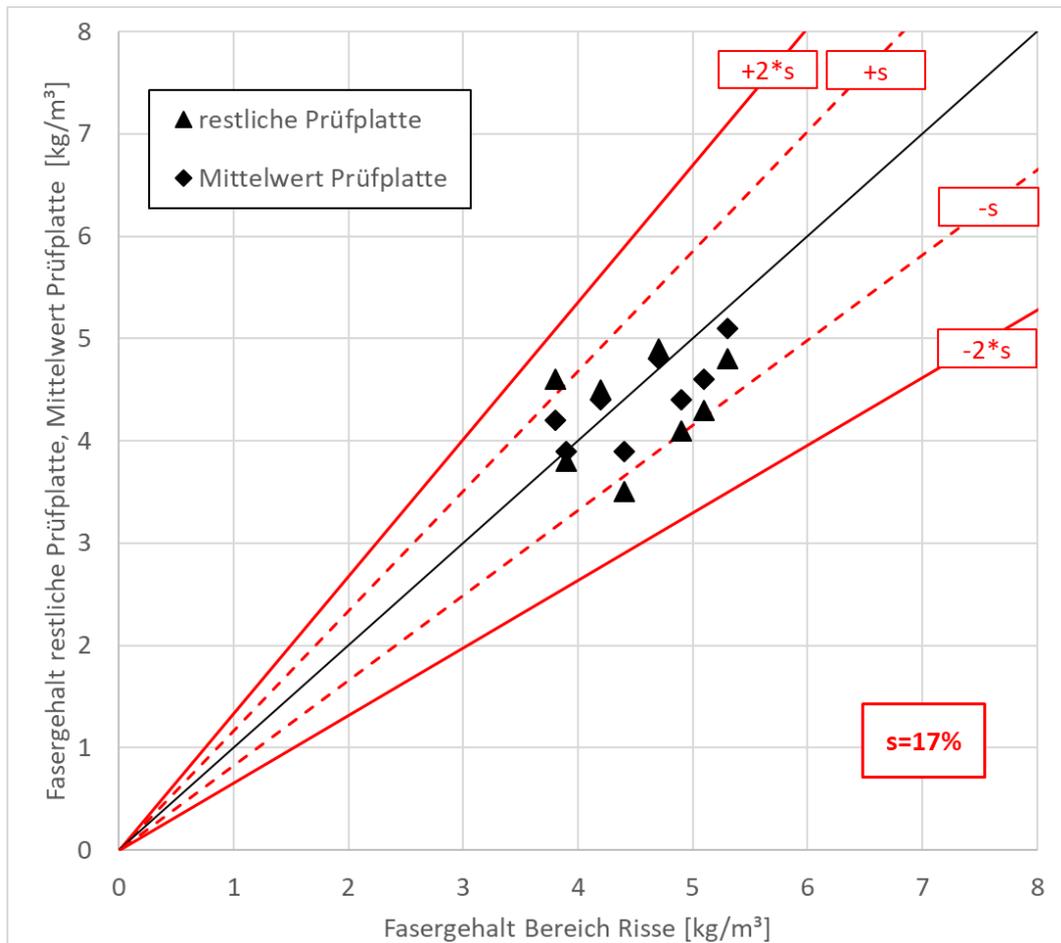


Abb.42 Vergleich Fasergehalte im Rissbereich und restliche Prüfplatte, Polymerfasern

Bei den Mischungen mit Polymerfasern sind die Unterschiede etwas grösser.

Die Mischung SB7.1-2 mit reduzierter Luftförderleistung von 6.4 m³/h weist die grössten Unterschiede auf. Der Faserverlust im Rissbereich lag zwischen 90 und 113% des Mittelwertes des Faserverlustes der gesamten Prüfplatte. Der Faserverlust im restlichen Bereich der Prüfplatte lag zwischen 90 und 110% des Mittelwertes des Faserverlustes der gesamten Prüfplatte. Der Unterschied im Fasergehalt zwischen dem Rissbereich und der restlichen Prüfplatte lag zwischen -16 und 18% bezogen auf den Soll-Fasergehalt.

Die Mischungen mit 12.8 m³/h Luftförderleistung SB7 und SB7.1-1 ergaben geringere Unterschiede. Der Faserverlust im Rissbereich lag zwischen 95 und 104% des Mittelwertes des Faserverlustes der gesamten Prüfplatte. Der Faserverlust im restlichen Bereich der Prüfplatte lag zwischen 94 und 102% des Mittelwertes des Faserverlustes der gesamten Prüfplatte. Der Unterschied im Fasergehalt zwischen dem Rissbereich und der restlichen Prüfplatte lag zwischen -4 und 10% bezogen auf den Soll-Fasergehalt (Abb.42).

Die Fasergehalte im Rissbereich und im restlichen Bereich der Prüfplatte nach der Prüfung der Energieabsorption lassen sich bei Stahl- und Polymerfasern nicht mit Sicherheit unterscheiden.

4.4.10 Detaillierte Erfassung der Fasergehalte in der Spritzkiste

Bei 3 Spritzkisten für die Prüfung der Energieabsorption wurde die Verteilung der Fasern innerhalb der Spritzkiste detaillierter erfasst (Kapitel 2.2).

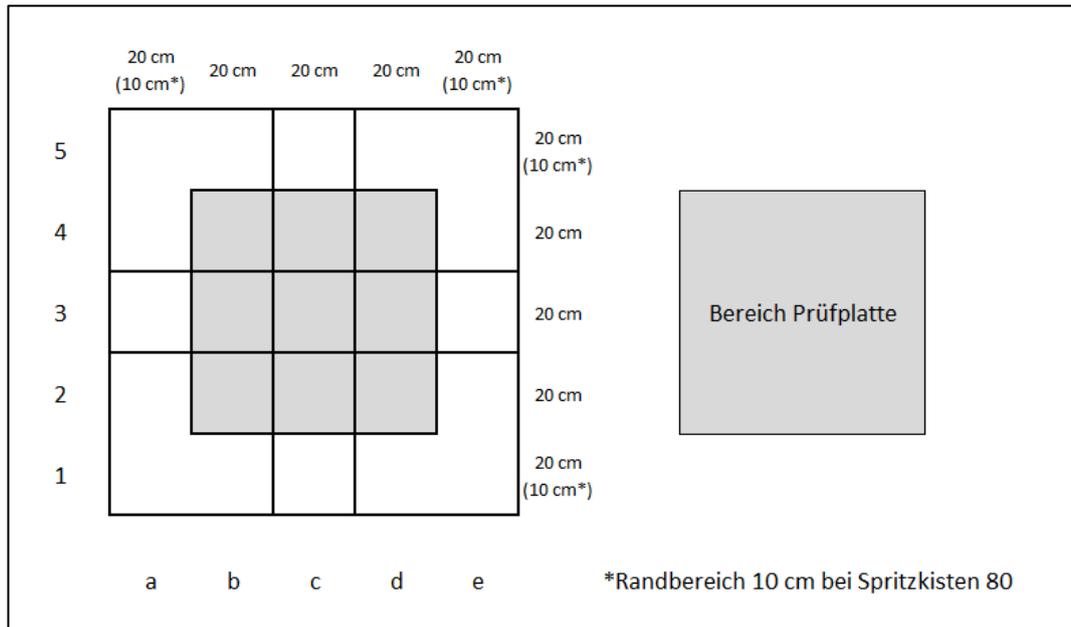


Abb.43 Raster und Bezeichnung für die detailliertere Bestimmung der Fasergehalte

Der Randbereich der Spritzkiste wird bei der Präparation der Prüfplatten für die Bestimmung der Energieabsorption entfernt. Der Fasergehalt im Randbereich wird deshalb normalerweise nicht bestimmt.

Für die detaillierte Erfassung der Fasergehalte in einer Spritzkiste, wurde bei den 3 ausgewählten Spritzkisten auch der Fasergehalt im Randbereich bestimmt.

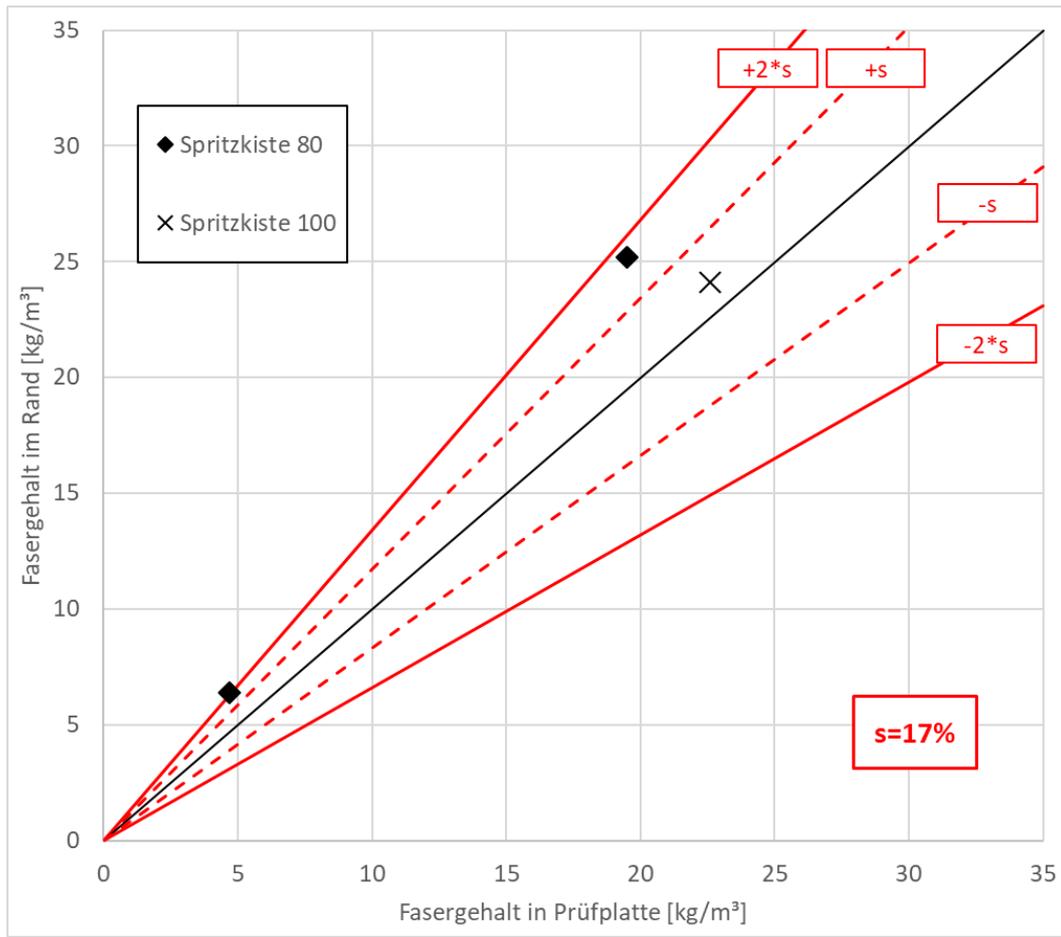


Abb.44 Vergleich der Fasergehalte in der Prüfplatte und im Randbereich

Der Fasergehalt im Prüfplatten- und Randbereich lässt sich bei den 3 Spritzkisten nicht mit Sicherheit unterscheiden.

Bei allen 3 Spritzkisten ist der Fasergehalt im Randbereich jedoch höher als in der Prüfplatte.

Bei den Spritzkisten 80 ist die Tendenz eindeutiger als bei der Spritzkiste 100.

In Abb.45 bis Abb.48 sind die Fasergehalte innerhalb der Prüfplatte streifenweise verglichen.

Innerhalb der 3 Prüfplatten sind keine eindeutigen Tendenzen der Verteilung der Fasergehalte erkennbar.

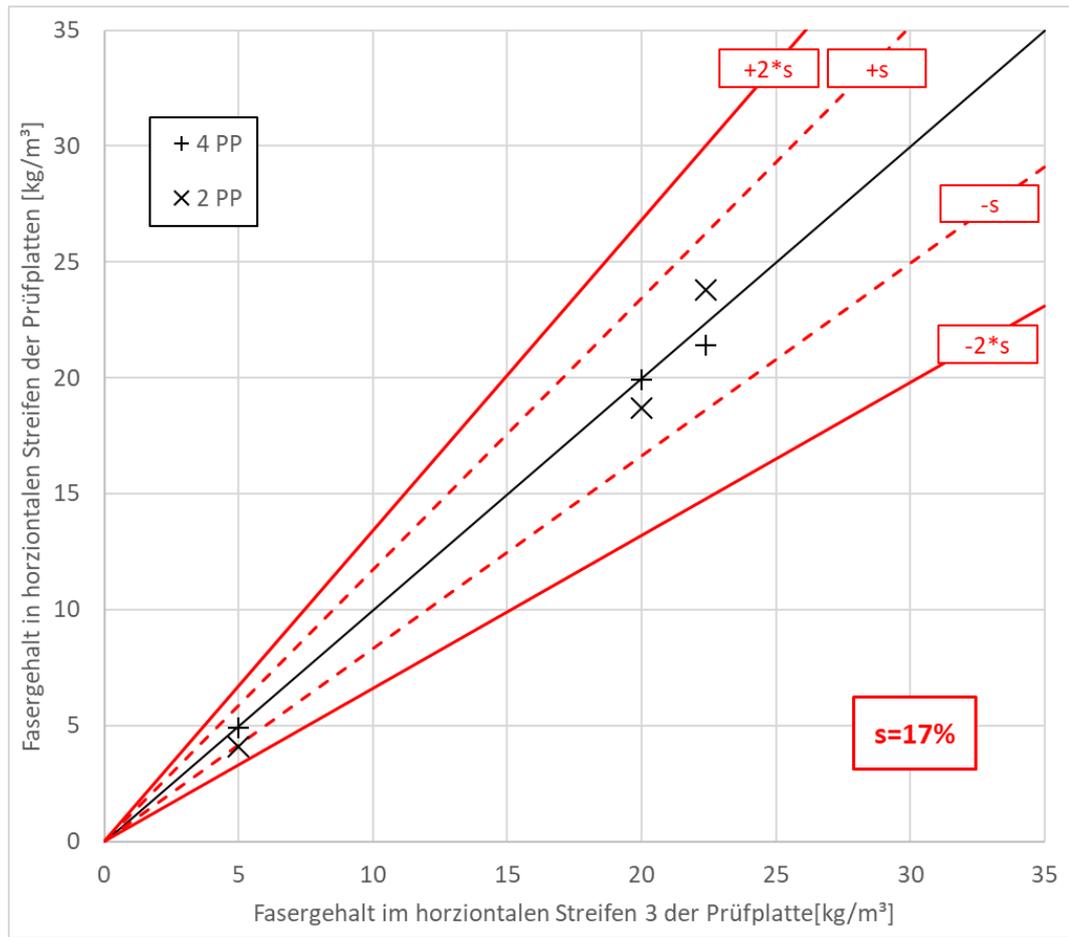


Abb.45 Vergleich der Fasergehalte zum horizontalen Streifen 3 der Prüfplatte (PP)

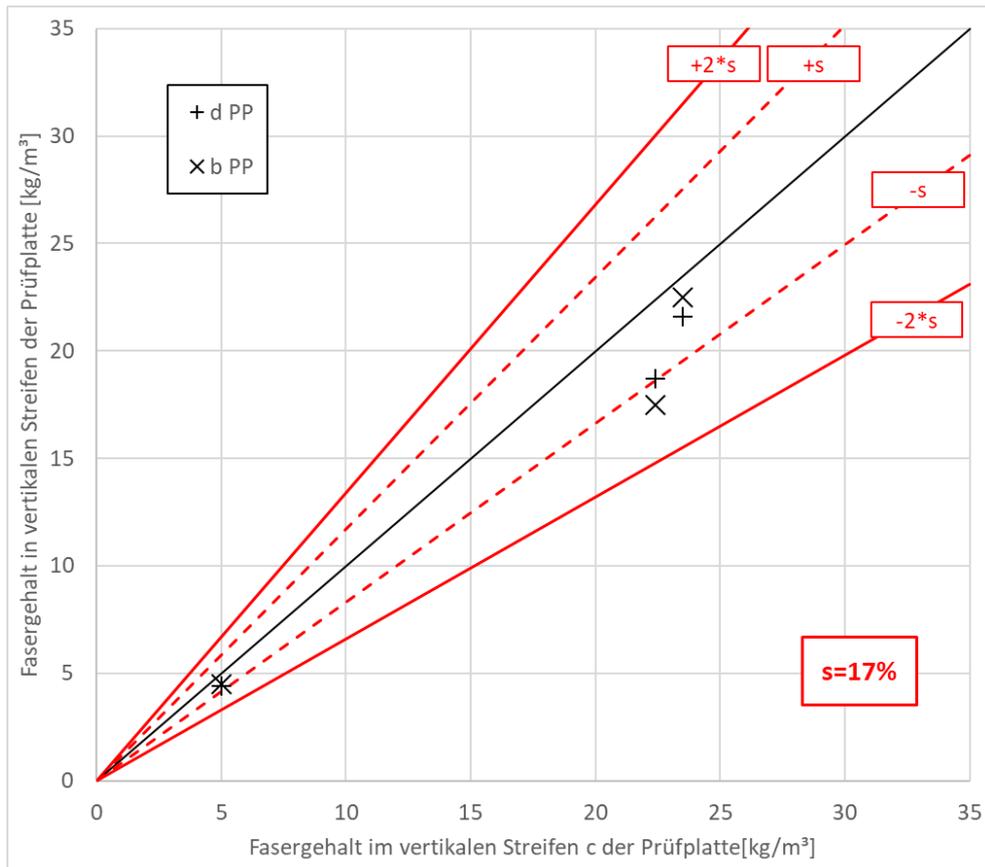


Abb.46 Vergleich der Fasergehalte zum vertikalen Streifen c der Prüfplatte (PP)

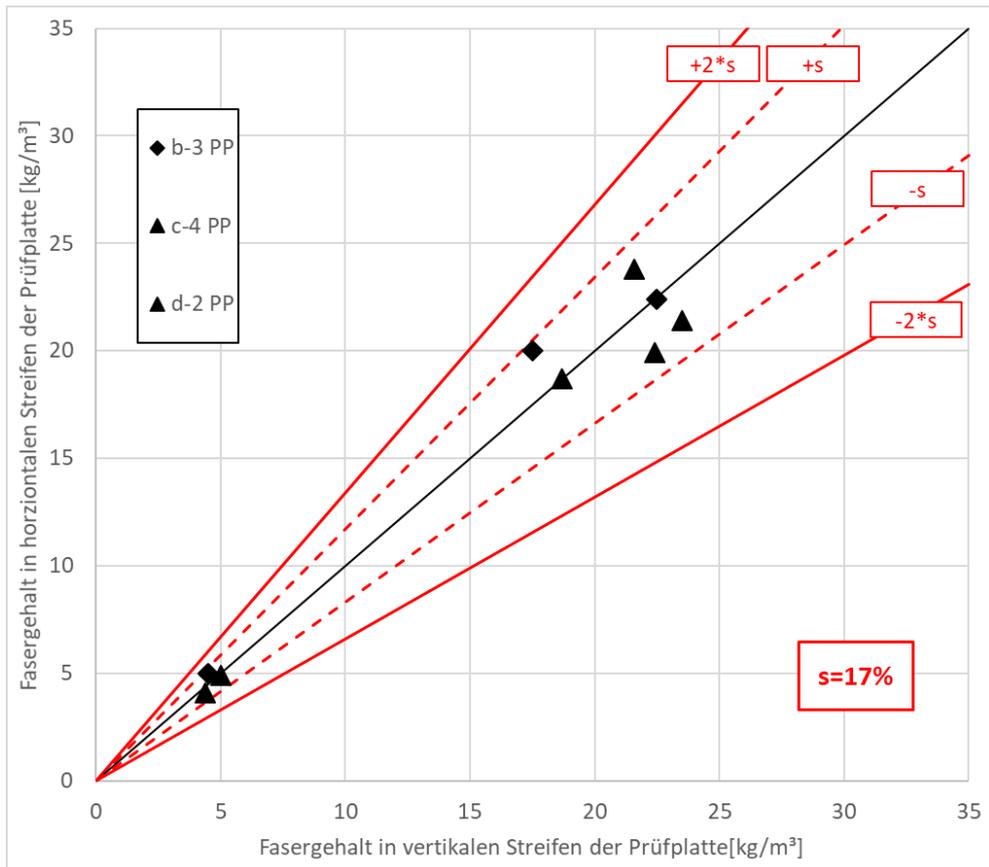


Abb.47 Vergleich der Fasergehalte in vertikalen zu horizontalen Streifen (PP)

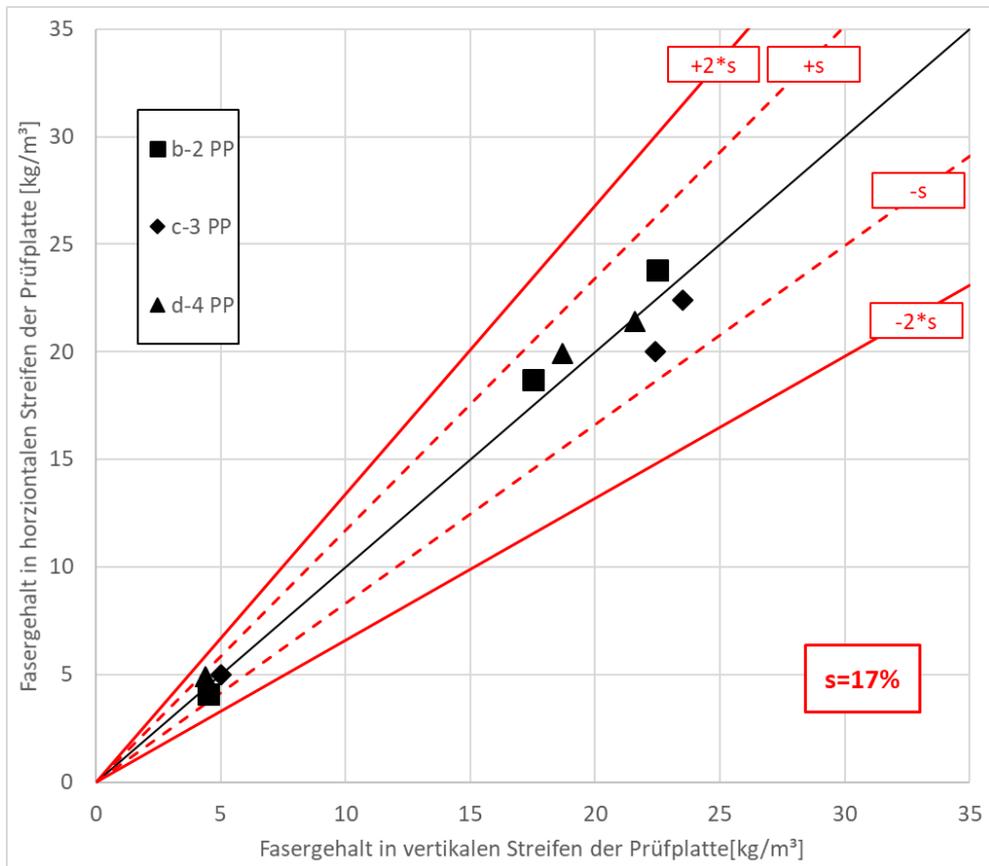


Abb.48 Vergleich der Fasergehalte in vertikalen zu horizontalen Streifen (PP)

4.5 Energieabsorption

In der *Abb.49* und *Abb.50* sind die Werte der Energieabsorption zum Fasergehalt aufgetragen.

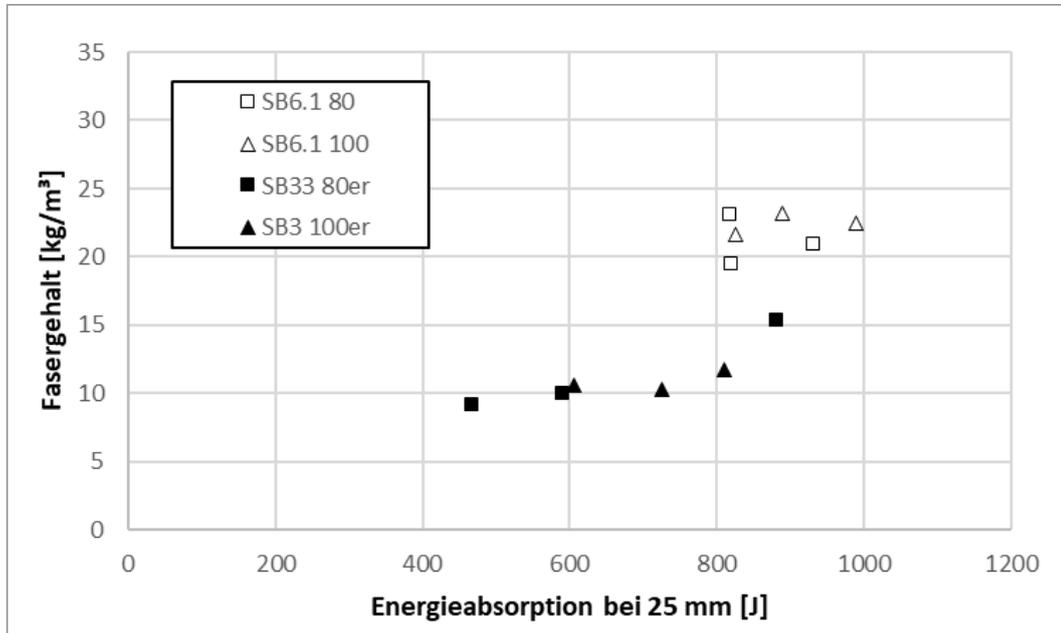


Abb.49 Energieabsorption Stahlfaserspritzbetone Phase 1 (gefüllte Symbole) und Phase 2 (leere Symbole)

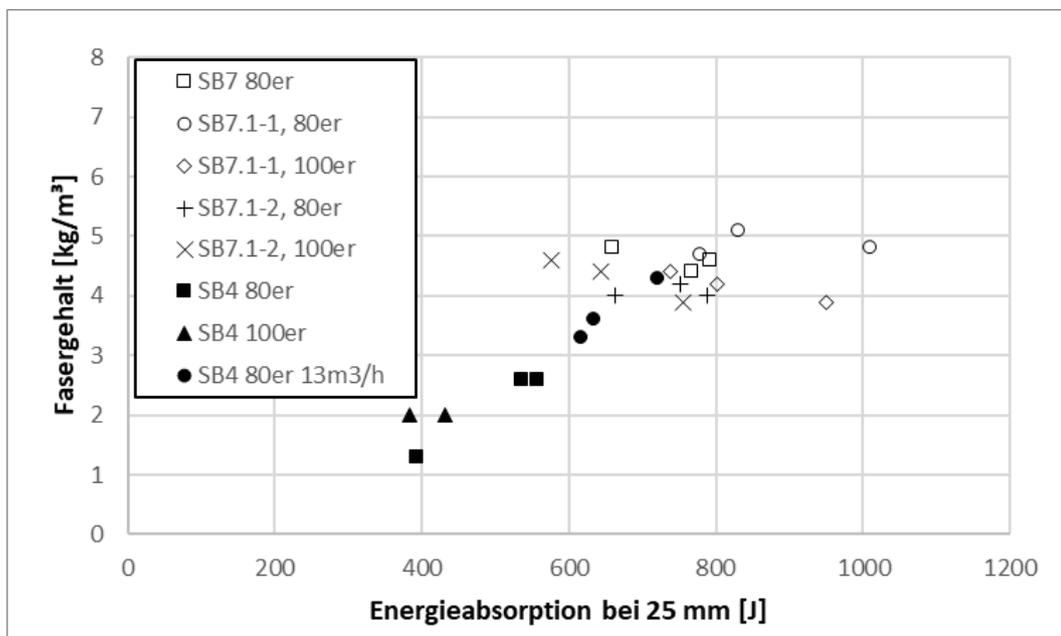


Abb.50 Energieabsorption Polymerfaserbetone Phase 1 (gefüllte Symbole) und Phase 2 (leere Symbole)

Die mit den Spritzbetonmischungen Phase 2 erreichten Werte der Energieabsorption bei 25 mm liegen bei den Stahl- und Polymerfasern höher als in Phase 1.

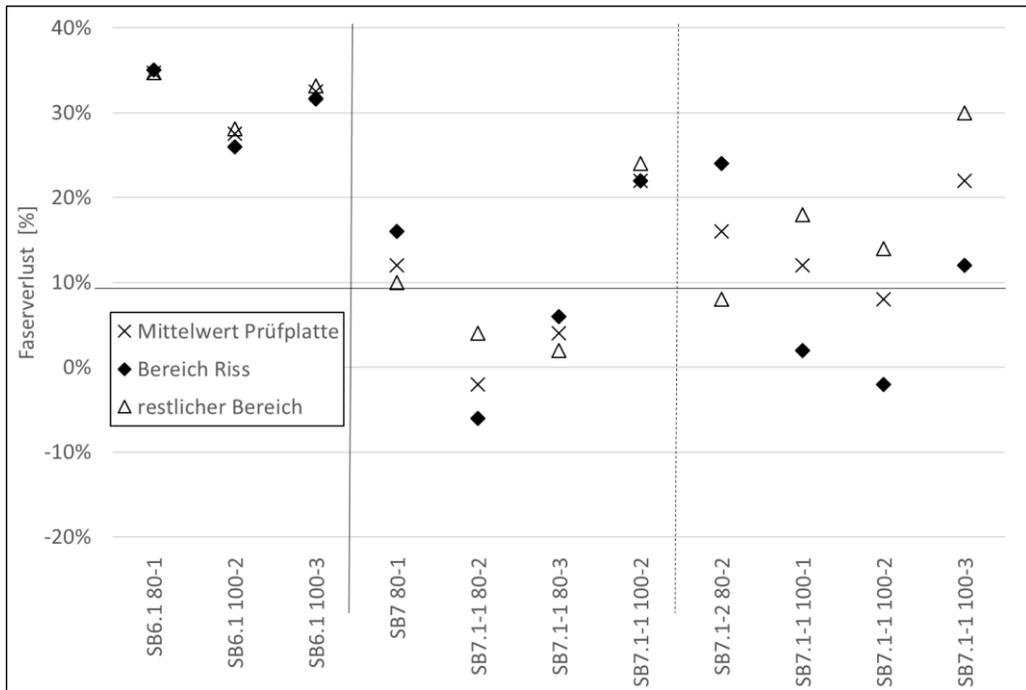


Abb.51 Faserverluste in der Prüfplatte, im Bereich der Risse und im restlichen Bereich

Innerhalb der jeweiligen Prüferien ergibt der Bezug der Energieabsorption auf den Faserverlust im Rissbereich anstelle des mittleren Faserverlustes der Platten keine wesentliche Veränderung. Der Unterschied der Fasergehalte zwischen den Prüfplatten ist gleich oder grösser als innerhalb der Prüfplatten (siehe Abb.51).

Die im Diagramm Fasergehalt-Energieabsorption Abb.50 abseits liegenden Werte können mit den detaillierteren Fasergehalten im Rissbereich nicht erklärt werden.

Werden jedoch die Mittelwerte der 3 Platten pro Serie betrachtet, ergeben sich plausible Verhältnisse zwischen Fasergehalt und Energieabsorption.

Für die Bewertung der Leistungsfähigkeit eines Spritzbetons in Bezug auf die Energieabsorption ist der Mittelwert von 3 Platten eine sinnvolle Grösse (Abb.52, Abb.53).

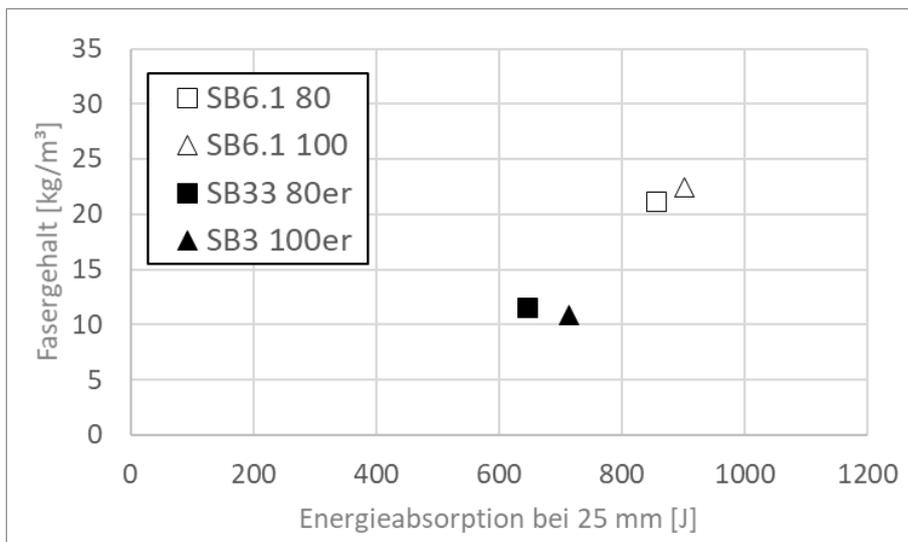


Abb.52 Serienmittel der Energieabsorption Stahlfaserspritzbetone Phase 1 (gefüllte Symbole) und Phase 2 (leere Symbole)

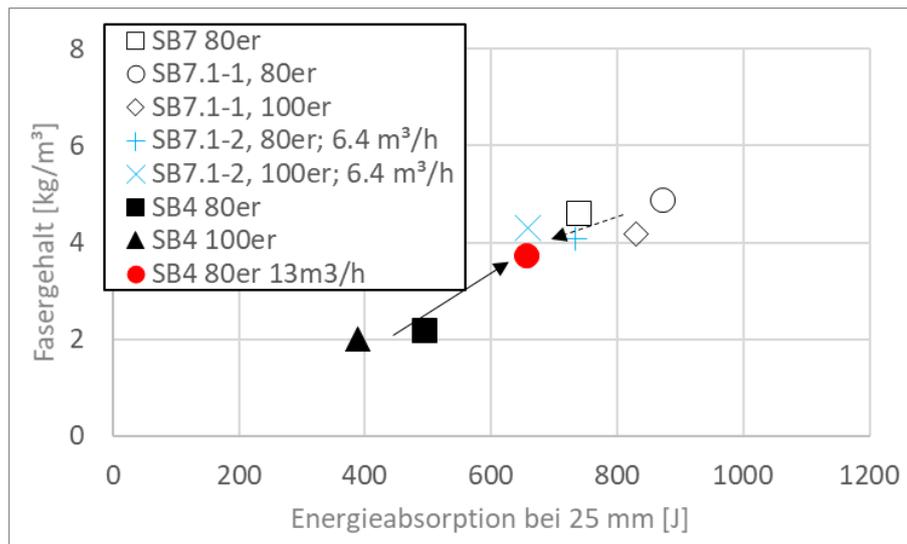


Abb.53 Serienmittel der Energieabsorption Polymerfaserspritzbetone Phase 1 (gefüllte Symbole) und Phase 2 (leere Symbole)

Beim Vergleich der Serienmittel ist die Verbesserung der Energieabsorption des SB4's aufgrund der erhöhten Pump-Förderleistung von 13 m³/h (höhere Fasergehalte, reduzierter Faserverlust siehe Kapitel 4.4.3) in der Phase 1 erkennbar.

Die Reduktion der Luftförderleistung auf 6.4 m³/h in Phase 2 (SB7.1-2) führte zwar zu gering höheren Faserverlusten (gering tiefere Fasergehalte siehe Kapitel 4.4.4), die Reduktion der Energieabsorption zum SB7.1-1 ist übereinstimmend mit dem geringen Unterschied beim Fasergehalt nicht wesentlich.

5 Schlussfolgerungen und Forschungsbedarf

5.1 Schlussfolgerungen

5.1.1 Einfluss der Spritzkistenabmessung

In diesen 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 Prüfkörpern aus Spritzkisten 50 besteht allgemein ein höheres Risiko, dass die Unterschiede bei der Druckfestigkeit, Wasserleitfähigkeit und Fasergehalt zu Prüfkörpern aus Spritzkisten 100 grösser werden. Bei der Druckfestigkeit nimmt die Bandbreite nach oben und unten zu (schlechtere und bessere Resultate), bei der Wasserleitfähigkeit ergeben sich an den Prüfkörpern aus Spritzkisten 50 tendenziell ungünstigere Resultate und beim Fasergehalt eher günstigere, 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 ergeben vergleichbare Werte.

Die Versuche zeigen, dass mit Prüfkörpern aus Spritzkisten 80 vergleichbare Resultate wie mit Prüfkörpern aus Spritzkisten 100 erreicht werden können.

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 Resultate an Prüfkörpern aus Spritzkisten 100 kann mit den vorhandenen Daten aus diesem Forschungsprojekt noch keine abschliessende Aussage gemacht werden.

5.1.2 Einfluss des Prüfortes Wand und First am Objekt

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

In der Tendenz liegen 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.

5.1.3 Übertragbarkeit Resultate Spritzkiste - Objekt

In diesen 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 sind die Resultate der Druckfestigkeit, Fasergehalt und Wasserleitfähigkeit vergleichbar mit den Resultaten von Prüfkörpern aus dem Objekt.

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

Die Fasergehalte von Spritzbetonen mit Polymerfasern liegen 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 (2 Tage) gewonnen und anschliessend bis zur Prüfung konditioniert gelagert werden.

5.1.4 Zeitpunkt der Prüfkörpergewinnung

Um die Leistungsfähigkeit des Spritzbetons zu beurteilen, muss die Entnahme der Prüfkörper für die Bohrkerndruckfestigkeit nach 2 bis 3 Tagen erfolgen und die Prüfkörper müssen anschliessend konditioniert, im Wasser oder Feuchtraum, bis zur Prüfung nach 28 Tagen 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.

Ohne konditionierte Nachbehandlung ist der Verlauf der Festigkeitsentwicklung des Spritzbetons am Objekt einer grossen Bandbreite unterworfen.

5.1.5 Fasergehalt als Steuergrösse bei der Spritzbetonapplikation

Die Fasergehalte bestimmt an Kratzproben aus dem frisch applizierten Spritzbeton stimmen gut mit den später am ausgehärteten Spritzbeton bestimmten Fasergehalten überein.

Der Fasergehalt am frisch applizierten Spritzbeton mittels Kratzprobe bestimmt, kann als Steuergrösse eingesetzt werden.

Beim Einsatz des Fasergehaltes als Steuergrösse bestimmt an einer Kratzprobe am frisch applizierten Spritzbeton besteht gegenüber dem Ablauf der Prüfnorm SN EN 14488-7 jedoch Optimierungsbedarf bei der Bestimmung des Volumens, um möglichst einfach und rasch eine Aussage vor Ort zu erhalten.

5.1.6 Faserverteilung in der Spritzkiste

Die Unterscheidung der Fasergehalte im Rissbereich und im Rest der Prüfplatte nach der Prüfung der Energieabsorption ergab keine grossen Unterschiede und somit keine erhöhte Aussagekraft zur Plausibilisierung der Resultate der Energieabsorption.

Der Fasergehalt im Randbereich der Spritzkisten war jedoch bei allen untersuchten Spritzkisten gegenüber dem Bereich der Prüfplatte erhöht.

5.2 Forschungsbedarf

Im Rahmen des vorliegenden Projektes konnten nur wenige Mischungen untersucht werden. Für Aussagen zur Bandbreite und Streuung der Prüfergebnisse aus der laufenden Produktion von Spritzbeton sollten gut dokumentierte Daten von Spritzbeton-Prüfungen während der Ausführung von Objekten gezielt gesammelt und ausgewertet werden.

Die Unterschiede bei der Druckfestigkeit, dem Fasergehalt und der Energieabsorption bestimmt an Prüfkörpern aus der Wand und aus dem First sowie die Auswirkungen auf das Tragverhalten sollten vertieft untersucht werden.

Der Einfluss und die Notwendigkeit von Nachbehandlungsmassnahmen am Spritzbeton sollte vertieft abgeklärt werden.

6 Ergänzende Bemerkungen

6.1 Bewertung der Festigkeitsklasse

6.1.1 Bewertung gemäss SN EN 14487-1 (Spritzbeton)

Die SN EN 14487-1 regelt die Begriffe, die Festlegung und die Konformität von Spritzbeton.

Jedes einzelne Prüfergebnis ist die durchschnittliche Druckfestigkeit von fünf Bohrkernen, die einer einzelnen Prüfplatte oder vor Ort entnommen wurden. Wenn der Wert von einem oder zwei Bohrkernen höher als $\pm 20\%$ des durchschnittlichen Wertes ist, ist (sind) das (die) Ergebnis(se) der Berechnung zu verwerfen, sofern der Durchschnitt an mindestens drei Bohrkernen ermittelt wurde.

Die EN 14487-1 "Spritzbeton - Teil 1: Begriffe, Festlegung und Konformität" unterscheidet die folgenden Phasen bei der Prüfung und Überwachung von Spritzbeton:

- Eignungsprüfung für Spritzbeton
- Eignungsprüfungen am Ort/Fertigungsprüfungen
- Überwachung

Die Konformitätskriterien für die Phase Überwachung sind in der Norm definiert (siehe *Abb.54*). Verfahren für die Bewertung der Druckfestigkeit in den Eignungsprüfungen sind in der EN 14487-1 nicht enthalten.

In der Überwachung unterscheidet die EN 14487-1 zwischen Ersterstellung und stetiger Herstellung. Wann der Wechsel von Erst- zu stetiger Herstellung erfolgt, ist nicht beschrieben.

Produktion	Anzahl „n“ Prüfergebnisse in der Gruppe	Kriterium 1	Kriterium 2
		Mittelwert von „n“ Ergebnissen f_{cm} in MPa	Jedes der einzelnen Prüfergebnisse f_{ci} in MPa
Erstherstellung	3	$\geq f_{ck} + 4$	$\geq f_{ck} - 4$
stetige Herstellung	15	$\geq f_{ck} + 1,48 \delta$	$\geq f_{ck} - 4$

Dabei ist

- f_{ck} die charakteristische Druckfestigkeit;
- δ die Standardabweichung von mindestens 6 Proben.

Abb.54 Konformitätsnachweis EN 14487-1, Tabelle 13

6.1.2 Bewertung nach SN EN 13791 (Bohrkerne aus dem Objekt)

Die SN EN 13791 regelt die Bewertung der Druckfestigkeit von Beton in Bauwerken oder in Bauwerksteilen.

Die Anzahl der Prüfkörper $\varnothing 50$ mm für die Bestimmung eines Einzelwertes wird im nationalen Element der SN EN 13791 geregelt. Bei einem Grösstkorn von 8 mm und einen Durchmesser von 50 mm gilt der Mittelwert von 3 Prüfwerten als ein Wert.

Im nationalen Element der SN EN 14487-1:2005 wird zu Ziffer 5.5 folgendes festgehalten:

Die Bohrkerndruckfestigkeit wird, wenn nichts anderes festgelegt ist, an Prüfkörper mit einem Durchmesser und einer Höhe von 50 mm gemäss SN EN 13791 bestimmt und beurteilt.

Nach SIA 198:2004 ist für die Beurteilung der Bohrkerndruckfestigkeit von Spritzbeton die SN EN 13791 massgebend.

Die SN EN 13791 "Bewertung der Druckfestigkeit von Beton in Bauwerken oder in Bauwerksteilen" unterscheidet nicht nach Phasen der Überwachung der Ausführung, sondern nach verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten. In der Regel werden für die Bewertung von Spritzbeton in der laufenden Herstellung die Verfahren nach 7.3 Ansatz A (3 bis 14 Werte) oder Ansatz B (ab 15 Werten) verwendet (siehe Abb.55).

7.3.3 Ansatz B

Die geschätzte charakteristische Druckfestigkeit des Prüfbereiches ist der niedrigere der folgenden beiden Werte:

$$f_{ck, is} = f_{m(n), is} - k \quad (3)$$

oder

$$f_{ck, is} = f_{is, niedrigst} + 4 \quad (4)$$

Die Spanne k hängt von der Anzahl der Prüfergebnisse n ab; der geeignete Wert ist aus Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2 — Spanne k für eine kleine Anzahl von Prüfergebnissen

n	k
10 bis 14	5
7 bis 9	6
3 bis 6	7

Abb.55 Verfahren Ansatz B zur Schätzung der charakteristischen Druckfestigkeit [SN EN 13791, Ziffer 7.3.3]

6.1.3 Auswahl des Bewertungsverfahrens

In beiden Normen sind die Phasen Erstprüfung und Überwachung nicht vollständig in der Norm geregelt. In den jeweiligen Vertragsunterlagen sollten diese Lücken geschlossen werden.

Der grösste Unterschied der beiden Verfahren liegt darin, dass die EN 14487-1 die geprüften Werte der Druckfestigkeit des Spritzbetons auf dem Niveau f_{ck} bewertet, analog zu separat hergestellten Probekörpern (Würfeln, Zylinder) in der SN EN 206 für Beton.

Die EN 13791 dagegen bewertet auf dem Niveau $f_{ck, is}$, welches 85% von f_{ck} beträgt.

Der Bemessungswert der Druckfestigkeit f_{cd} wird nach SIA 262 mit Umrechnungsfaktoren und dem Widerstandsbeiwert für Beton γ_c berechnet. Die Reduktion von f_{ck} erfolgt, da bei Bohrkernen aus dem Objekt, anders als bei separat hergestellten Probekörpern, die Auswirkungen des Transports und der Verarbeitung am Objekt in den Prüfergebnissen enthalten sind.

In den vorliegenden Versuchen wurden beim Spritzbeton Prüfkörper aus dem Objekt oder aus gespritzten Platten entnommen. In beiden Fällen sind die Auswirkungen des Transports der Grundmischung und der Verarbeitung in den Prüfergebnissen enthalten.

Die Druckfestigkeiten an Prüfkörpern aus Spritzkisten 80 und Spritzkisten 100 ergaben eine Bandbreite von 85 bis 100 % der Druckfestigkeit an Prüfkörpern aus der Wand. Bei Prüfkörpern aus Spritzkisten 50 erhöhte sich die Bandbreite auf 80 bis 110% der Druckfestigkeit an Prüfkörpern aus der Wand.

Die Forderung in der aktuellen SIA 198:2004, die Bewertung nach SN EN 13791 durchzuführen, ist nachvollziehbar und bei den Resultaten aus diesen Versuchen sinnvoll.

Um die Leistungsfähigkeit des Spritzbetons und nicht die Wirksamkeit der Nachbehandlung zu bewerten, müssen die Prüfkörper jedoch möglichst früh entnommen und unter konditionierten Bedingungen gelagert werden.

6.2 Faserverluste und Massnahmen

Da in der Phase 1 die Faserverluste höher als erwartet ausgefallen sind, wurde in der Phase 2 die erste Messung der Fasergehaltsbestimmung als Steuergrösse herangezogen.

Der Fasergehalt der angelieferten Grundmischungen wurde pro Kubikmeter durch Auswaschen bestimmt. Am frisch applizierten Spritzbeton wurden Kratzproben entnommen und der Fasergehalt bestimmt (siehe Kapitel 2.2).

Beim Spritzbeton SB6 mit demselben Zement der Phase 1 betrug die Faserverluste an der Wand bestimmt mittels Kratzprobe 50%. Der Faserverlust der Grundmischung zu Beginn des Entladens betrug 5%. Trotz des Wechsels auf die Stahldüse 50 mm und anschliessend zusätzlich der Reduktion der Luftförderleistung bis auf 5 m³/h konnte der Faserverlust an der Wand nicht massgebend reduziert werden.

Da das vorliegende Forschungsprojekt nicht auf die Optimierung des Mischungsentwurfes ausgelegt war, wurde beschlossen die Versuche abzubrechen und einen Zementwechsel vorzunehmen. Mit dem Wechsel des Zementes von CEM II/A-LL auf CEM II/A-D wurden Verbesserungen beim Faserrückhalt erwartet, aufgrund der erhöhten Mahlfineinheit des Zementes und der erhöhten Klebrigkeit durch das enthaltende Microsilica.

Bei der Wiederholung des Versuches mit der angepassten Zusammensetzung SB6.1 wurden tiefere Faserverluste gemessen. Nach einer Variation der Düse und Luftmenge wurden die Versuche mit der Stahldüse mit einem Ausgangsdurchmesser von 40 mm und einer Luftförderleistung von 10 m³/h durchgeführt. Die Kratzprobe an der Wand ergab einen Faserverlust um 35%.

Beim SB7 mit Polymerfasern betrug die Faserverluste an der Wand bei der Steuergrössen-Prüfung zuerst um 35%. Nachdem später beim Spritzen bei der Kratzprobe aus einer Spritzkiste ein Faserverlust von 53% gemessen wurde, brach der Versuchsleiter die Spritzversuche nach der Herstellung der Spritzkisten 80x80 cm ab. In der Grundmischung wurden bis zum Abbruch Fasergehalte von 6.8 und 5.5 kg/m³ gemessen, welche über der Faserdosierung von 5 kg/m³ lagen.

Nach der Prüfung Energieabsorption nach 28 Tagen an den Prüfplatten aus den Spritzkisten 80x80cm wurde auch der Fasergehalt an diesen Prüfplatten bestimmt. Diese Verluste sind mit 4-12% deutlich tiefer als die 53% gemessen an einer anderen Spritzkiste mittels Kratzprobe. Eine Schwankung der Fasergehalte in der Ausgangsmischung GM7 (bis zu 23% Mehrgehalt) ist als Mitursache für die Differenz wahrscheinlich (siehe auch Kapitel 4.4.7). Der Abbruch der Versuche bleibt rückblickend angemessen.

Bei der Wiederholung am 12.06.2019 mit Luftförderleistung von 12.8 m³/h lagen die Faserverluste von SB 7.1-1 innerhalb der Steuergrössen. Von den Mischungen wurde eine zusätzliche Serie SB7.1-2 mit 6.4 m³/h Luftförderleistung gespritzt.

Die Situation zeigt die Schwierigkeit der befugten Person vor Ort, welche angemessene Massnahmen ergreifen muss und deren Konsequenzen auf. Wird der Ablauf abgebrochen oder eine Ladung zurückgewiesen, hat dies unmittelbar zeitliche und finanzielle Auswirkungen. Wird dagegen ohne Abbruch weitergearbeitet, besteht die Hoffnung, dass die Auswirkungen nicht so relevant sind und keine weiteren Konsequenzen entstehen.

Für die Steuerung der Qualität ist wesentlich, dass im Vorfeld die kritischen Aspekte erkannt werden, geeignete Steuergrössen bestimmt werden und die Grenzwerte sowie das Vorgehen bei Überschreitungen geregelt sind.

Werden die Steuergrössen durch Prüfung bestimmt, ist eine schnelle Aussage mit genügender Aussagekraft wesentlich. Bei der Verwendung des Fasergehaltes am frisch applizierten Spritzbeton nach SN EN 14488-7 ist die Bestimmung des Volumens der Probe durch Tauchwägung im Wasser von den Hilfsmitteln her aufwändig und wenig praktikabel bei einer Prüfung am Spritzort. Idealer wäre da ein kleiner Stahlbehälter der vollgespritzt und die Oberfläche abgezogen wird. Am daran bestimmten Volumen kann anschliessend

direkt die Rohdichte und der Fasergehalt durch Auswaschen bestimmt werden oder die Rohdichte und durch wägen einer Kratzprobe das Volumen der Kratzprobe mit der Rohdichte berechnet werden.

Die vorliegenden Versuche zeigen jedoch, dass der Fasergehalt insbesondere in den Spritzkisten 50 tendenziell höher liegt als am Objekt. Dies ist bei einer Optimierung näher zu untersuchen.

Innerhalb der Produktionskontrolle sind die Freiheiten des Herstellers grösser als im Rahmen des Konformitätsnachweises. Somit könnte z.B. im Rahmen der Produktionskontrolle die Bestimmung des Fasergehalts nur aufgrund des Gewichts der ausgewaschenen Fasern mit einer Rohdichte aus der Erfahrung der bisherigen Spritzbetonherstellung durchaus zielführend eingesetzt werden.

Bei der Optimierung des Mischungsentwurfes und der Bestimmung des Fasergehalts als Steuergrösse besteht noch Abklärungsbedarf.

7 Empfehlungen für die Umsetzung in die Praxis und Anwendung

Für die Empfehlungen wurden zusätzliche Erfahrungen und Rückmeldungen aus der Praxis miteinbezogen.

7.1.1 Auf Stufe Normengremien

Die Druckfestigkeit wird in den Normen SN EN 14487-1 (Spritzbeton-Teil 1: Begriffe, Festlegung und Konformität) und SN EN 13791 (Bewertung der Druckfestigkeit von Beton in Bauwerken oder in Bauwerksteilen) unterschiedlich nachgewiesen.

Der Unterschied liegt insbesondere darin, ob die Messwerte in Bezug auf das Niveau $f_{ck, is}$ (85% von f_{ck} , EN 13791) oder f_{ck} (EN 14487-1) ausgewertet werden. Der Verweis auf die prEN 13791 in der aktuell gültigen Version der SIA 198:2004 ist grundsätzlich nachvollziehbar, da die Auswirkungen des Transports und der Verarbeitung am Objekt (hier Spritzbeton) in den Messresultaten enthalten sind.

Es wird empfohlen, die Bewertung weiterhin nach SN EN 13791 durchzuführen. Ob dies beibehalten wird, ist im Rahmen der Revision der SIA 198 durch die Arbeitsgruppe SIA 198 zu entscheiden.

Je nachdem ob der Nachweis nach EN 14487-1 oder EN 13791 zu erfolgen hat, sollten die folgenden Aspekte in der revidierten SIA 198 geregelt werden.

EN 14487-1:

- Konformitätskriterien für die Eignungsprüfungen (z.B. Nachweis eines ausreichenden Vorhaltemasses)
- Klärung der Regel, wann von der Erst- in die stetige Herstellung des Spritzbetons gewechselt werden kann.

EN 13791:

- Anzuwendendes Verfahren für die jeweilige Produktionsphase (Eignungsprüfungen, Ersterstellung, stetige Herstellung)
Empfehlung: Ansatz B (7.3.3) mit der Option Ansatz A (7.3.2), wenn genügend Daten vorliegen.
- Klärung der Regel, wann von der Erst- in die stetige Herstellung des Spritzbetons gewechselt werden kann, falls in der Ersterstellung und stetige Herstellung die Prüfhäufigkeiten und/oder Konformitätskriterien unterschiedlich sind.

Um die Leistungsfähigkeit des Spritzbetons zu bewerten, sollte der Zeitpunkt der Probenahme möglichst früh (2-3 Tage) definiert werden und die Lagerung bis zur Prüfung nach SN EN 12390-2 gefordert werden.

Es wird empfohlen, die in der SIA 198 festgelegten Nachweise klar als Verfahren für den Konformitätsnachweis darzustellen und darauf hinzuweisen, dass der Hersteller des Spritzbetons frei ist im Rahmen seiner Produktionskontrolle weitere und andere Verfahren einzusetzen.

Zudem wird empfohlen, die Grundsätze zur Qualitätskontrolle von Spritzbeton gezielt zu schulen, z.B. im Rahmen der Einführung der neuen, revidierten SIA 198.

7.1.2 Auf Stufe Bauherren und Projektverfasser

Den Bauherren und Projektverfassern wird empfohlen Spritzbeton nach Eigenschaften festzulegen, sofern im Projekt die Eigenschaften relevant sind.

Solange die Aspekte gemäss Kapitel 0 nicht normativ umgesetzt sind, wird empfohlen die Hinweise in den Projektunterlagen sinngemäss zu regeln.

Den Bauherren und Projektverfassern wird empfohlen in den Prüfplänen des Bauherrn und des Unternehmers Prüfungen am Spritzbeton angemessen als Konformitätsnachweis einzusetzen. Das Vorgehen in der Produktionskontrolle sollte eigenständig im Kompetenzbereich des Spritzbetonherstellers liegen.

Mehr Prüfungen bedeuten nicht zwingend, dass besser oder schneller reagiert wird und dadurch die geforderten Eigenschaften sicherer eingehalten werden.

Keine Prüfung/Prüfverfahren kann die Qualität des Spritzbetons verändern. Nur mit angemessenen Reaktionen und Handlungen kann die Qualität des Spritzbetons beeinflusst werden.

Beim Personal sind die Fachkenntnisse und Erfahrung wesentlich. Für Schlüsselpositionen wird empfohlen, nachgewiesen geschultes Personal zu fordern (z.B. EFNARC Nozzleman oder gleichwertige Erfahrungs-/Schulungsnachweise).

Bei grösseren Objekten wird empfohlen, die Übertragbarkeit der Werte von separaten Spritzkisten mit dem Objekt zu Beginn und bei wesentlichen Wechseln im System zu überprüfen.

7.1.3 Auf Stufe Spritzbetonhersteller

Dem Spritzbetonhersteller wird empfohlen die Grundmischung als Beton nach Zusammensetzung in der Schnittstelle zum Hersteller der Grundmischung (Betonhersteller) festzulegen.

Der Hersteller des Spritzbetons ist derjenige, welche die Grundmischung appliziert und somit den Spritzbeton herstellt / produziert.

Was der Betonmaschinist im Betonwerk bei der Herstellung der Grundmischung ist, ist der Düsenführer vor Ort bei der Herstellung des Spritzbetons. Der Düsenführer ist massgebend und technisch verantwortlich für die Qualität des Spritzbetons. Diesem Stellenwert entsprechend sind seine Kompetenzen festzulegen sowie die Erfahrung und Schulung zu fördern und dokumentieren.

Aufgrund von Erfahrungen oder schlüssigen Vorversuche sind die Steuergrössen, Grenzwerte und Massnahmen für die jeweiligen Arbeitsschritte vorgängig festzulegen und während der Ausführung, deren Umsetzung zu kontrollieren.

Der Herstellung der Spritzkisten, deren Nachbehandlung und Transport ins Labor ist ein hoher Stellenwert einzuräumen, damit repräsentative Resultate erreicht werden.

Erfahrungsgemäss ist das Erkennen von Abweichungen einfacher als das Ergreifen von angemessenen Massnahmen. Die Steuerung der Qualität ist eine anspruchsvolle Führungsaufgabe.

Literaturverzeichnis

Normen

- [1] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2005), **Spritzbeton – Teil 1: Begriffe, Festlegung und Konformität**, Norm SN EN 14487-1
- [2] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2004), **Untertagbau - Ausführung**, Norm SIA 198
- [3] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2007), **Bewertung der Druckfestigkeit von Beton in Bauwerken oder in Bauwerksteilen**, Norm SN EN 13791
- [4] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2005), **Prüfung von Spritzbeton-Teil 1: Probenahme von Frisch- und Festbeton**, Norm SN EN 14488-1
- [5] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2006), **Prüfung von Spritzbeton-Teil 5: Bestimmung der Energieabsorption bei faserverstärkten plattenförmigen Prüfkörpern**, Norm SN EN 14488-5
- [6] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2006), **Prüfung von Spritzbeton-Teil 7: Fasergehalt von faserverstärktem Beton**, Norm SN EN 14488-7
- [7] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2016), **Beton-Festlegung, Eigenschaften Herstellung und Konformität**, Norm SN EN 206
- [8] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (1999), **Prüfung von Frischbeton – Teil X**, Norm SN EN 12350-X; X=5: Ausbreitmass; X=6: Frischbetonrohichte; X=7 Luftgehalt von Frischbeton
- [9] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2000), **Prüfung von Festbeton-Teil 2: Herstellung und Lagerung von Prüfkörpern**, Norm SN EN 12390-2
- [10] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (1999), **Stahlfaserbeton**, Empfehlung SIA 162/6
- [11] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2013), **Betonbau – Ergänzende Festlegungen**, Norm SIA 262/1
- [12] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2005), **Prüfverfahren für Beton mit metallischen Fasern — Bestimmung des Fasergehalts in Frisch- und Festbeton**, Norm SN EN 14721

Dokumentation

- [13] Breitenbücher, R. (2015): **Zusammenhänge zwischen verschiedenen Regelwerken für Spritzbeton/-Mörtel in Deutschland**, Alpbach Spritzbeton-Tagung 2015
 - [14] Hanskat, Ch. (2011): **Shotcrete Testing – Who, Why, When and How**. Shotcrete - Summer 2011
 - [15] Jacobs, F.; Hunkeler, F., Ungricht, H., Mühlen, B. (2018): **Prüfung und Bewertung der Betonqualität am Objekt**, ASTRA Forschungsbericht 691.
 - [16] Letho, J; Harbron, R; Melbye T.; (2012): **Mit dem EFNARC Düsenführer-Zertifizierungsprogramm die höchsten Anforderungen erfüllen**. Alpbach Spritzbeton-Tagung 2012
 - [17] Jolin M., Thomassin M., Nehasil J. (2012): **Shotcrete education and nozzleman certification in North America**, Alpbach Spritzbeton-Tagung 2012
 - [18] Wetzig V., Kuhnenn P., Wietek M. (2015): **Influence o fair consumption and nozzle distance on properties of applied sprayed concrete, i²Mine**, Alpbach Spritzbeton-Tagung 2015
 - [19] Wetzig V., Reinhold M., Hermann M. (2015): **Langzeitverhalten von Kunststofffaserspritzbeton im Untertagebau**, ASTRA Forschungsbericht 1546
 - [20] Zhang, L.: **Variability of Compressive Strength of Shotcrete in a Tunnel-Lining Project**. Shotcrete – Fall 2014
 - [21] Badef, A.: **Statistical Analysis of the Variability of Shotcrete Strength**. Global Journey of Researches in Engineering, Volume 16 Issue 4, 2016
 - [22] Zhang, L.; Morgan, D. R.: **Quality Control of Wet-Mix Fiber Reinforced Shot-crete in Ground Support**. ECI Digital Archives, Shotcrete for Underground Support XII
 - [23] Tiefbauamt Graubünden / Besondere Bestimmungen Teil 2, Anhang 11: **Vorschriften für die Ausführung von Spritzbetonarbeiten**. 2017
 - [24] Pittino G., Galler R. (2012): **The slab test according to OENORM EN 14488-5 test and numerical calculations**, Alpbach-Spritzbeton-Tagung 2012
 - [25] Bjontegaard O., Myren S.: **Fibre reinforced sprayed concrete panel test – test procedures and influencing factors**, Alpbach-Spritzbeton-Tagung 2018
-

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 18.12.2019

Grunddaten

Projekt-Nr.: AGT2016/004
Projekttitel: Einfluss der Applikationsbedingungen auf die Eigenschaften von Faserspritzbeton
Enddatum: 31.12.2019

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

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

Die Versuche zeigen, dass auch mit Prüfkörpern aus Spritzkisten kleiner 100x100 cm und Spritzbetonapplikation mit Spritzroboter repräsentative Werte für die Druckfestigkeit, den Fasergehalt und die Prüfung der Energieabsorption erreicht werden können. Bei Prüfkörpern aus Spritzkisten 50x50 cm besteht jedoch ein höheres Risiko, dass die Unterschiede der Eigenschaften zum Spritzbeton am Objekt grösser werden.

Die Druckfestigkeit wurde auch an Prüfkörpern aus dem First bestimmt. In der Tendenz liegen die 28-Tage Druckfestigkeiten der Prüfkörper aus dem First bei 85 bis 100% der 28-Tagedruckfestigkeiten der Prüfkörper aus der Wand.

Um die Leistungsfähigkeit des Spritzbetons zu beurteilen, muss die Entnahme der Prüfkörper für die Bohrkern-druckfestigkeit nach 2 bis 3 Tagen erfolgen und die Prüfkörper müssen anschliessend konditioniert, im Wasser oder Feuchtraum, bis zur Prüfung nach 28 Tagen 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.

Die Unterscheidung der Fasergehalte im Rissbereich und im Rest der Prüfplatte nach der Prüfung der Energieabsorption ergab keine grossen Unterschiede und somit keine erhöhte Aussagekraft zur Plausibilisierung der Resultate der Energieabsorption.

Der Fasergehalt im Randbereich der Spritzkisten war jedoch bei allen untersuchten Spritzkisten gegenüber dem Bereich der Prüfplatte erhöht.

Die Fasergehalte bestimmt an Kratzproben aus dem frisch applizierten Spritzbeton stimmten gut mit den später am ausgehärteten Spritzbeton bestimmten Fasergehalten überein.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Das Ziel Aussagen zur Übertragbarkeit der Druckfestigkeit und des Fasergehaltes von Spritzbeton in Spritzkisten zum Spritzbeton am Objekt zu liefern, wurde erreicht.

Die Versuche zeigen, dass auch mit Prüfkörpern aus Spritzkisten repräsentative Werte für die Druckfestigkeit, den Fasergehalt und die Prüfung der Energieabsorption erreicht werden können.

Folgerungen und Empfehlungen:

Für die Qualitätskontrolle von Spritzbeton können Spritzkisten 80x80 cm und 100x100 cm empfohlen werden. Aufgrund der Tragweite der Auswirkungen in der Praxis kann bezüglich dem Einsatz von Spritzkisten 50x50 cm aufgrund der vorhandenen Daten keine abschliessende Empfehlung abgegeben werden.

Für Aussagen zur Bandbreite und Streuung der Prüfergebnisse aus der laufenden Produktion von Spritzbeton sollten gut dokumentierte Daten von Spritzbeton-Prüfungen während der Ausführung von Objekten gezielt gesammelt und ausgewertet werden.

Die Unterschiede bei der Druckfestigkeit, dem Fasergehalt und der Energieabsorption bestimmt an Prüfkörpern aus der Wand und aus dem First sowie die Auswirkungen auf das Tragverhalten sollten vertieft untersucht werden.

Der Fasergehalt am frisch applizierten Spritzbeton mittels Kratzprobe bestimmt, kann als Steuergrösse eingesetzt werden.

Der Arbeitsgruppe SIA 198 wird empfohlen, die Bewertung der Druckfestigkeit von Spritzbeton nach SN EN 13791 beizubehalten unter Berücksichtigung der im Forschungsbericht aufgeführten Punkte (Schlussbericht Kapitel 7.1.1).

Publikationen:

Publikationen zum Thema sind geplant.

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Weiss

Vorname: Roland

Amt, Firma, Institut: VersuchsStollen Hagerbach AG

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Im Rahmen des vorliegenden Projekts konnten nur wenige Mischungen untersucht werden, dennoch lieferten die Versuche wertvolle Aussagen zur Übertragbarkeit der Druckfestigkeit und des Fasergehalts von Spritzkisten zu Spritzbeton am Objekt. Zusätzlich ergaben sich wichtige Erkenntnisse zur Bestimmung des Fasergehalts mittels Kratzproben und deren Anwendung als Steuergrösse.

Umsetzung:

Die Erkenntnisse sollen Bauherren, Planer und Unternehmer in der Festlegung angemessener Prüf- und Kontrollpläne für Objekte mit Spritzbeton behilflich sein und in Tagungen/Schulungen vermittelt werden. Die Datenbasis des vorgelegten Berichts ist jedoch für eine generelle systematische Empfehlung/Umsetzung nicht ausreichend.

weitergehender Forschungsbedarf:

Weiterer Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der Übertragbarkeit der Resultate zum Fasergehalt auf die Energieabsorption (Quadratplattenversuche). Des Weiteren sollten die den Faserrückprall beeinflussenden Materialparameter genauer untersucht werden. Die Datenbasis zu Bandbreiten und Streuungen sollte durch Auswertung gut dokumentierter Objekte verbreitert werden.

Einfluss auf Normenwerk:

Die gewonnenen Erkenntnisse und Empfehlungen können den Normengremien für die Überarbeitung der Aspekte Qualitätskontrolle und Nachweise in der SIA 198 sowie den nationalen Elementen der Spritzbetonnormen SN EN 14487-1 und -2 dienen.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Kaufmann

Vorname: Josef

Amt, Firma, Institut: Empa, Dübendorf

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Das Verzeichnis der in der letzten Zeit publizierten Schlussberichte kann unter www.astra.admin.ch (Forschung im Strassenwesen --> Arbeitshilfen, Formulare, Merkblätter --> Formulare) heruntergeladen werden.