



Langzeitverhalten von Kunststofffaserspritzbeton im Untertagebau

**Long-term behaviour of plastic fibre reinforced sprayed
concrete for tunnels**

**Comportement à long terme de béton projeté renforcé de
fibres plastiques dans l'exploitation souterraine**

**VersuchsStollen Hagerbach AG
Volker Wetzig
Matthias Reinhold
Michael Hermann**

**Empa
Josef Kaufmann**

**Forschungsprojekt FGU 2010/005_OBF auf Antrag der Arbeitsgruppe
Tunnelforschung (AGT)**

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

Langzeitverhalten von Kunststofffaserspritzbeton im Untertagebau

**Long-term behaviour of plastic fibre reinforced sprayed
concrete for tunnels**

**Comportement à long terme de béton projeté renforcé de
fibres plastiques dans l'exploitation souterraine**

VersuchsStollen Hagerbach AG
Volker Wetzig
Matthias Reinhold
Michael Hermann

Empa
Josef Kaufmann

**Forschungsprojekt FGU 2010/005_OBF auf Antrag der Arbeitsgruppe
Tunnelforschung (AGT)**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Volker Wetzig

Mitglieder

Josef Kaufmann

Matthias Reinhold

Michael Hermann

Begleitkommission

Präsident

Georg Anagnostou

Mitglieder

René Bolliger

Gustav Bracher

Marcel Züger

Antragsteller

Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT)

Bezugsquelle

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

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Zusammenfassung	7
Summary	9
Résumé	11
1 Einleitung	13
2 Zielsetzung.....	15
2.1 Generelle Zielsetzung	15
2.2 Detailziele	16
3 Stand der Technik	17
3.1 Rückprall und Faserrückprall	17
3.1.1 Rezeptur	17
3.1.2 Luftmenge	17
3.1.3 Fördermenge	17
3.1.4 Düsenabstand	17
3.2 Faserorientierung	18
3.3 Dauerlastverhalten	19
3.3.1 Platten	19
3.3.2 Balken	19
3.4 Beständigkeit.....	20
4 Untersuchungsprogramm und -methode	23
4.1 Untersuchte Fasern.....	23
4.2 Spritzbetonrezeptur	24
4.3 Herstellung von Quadratplatten	24
4.4 Felsimitation	25
4.5 Prüfmethoden.....	26
4.5.1 Charakterisierung des Ausgangsbetons	26
4.5.2 Charakterisierung des applizierten Spritzbetons	27
4.5.3 Rückprall, Faserrückprall, Fasergehalt	27
4.5.4 Dauerlastprüfungen.....	29
4.5.5 Ermittlung der Faserverteilung und -orientierung mittels RCT	35
4.5.6 Beständigkeit gegen chemischen Angriff	39
4.6 Arbeitsprogramm.....	41
5 Spritzverhalten von Kunststofffaserspritzbeton.....	43
5.1 Spritzbetoncharakterisierung	43
5.2 Spritzversuche: allgemeine Feststellungen/Beobachtungen	43
5.3 (Faser-) Rückprall	44
5.4 Faserorientierung	49
5.5 Fazit Untersuchung Spritzverhalten	53
6 Dauerlastverhalten	55
6.1 Prüfergebnisse	55
6.1.1 Plattenprüfung	55
6.1.2 Biegebalken.....	61
7 Chemische Beständigkeit	65
7.1 Rissweiten nach Rissinduktion.....	65

7.2	Residuelle Festigkeiten.....	65
7.3	Makroskopische Beobachtungen nach der Beanspruchung	72
7.4	Mikroskopische Untersuchungen.....	75
8	Diskussion der Untersuchungsergebnisse.....	83
9	Brandgasemissionen.....	85
9.1	Randbedingungen.....	85
9.1.1	Fasertyp / Fasergehalt	85
9.1.2	Brandlasten	86
9.2	Brandgase / Pyrolysegase	87
9.2.1	Brandgase von Fahrzeugbränden	87
9.2.2	Brand- / Pyrolysegase von Kunststofffasern.....	89
9.2.3	Vergleich Schadgase Fahrzeugbrand und Kunststoff-Macrofasern.....	91
9.2.4	Tunnelventilation	92
10	Schlussfolgerungen/Empfehlungen	93
11	Ausblick	95
	Literaturverzeichnis	97
	Projektabschluss	101
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	105

Zusammenfassung

Im Untertagebau ermöglicht die Verwendung von Fasern im Spritzbeton eine Beschleunigung des Bauvorganges und damit eine Kostenreduktion. Seit längerem finden Stahlfasern zu diesem Zweck Verwendung, entsprechend sind Prüfverfahren und Beurteilungsmethoden auf diese Faserart ausgelegt. Seit einigen Jahren werden auch Kunststofffasern angeboten und finden zunehmend Verbreitung.

Die vorliegenden Untersuchungen beschränken sich auf die makro-synthetischen Fasern, die auch statische Funktionen übernehmen können. Micro-pp-Fasern, die u. a. zur Reduktion oder Vermeidung von Betonabplatzungen eingesetzt werden, sind nicht Gegenstand dieses Projektes.

Für den Nachweis und die Dokumentation der Dauerhaftigkeit von Spritzbetonanwendungen mit makro-synthetischen Kunststofffasern sind keine Prüf- und Nachweisverfahren bekannt. Basierend auf den Anwendungen von Stahlfaserspritzbeton sind Prüfungen zur Bestimmung des statischen und mechanischen Kurzzeitverhaltens normiert.

Ausgehend von Untersuchungen zum Applikationsverhalten von makrosynthetischen Kunststofffasern werden Prüfmethode zur Prüfung und Beurteilung von mechanischer und chemischer Beständigkeit von Spritzbeton mit Kunststofffasern entwickelt und beurteilt. Diese Prüfmethode stehen in Relation zu den Eigenschaften die Kunststoff auszeichnen.

Zur Beurteilung des Spritzverhaltens und der Faserorientierung wurden Applikationsversuche auf künstlichen Felsplatten durchgeführt. Mit den künstlichen Felsplatten wurden reproduzierbare Untergrundbedingungen, die der Applikation auf dem unregelmässigen Felsuntergrund entsprechen, geschaffen, um so unterschiedliche Kunststofffaserapplikationen und eine Referenzapplikation mit Stahlfasern vergleichen zu können.

Die niedrigere Dichte der Kunststofffasern im Vergleich zu den anderen Komponenten des Spritzbetons kann allenfalls die Flugeigenschaften der Fasern bei der Applikation und damit die Orientierung im Spritzbeton beeinflussen.

An Bohrkernen aus den Platten wurde die Faserorientierung mittels Röntgenverfahren in unmittelbarer Nähe zum Untergrund und in der Spritzbetonmasse untersucht. Erwartungsgemäss lässt sich eine Orientierung senkrecht zur Spritzrichtung feststellen, die in der Regel auch gewünscht ist. Prinzipiell sind bei der Anwendung von makro-synthetischen Kunststofffasern keine anderen Aspekte als bei Stahlfasern zu berücksichtigen. Optimale Spritzrandbedingungen wirken sich primär auf den (Faser-) Rückprall und damit auf das Arbeitsvermögen des Spritzbetons aus.

Die Prüfung der statischen Kurzzeitfestigkeit (Energieabsorptionsvermögen) zeigt, dass mit geeigneter Dosierung der Kunststofffasern das angestrebte Arbeitsvermögen erreicht werden kann.

Die Dauerhaftigkeit von Kunststofffaser-Spritzbeton wurden an gebrochenen Prüfkörpern bezüglich chemischer Einwirkungen und Lasteinwirkungen untersucht. Nur an gebrochenen (angerissenen) Prüfkörpern ist die Faser den Umgebungsbedingungen ausgesetzt bzw. kann Lasten aufnehmen und kann so geprüft werden. Beim nichtgebrochenen Prüfkörper ist nur der Beton den äusseren Einwirkungen ausgesetzt.

Zur Beurteilung der chemischen Beständigkeit der Faserarmierung wurden die Prüfkörper im Freien einer natürlichen Bewitterung, einer Sulfatbeanspruchung, einer Säurebeanspruchung und einer Tausalzbeanspruchung ausgesetzt. Nach einem Jahr wurde die Resttragfähigkeit der Prüfkörper beurteilt. Die Expositionen beeinflussen das

Tragverhalten von Kunststofffaserspritzbeton nicht unmittelbar. Teilweise wurden Schädigungen der Betonmatrix festgestellt.

Die statischen Dauerlasteigenschaften wurden in Kriechversuchen an Biegeprismen und Biegeplatten untersucht.

Die Biegeprismen wurden vorbelastet und anschliessend mit 90% der residuellen Last beansprucht. Bei den Biegeplatten erwies sich eine Belastung von 50% der residuellen Last als angemessen für die Beurteilung. Die unterschiedlichen Belastungsniveaus begründen sich aus den unterschiedlichen statischen Tragsystemen.

Die Kriechversuche zeigen signifikante Unterschiede bei den verschiedenen untersuchten Fasern, die aus den statischen Kurzzeitbelastungsprüfungen nicht erkennbar sind. Es wird empfohlen, die im Rahmen des Projektes entwickelten und erprobten Prüfungen zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit im Rahmen von Eignungsprüfungen anzuwenden. Entsprechende Hinweise sollten in den Nationalen Elementen zu den Normen für Polymerfasern (SN EN 14'889-2 „Fasern für Beton – eil 2 Polymerfasern“ eingearbeitet werden.

Im Brandfall werden die Kunststofffasern durch die Temperatureinwirkung zersetzt. Das Ausmass der Zersetzung ist von der Einwirktiefe des Brandes in die Betonstruktur abhängig. Die durch die Zersetzung der Kunststofffasern freigesetzten Schadgase betragen bei konservativer Betrachtung maximal 2% der Schadgase, die durch den Initialbrand, der zur Zersetzung der Kunststofffasern führt, freigesetzt werden. Die Zusammensetzung allfälliger Schadgase aus den Kunststofffasern ist weniger kritisch als Brandgase aus dem Initialbrand, die sich aus Verbrennungsprodukten von unterschiedlichsten Materialien zusammensetzen. Im Brandfall sind Kunststofffasern bezüglich Brandgasemissionen als unkritisch zu beurteilen.

Die Dauerhaftigkeitsprüfungen sind in jedem Fall in Relation zu den jeweiligen Anwendungsrandbedingungen wie Rissweiten und Exposition zu bewerten.

Bei der Beurteilung von Resultaten aus Spritzbetonproben ist mit Quervergleichen sicherzustellen, dass die Resultate aus den Spritzkisten repräsentativ sind. Zur Übertragbarkeit der Untersuchungsergebnisse auf Spritzvorgänge mit hohen Leistungen oder Applikationen über Kopf finden sich in der Literatur keine Hinweise.

Summary

In underground mining, the use of fibres in shotcrete makes it possible to speed up the building process and therefore reduce costs. Fibre concretes have been used for this purpose for quite some time, and the testing procedures and assessment methods have been aligned with this type of fibre accordingly. In more recent years, plastic fibres have also been made available and are becoming increasingly popular.

Existing studies are limited to macro-synthetic fibres, which can also take on static functions. This project does not involve microfibres (made from polypropylene, for example), which are used for various functions, including to prevent concrete spalling in the event of a fire.

The tests for determining the short-term static and mechanical behaviour are standardised based on steel-fibre shotcrete applications. There are no known testing or verification procedures at present for proving or documenting the durability of shotcrete applications with macro-synthetic plastic fibres.

Based on studies on the application behaviour of macro-synthetic plastic fibres, tests for assessing the mechanical and chemical resistance of shotcrete with plastic fibres have been developed and evaluated within the context of the existing studies. These testing methods are related to the properties which characterise the plastics in use.

Application tests were carried out on slabs of artificial rock to assess the injection behaviour in terms of the recoil and the fibre orientation. With the slabs of artificial rock, it was possible to create reproducible substrate conditions which correspond to the irregular bedrock. Various plastic fibre applications and a reference application were compared with steel fibres.

The studies showed that the aspects which need to be considered when using macro-synthetic fibres are no different to those considered for steel fibres. When the injection conditions are ideal, these primarily have an impact on the (fibre) recoil and therefore on the working capacity of the fibre concrete. As plastic fibres have a lower density than the other components in shotcrete, this may have an effect on the flight characteristics of the fibres during application and therefore on their orientation in the shotcrete. The fibre orientation was examined by x-raying cores from injected slabs, both in direct proximity of the substrate and in the shotcrete mixture. As expected, we were able to determine that the orientation was vertical to the direction of injection; this is generally the preferred outcome.

The test for the short-term static strength (energy absorption capacity) shows that it is possible to achieve the ideal working capacity with an appropriate dose of plastic fibres.

The durability of plastic-fibre shotcrete against chemical effects and continuous loads was examined on broken (ripped) test specimens, as this is the only way to expose the fibres to the ambient conditions and residual loads. If the test specimens are not broken, then only the concrete is exposed to external influences and it is not possible to test the fibre behaviour.

To assess the chemical resistance of the fibre reinforcement, the test specimens were exposed to natural weathering, sulphate, acid and de-icing salt outdoors. After a year, the residual load capacity of the test specimens was tested. For all of the plastic fibres examined, there was no indication of any chemical damage to the fibres. Partly the damage of the concrete was detected.

The creep tests show significant differences in the various fibres examined, which were not detectable in the short-term static stress tests. The static continuous load characteristics were examined in creep tests on bending prisms and bending plates. The bending prisms were pre-stressed and then loaded with up to 90% of the residual load.

For the bending plates, a stress amounting to 50% of the residual load proved to be adequate for the assessment. The different stress levels can be explained by the different static load-bearing systems.

Within the creep tests significant differences among the different fibers have been found, which are not obvious by the common short-term testing. It is recommended to use the developed tests to assess the long-term behavior in the scope of performance tests. Recommendations should be placed in the national documents for the Standards for polymer fibers (SN EN 14'889-2 "Fibers for concrete – Part 2 Polymer fibers).

The durability tests must always be evaluated in relation to the relevant application conditions such as crack widths and exposure.

In the event of a fire, the high temperatures cause the plastic fibres to disintegrate. The extent of the disintegration depends on how much of the concrete structure has been exposed to the fire. To give a conservative estimate, the harmful gases given off when the plastic fibres disintegrate amount to a maximum of 2% of the harmful gases given off by the initial fire alone. The composition of the harmful gases from the plastic fibres is less critical than a typical combustion gas mixture formed of the combustion products of a wide variety of materials. In case of a fire plastic fibers can be assessed as non-critical concerning fire gases.

When assessing test results of shotcrete samples it also has to be assured, the results of the shotcrete samples are representative for the shotcrete on side. There are no hints in the literature how to transfer test results to applications with high capacity or at the ceiling.

Résumé

En construction souterraine, l'utilisation de fibres dans le béton projeté permet d'accélérer la construction, ce qui entraîne une réduction des coûts. Des fibres d'acier sont utilisées depuis longtemps à cette fin et les méthodes d'essai et les procédés d'évaluation sont conçus en référence à ce type de fibres. Depuis quelques années, des fibres en matière de synthèse dont l'usage se répand de plus en plus ont également proposées.

Les présentes études se limitent aux fibres macro-synthétiques capables d'assumer également des fonctions statiques. Ce projet ne prend pas en considération les microfibrilles (en polypropylène p. ex.) utilisées entre autres pour réduire ou éviter les écaillages du béton en cas d'incendie.

Les essais d'analyse des comportements statique et mécanique de courte durée sont normalisés sur la base d'applications de béton projeté aux fibres d'acier. Aucune méthode d'essai et de justification n'est connue pour l'appréciation et la documentation de la durabilité des applications en béton projeté comportant des fibres macro-synthétiques.

Partant d'analyses de l'applicabilité des fibres macro-synthétiques, des tests permettant d'apprécier la résistance mécanique et chimique du béton projeté avec des fibres synthétiques ont été élaborés et évalués dans le cadre de cette étude. Ces méthodes d'essai sont corrélées avec les propriétés caractéristiques des matières synthétiques utilisées.

Pour apprécier le comportement à la projection en ce qui concerne le rebond et l'orientation des fibres, des essais applicatifs ont été réalisés sur des dalles rocheuses artificielles. Ces dalles rocheuses artificielles créent des conditions de support reproductibles correspondant à l'application sur un support rocheux irrégulier. Différentes applications de fibres synthétiques ont été comparées à une application référentielle avec fibres d'acier.

Les analyses ont montré qu'en cas d'utilisation de fibres macro-synthétiques, il n'y avait en principe aucun aspect autre que ceux des fibres métalliques à prendre en considération. Les contraintes marginales de projection optimales agissent en premier lieu sur le rebond (des fibres), par conséquent sur la capacité de travail du béton projeté. La densité plus faible des fibres synthétiques par comparaison aux autres composants du béton projeté peut à la rigueur influencer les propriétés de projection des fibres lors de l'application et par conséquent, leur orientation dans le béton projeté. L'orientation des fibres a été analysée par une méthode tomographique à rayon X sur des carottes provenant de plaques en béton projeté, prélevées d'une part à proximité immédiate du sol et d'autre part dans la masse de béton projeté. Comme il était attendu, une orientation verticale par rapport à la direction de la projection a pu être constatée, ce qui est généralement souhaité.

Le contrôle de la résistance statique à court terme (capacité d'absorption d'énergie) montre que la capacité de travail recherchée peut être obtenue avec un dosage approprié des fibres synthétiques.

La durabilité du béton projeté de fibres synthétiques a été analysée, en termes d'effets chimiques et d'impacts des sollicitations permanentes, sur des corps d'épreuve éclatés. Les fibres sont soumises aux conditions environnementales ou absorbent des contraintes résiduelles uniquement dans le cas de corps d'épreuve éclatés (fissurés). Si les corps d'épreuve ne sont pas éclatés, seul le béton est soumis aux impacts extérieurs, ce qui empêche l'étude du comportement des fibres.

Afin d'apprécier la résistance chimique du renforcement en fibres, les corps d'épreuve ont été exposés aux intempéries naturelles à l'air libre ainsi qu'aux effets du sulfate, des acides et des sels de déverglaçage. La résistance résiduelle des corps d'épreuve a été

évaluée après un an. Pour tous les types de fibres synthétiques analysés, aucune indication de dégradation chimique des fibres n'a été mise en évidence, contrairement aux fibres d'acier. Partiellement on pouvait constaté des dégradations de la matrice du béton.

Les essais de fluage montrent des différences significatives parmi les différentes fibres analysées qui ne sont pas détectables à partir d'essais de sollicitations statiques sur de courtes durées. Il est conseillé d'appliquer les méthodes d'analyses développées et éprouvées lors du projet afin de juger la durabilité en cadre d'essais d'aptitude. Les recommandations devraient être placées dans les documents nationaux pour les Standards pour fibres polymères (SN EN 14'889-2 fibres pour béton – part 2 fibres polymères).

Les essais de durabilité doivent, dans tous les cas, être évalués en corrélation avec les conditions marginales d'application, telles que les largeurs de fissures et l'exposition.

En cas d'incendie, les fibres synthétiques se décomposent sous l'effet de la température. L'ampleur de la décomposition dépend de la profondeur d'action du feu dans la structure en béton. Les gaz toxiques dégagés par la décomposition des fibres synthétiques représentent au maximum 2 % des gaz toxiques, en approche conservatrice, eux-mêmes dégagés par le feu initial qui entraîne la décomposition des fibres synthétiques. La composition des gaz toxiques formés par les fibres synthétiques est moins critique que celle du mélange de gaz d'incendie typique, composé des produits de combustion des matériaux les plus divers.

Lors du jugement des résultats d'échantillons de béton projeté des résultats représentatifs doivent être assurés. Concernant la transmissibilité des résultats d'analyses sur les processus de projeter à haute prestation ou applications à travers des indications ne peuvent pas être trouvées dans la littérature spécialisée.

1 Einleitung

Faserarmierungen als Alternative zu Netzarmerungen haben sich seit einigen Jahren im Bauwesen etabliert. Dies gilt sowohl für Anwendungen im Hochbau (z.B. Industrieböden), aber auch im Bereich der Spritzbetonanwendungen. Die Zugabe von Fasern in den Spritzbeton beschleunigt die Arbeitsabläufe und führt durch eine Beschleunigung des Bauvorgangs schlussendlich auch zu Kostenreduktionen.

Bisher wurden im Spritzbeton in der Regel Stahlfasern eingesetzt, applikationstechnisch sind aber auch Kunststofffasern interessant und finden zunehmend Verbreitung. In neuester Zeit sind dementsprechend auch vermehrt Kunststofffasern entwickelt worden, die statische Funktionen übernehmen können (Strux – Fa. Grace, Barchip – Fa. Elastoplastics, Concrix – Fa. BruggContec etc.). Diese haben in gewissen Ländern (z.B. Australien, Chile) und Marktsegmenten (z. B. Bergbau) die Stahlfasern bereits partiell ersetzt. Diese sogenannten makrosynthetischen Fasern mit Faserdurchmessern von ca. 0.5 bis 1.0 mm, bestehen meist aus Polypropylen (PP), Polyethylen (PE oder HDPE) oder einer Kombination daraus. Andere Fasermaterialien wie Polyvinylalkohol (PVA) werden hingegen aus preislichen Gründen für Anwendungen in Beton kaum eingesetzt (RF4000 – Fa. Kuraray etc.).

Zur Beurteilung von Faser(spritz-)beton wird heute ausschliesslich das statische und mechanische (Kurzzeit-)Verhalten (insbesondere auch das Nachbruchverhalten) überprüft und beurteilt [1,2,5,6].

Da im Unterschied zum reinen Spritzbeton (ohne Fasern) die Lasten, insbesondere im gerissenen Zustand, hauptsächlich von den Fasern übernommen werden, beeinflusst die Beständigkeit der Fasern das Langzeittragverhalten wesentlich. Unterschiedliche Fasermaterialien wirken sich unterschiedlich auf das Langzeitverhalten aus. So ist bei Stahl das Korrosionsrisiko bei der üblichen (preiswerteren) Verwendung von unveredelten Stählen wahrscheinlich und wurde deshalb ausgiebig untersucht [3,4,9,18].

Bei Kunststoff sind Kriechen unter Dauerlast, Versprödung oder Verseifung mögliche Risiken. Über das Langzeitverhalten von Kunststofffaserspritzbeton unter Dauerlast und in einer teilweise aggressiven Tunnelumgebung (Chloride, Sulfate etc.) ist erst wenig bekannt. Zur sicheren Verwendung dieses vielversprechenden Werkstoffs ist aber gerade die Kenntnis dessen Langzeitverhaltens unerlässlich und wird deshalb im Rahmen dieses Projekts untersucht.

Sowohl Korrosion als auch Kriechen werden in massiven Faserspritzbetonschalen vor allem dann (teilweise sogar ausschliesslich) kritische Ausmasse erreichen, wenn die Fasern offen vorliegen, also nicht mehr vom intakten umgebenden Faserspritzbeton mechanisch entlastet bzw. vor chemischem Angriff geschützt werden. Dies ist im teilweise gerissenen Zustand der Fall. Daher wird dieser Fall im vorgeschlagenen Projekt prioritär untersucht. Die Dauerhaftigkeit des die Fasern umhüllenden reinen Spritzbetons wird unter diesem Gesichtspunkt sekundär und kann (analog zum Verhalten von Ortsbeton und mit ähnlichen Methoden) untersucht werden. Diese Vorgehensweise deckt sich auch mit bestehenden Untersuchungsansätzen an Stahlfaserspritzbeton [3,4].

Es werden daher Langzeitversuche, teilweise in aggressiver Umgebung, unter Berücksichtigung möglicher Tunnelleinflüsse wie Sulfate, Chloride mit verschiedenen Kunststofffasertypen durchgeführt. Diese Versuche sollen mit handelsüblichen typischen makrosynthetischen Fasern erfolgen.

Neben der Art des Kunststofffasermaterials hängt bei beiden Einwirkungsarten (chemischer Angriff, Dauerlast) das Verhalten von Faserspritzbeton von seiner Struktur, seinem Gefüge und der Ausbildung des Faserskeletts (Faservolumen, Faserverteilung, Faser-Matrix Interface) ab. Beides wird massgeblich durch den Applikationsprozess beeinflusst. Bedingt durch die spezielle Applikationstechnik, bei welcher der Beton mit hoher Geschwindigkeit auf die Tunnelwand aufgetragen wird, ergibt sich generell ein

hoher Materialverlust von ca. 25 % (Rückprall), was sich auf das Gefüge auswirkt. Beim Faserbeton betrifft der Rückprall überproportional auch die relativ teure Komponente Fasern [5,11,12]. Einerseits verringert sich damit generell das zur Aufnahme von Lasten zur Verfügung stehende Faservolumen, andererseits ist eine gewisse Orientierung der Fasern entlang der Tunnelwand zu erwarten, was sich andererseits positiv auf das Tragverhalten auswirken dürfte. Zudem wird der Rückprallmechanismus der Fasern auch das Gefüge im Allgemeinen, insbesondere die Faser-Matrix Grenzfläche (Interface) beeinflussen. Mögliche Transportwege schädlicher Stoffe entlang der Fasern (Faser-Matrix-Interface) werden somit ebenfalls beeinflusst.

Aufgrund des zu erwartenden grossen Einflusses der Applikationstechnik und des Faserrückprallverhaltens auf das Langzeitverhalten und die Kunststofffaserbeständigkeit wird als wichtiger Teilaspekt auch das Faserrückprallverhalten und dessen Einfluss auf die Struktur des Faserspritzbetons untersucht. Es interessiert in diesem Zusammenhang insbesondere auch die Frage, ob sich das Langzeitverhalten neben der Faserauswahl auch durch entsprechende Applikations- oder Faserparameter steuern lässt. Insbesondere fehlen auch standardisierte Testmethoden und Empfehlungen zur Erfassung bzw. Verringerung des Faserrückpralls. Bezüglich des Faserrückpralls und der Faserorientierung im applizierten Spritzbeton werden infolge der unterschiedlichen Steifigkeiten zwischen Stahlfasern und Kunststofffasern signifikante Unterschiede erwartet. Bislang fehlen - nicht nur in der Schweiz - systematische, unabhängige Untersuchungen zur Ermittlung der Einflussfaktoren des Faserrückpralls und dessen Einfluss auf die Struktur des Faserspritzbetons und somit dessen Langzeitverhaltens.

Oft wird Faserspritzbeton nur zur temporären Absicherung verwendet, kann jedoch auch als mechanisch belastete sekundäre Dichtbarriere betrachtet oder dauerhaft als Hangsicherung eingesetzt werden, wo die Fragestellung betreffend des Verhaltens von Kunst-stofffaserbeton unter Dauerlast (Kriechen) und in korrosiver Umgebung, insbesondere im gerissenen Zustand, bedeutsam ist. Die (meist Industrie-) Forschung im Bereich Spritzbeton konzentriert sich zudem vielmehr auf Festigkeitsentwicklung und die Wirkung von Additiven im Zusammenspiel mit den verschiedenen Zementsorten als denn auf die zu erwartenden ökologischen Aspekte (z.B. CO₂-Ersparnis). Da zumeist die reinen Materialkosten neben den Kosten für Maschinen nicht direkt entscheidend sind, wird zudem das Sparpotenzial beim (Kunststoff-)Faserrückprall nicht ausreichend genutzt.

Kunststofffasern selbst sind im Gegensatz zu Beton und Stahllarmierungen brennbar. Im Brandfall werden Fasern, die hohen Temperaturen ausgesetzt sind, verbrennen resp. sich zersetzen (pyrolysieren) und die Brand- resp. Zersetzungsgase an die Tunnelatmosphäre abgeben. Im Sinne von Gefahrenpotentialabschätzungen werden die Schadgaskonzentrationen von verschiedenen Typen von Kunststofffasern und unterschiedlichen Lüftungsszenarien beurteilt und in Relation zu den jeweiligen Grenzwerten (MAK-Werte) gesetzt.

2 Zielsetzung

2.1 Generelle Zielsetzung

Hauptziele des Projektes sind laut Kreditbegehren und Forschungsauftrag das Langzeitverhalten makropolymerer Fasern einerseits unter Einwirkung aggressiver Medien und andererseits unter Dauerlast zu untersuchen. Als wichtiger und insbesondere das Dauerlastverhalten beeinflussender Aspekt wird, in diese Forschungen integriert, das Rückprallverhalten und das Faserrückprallverhalten während der Applikation untersucht.

Das Langzeitverhalten von Kunststofffaserspritzbeton und somit dessen Eignung zur dauerhaften Absicherung von Tunnelauskleidungen soll untersucht werden. Die Untersuchungen konzentrieren sich auf die Verwendung von Kunststofffasern, die immer grössere Verbreitung am Markt finden (Vorteile z. B: Korrosions- und Rückprallverhalten). Als Vergleichsreferenz zum bisherigen Stand der Technik werden zusätzlich einige Untersuchungen mit Stahlfaserspritzbeton durchgeführt.

Im Einzelnen verfolgt das vorgeschlagene Projekt das Ziel, Kenntnisse zu vertiefen und Prüfverfahren zu den beiden folgenden Themenkreisen vorzuschlagen:

1. Langzeitverhalten von Kunststofffaserspritzbeton unter andauernder Lasteinwirkung
2. Beständigkeit von Kunststofffasern im Spritzbeton in aggressiver Umgebung (Chloride, Bergwasser, tiefe Temperaturen) und deren mögliche Auswirkung auf das Tragverhalten

Bei beiden Einwirkungsarten (Dauerlast, aggressive Umgebung) hängt das Verhalten neben der Art des Kunststofffasermaterials von der Struktur des Kunststofffaserspritzbetons (Faservolumen, Faserorientierung, Faserverteilung, Faser-Matrix Interface) ab. Diese wird bei allen Faserspritzbetonen wesentlich durch das Rückprallverhalten der Fasern beim Applikationsprozess gesteuert. Die Rückpralleigenschaften von Kunststofffasern werden sich infolge niedrigerer Massen der Fasern aber deutlich von den bekannten Rückpralleigenschaften der Stahlfasern unterscheiden. Daraus ergibt sich das Unterziel:

- a) Kenntnis der Einflussparameter (Beton, Applikationsparameter, Kunststofffaserparameter) auf den Rückprall von Kunststofffasern und auf die damit verbundene Beeinflussung des Kunststofffaserskeletts und der Gefügestruktur des Spritzbetons.

Durch die Erarbeitung von Empfehlungen zur Verbesserung des Langzeitverhaltens und zur Verringerung des Rückpralls von Kunststofffasern wird ein Beitrag zu den folgenden übergeordneten Zielen angestrebt:

- a1) Rationellerer, nachhaltiger Untertagebau und Ressourcenschonung bei Neuerstellung oder Sanierung bestehender Tunnel
- a2) Verringerung der materialbedingten CO₂-Last von Spritzbetonsicherungen

Ergänzend zu den Festigkeitsprüfungen werden die Auswirkungen der Brand- resp. Zersetzungsgase der Kunststofffasern auf die Tunnelatmosphäre beurteilt. Dabei stehen gesundheitliche Gefährdungen der Personen im Tunnel im Vordergrund.

2.2 Detailziele

Die Themenbereiche Kunststoffaserrückprall, Dauertragverhalten und chemische Beständigkeit von Kunststofffaser-Spritzbeton beeinflussen sich teilweise gegenseitig und werden daher im Folgenden gemeinsam bzw. in logischer Abfolge betrachtet:

Untersuchung Faser-Rückprallverhalten

- Erfassung des Rückprallanteils der verschiedenen Bestandteile (Fasern, Grösstkorn) in Funktion des Kunststofffasertyps, der Spritzbetonzusammensetzung und der Applikationsparameter. Die unterschiedliche Beschaffenheit der Tunnelwand wird durch Verwendung von Kunststeinvorlagen (siehe Beilage) simuliert. Die Messmethoden werden unter Berücksichtigung der Messverfahren bei Stahlfasern und der Randbedingungen im Tunnelbau evaluiert.
- Untersuchung der Einflüsse auf die Verteilung von Kunststofffasern im Spritzbeton. Die Beurteilung der Verteilung erfolgt auf Basis von Fasern, die eine Referenzebene durchdringen. Die Verwendung von Tomographien zur räumlichen Beurteilung der Faserverteilung an jeweils identischen Positionen auf der Kunststeinplatte (siehe Beilage) ist vorgesehen.
- Mikroskopische Untersuchung des Faser-Matrix Interfaces.

Dauerlastverhalten von Kunststofffaserspritzbeton

Es werden Untersuchungen zum Dauertragverhalten an teilweise gerissenem (definiert vorgebrochenem) Kunststofffaserspritzbeton ausgeführt.

Im ersten Schritt werden Prüfanordnungen evaluiert, mit denen das Dauertragverhalten von Faserarmierungen geprüft werden kann. Etablierte und normierte Verfahren dienen heute allein zur Bestimmung der maximalen Bruchfestigkeit bzw. des Arbeitsvermögens bei maximaler Last und hohen Deformationen. Vielfach erfolgen jedoch in der Praxis Belastungen mit relativ kleinen Lasten und geringen Deformationen. Das Kriech- und Relaxationsverhalten des Faserspritzbetons wird untersucht.

Beständigkeit von Kunststofffasern in Faserspritzbeton

- Langzeitversuche an ungerissenen und an teilweise gerissenen (definiert vorgebrochenen) Faserspritzbetonen in verschiedenen aggressiven Umgebungen werden durchgeführt. Das residuelle Tragverhalten wird nach einer Beanspruchungsperiode ermittelt.
- Mikroskopische Untersuchung der Fasern im Faserspritzbeton nach deren chemischer Beanspruchung

Brandgasemissionen von Kunststofffasern

- Ermittlung der emittierten Brand- resp. Zersetzungsgase für verschiedene Kunststofffasern. Sofern möglich erfolgt dies auf theoretischer Basis gemäss den Angaben zur Zusammensetzung der Fasern. Sofern die verfügbaren Angaben nicht ausreichen, wird die Brandgaszusammensetzung in entsprechenden Normbrandprüfungen bestimmt.
- Bestimmung der Konzentration der Schadgase in der Tunnelatmosphäre in Abhängigkeit von unterschiedlichen Lüftungsszenarien, inkl. Berücksichtigung der Bauphase von Untertageanlagen.
- Bewertung der ermittelten Konzentrationen anhand von MAK-Werten.

3 Stand der Technik

3.1 Rückprall und Faserrückprall

3.1.1 Rezeptur

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf das im Tunnelbau für grosse Kubaturen hauptsächlich angewandte Spritzverfahren, das Nassspritzverfahren. Somit beschränken sich auch die Rezepturbetrachtungen auf dieses Verfahren.

Als wesentlicher Parameter für die Pump- und Verarbeitbarkeit gilt der Mehlkorngehalt (<0.125 mm) der Mischungen, der im Bereich von 450 bis 500 kg/m³ liegen sollte. Das Mehlkorn setzt sich aus Bindemittel, allfälligen Zusatzstoffen und der Mehlkornfraktion aus den Zuschlagstoffen zusammen.

Die Zusammensetzung des Mehlkornanteils aus den verschiedenen Komponenten hängt wesentlich auch von den weiteren Anforderungen an den Spritzbeton zusammen, wie Frühfestigkeit, Festigkeit und Dauerhaftigkeitseigenschaften.

Als wesentlicher Parameter zur Steuerung der Dauerhaftigkeitseigenschaften des Spritzbetons gilt der w/z-Wert (Wasser-Zement-Wert) bzw. w/b-Wert (Wasser-Bindemittel-Wert). Folgende Orientierungswerte werden angegeben:

- w/z-Wert von ca. 0.55 für Beton mit geringen Anforderungen
- w/z-Wert von ca. 0.50 für Beton mit mittleren Anforderungen
- w/z-Wert von < 0.46 für Beton mit hohen Anforderungen

Mit sinkendem w/z-Wert geht in der Regel eine Steigerung der Festigkeit und damit einer Erhöhung der Sprödigkeit des Spritzbetons einher. Für die Lastumlagerung auf die Fasern nach der Bildung der Initialrisse sind niedrige Festigkeitsniveaus von Vorteil.

Vor dem Hintergrund der Anforderungen, die der Spritzbeton bezüglich Verarbeitung, Festigkeitsverhalten und Dauerhaftigkeitseigenschaften aufweisen muss, wird die effektiv gewählte Rezeptur aus der Abwägung und Beurteilung der unterschiedlichen Anforderungen erarbeitet.

3.1.2 Luftmenge

Zur Beschleunigung des Spritzbetons an der Düse wird Druckluft mit einem Druck von ca. 6 bis 7 bar und einem Volumenstrom von 10-12 m³/h benötigt.

3.1.3 Fördermenge

Die Fördermengen der Spritzbetonpumpen können kontinuierlich variiert werden. Je nach verwendetem Pumpentyp können Fördermengen von bis 30 m³/h erreicht werden. Die effektiv applizierten Mengen hängen von den Untergrundverhältnissen, verfügbaren Flächen und Bewegungsgeschwindigkeiten der Applikationsgeräte ab.

3.1.4 Düsenabstand

Unter Düsenabstand wird der Abstand der Düsen Spitze, mit der der Spritzbeton appliziert wird, zum Untergrund auf den der Spritzbeton aufgetragen wird, verstanden.

Eine Düsenführung im Abstand von 1.5 m im rechten Winkel wird als optimal angesehen. In der Praxis kommt es jedoch immer wieder zu Abweichungen von dieser Vorgabe, da manuell gesteuerte Spritzarme bei einer unregelmässigen Oberflächengeometrie (z. B. gesprengter Fels) die Vorgaben praktisch nicht einhalten können. Der Düsenabstand zum Untergrund wird vergrössert und durch höheren Drucklufteinsatz kompensiert.

3.2 Faserorientierung

Bedingt durch die spezielle Applikationstechnik, bei welcher der Beton mit hoher Geschwindigkeit auf die Tunnelwand aufgetragen wird und die verschiedene geometrische Ausgestaltung von Fasern resp. Zuschlag, ist neben dem Materialverlust (Rückprall) auch die Frage nach der Orientierung der Fasern interessant. Da im Unterschied zum reinen Spritzbeton (ohne Fasern) die Lasten, insbesondere im gerissenen Zustand, hauptsächlich von den Fasern übernommen werden, wirkt sich die Faserorientierung auch auf die mechanischen Eigenschaften insbesondere das Nachbruchverhalten und die Absorption von Bruchenergie aus. Ist die Faserorientierung nicht uniform, d.h. sind die Fasern relativ zur Tunnelwand in einer gewissen Richtung bevorzugt orientiert, können damit auch die mechanischen Eigenschaften des Spritzbetons richtungsorientiert sein. Infolge des Applikationsverfahrens ist eine bevorzugte Orientierung der Fasern entlang der Applikationsfläche (Tunnelwand) zu erwarten. Je nach Belastung kann sich eine Faserorientierung unterschiedlich auf das Tragverhalten auswirken.

Eine allfällige bevorzugte Orientierung des Faserskeletts führt auch zu einer Orientierung des Faser-Matrix Interfaces, welches sich entlang der Fasern ausbildet. Da Fasergrenzflächen als mögliche Transportwege für schädliche Stoffe dienen können, kann dies somit die Beständigkeit des Faserspritzbetons beeinflussen.

Wie schon betreffend des Faserrückpralls werden auch bezüglich der Faserorientierung im applizierten Spritzbeton infolge der unterschiedlichen Steifigkeiten zwischen Stahlfasern und Kunststofffasern signifikante Unterschiede erwartet. Die Stahlfasern dürften sich wegen ihres grösseren E-Moduls beim Aufprall eher steifer verhalten und sich weniger vom nachkommenden Spritzbeton entlang zur Felswand drücken lassen.

Zur Erfassung der Faserorientierung gibt es keine standardisierten Testmethoden bzw. Empfehlungen. Insbesondere fehlen bislang generell - nicht nur in der Schweiz - systematische, unabhängige Untersuchungen zur Ermittlung der Einflussfaktoren auf die Faserorientierung und deren Einfluss auf die Struktur des Faserspritzbetons und dessen Langzeitverhalten.

Die Orientierung von Fasern in einem zementgebundenen Baustoff kann mittels Röntgendurchstrahlung erhoben werden. Mit dieser Technik wurden vor allem Ortsbetone, zumeist selbstverdichtende Betone, in neuester Zeit auch ultrahochfeste Betone, untersucht. Erfolgreich angewendet wurde diese Technik fast ausschliesslich bei Stahlfasern, da der Dichtekontrast zwischen Fasermaterial und Beton in diesem Fall besonders gross ist. Im Falle von Kunststofffasern sind die Dichtekontraste jedoch deutlich reduziert, so dass Analysen der Faserorientierung erschwert werden [35]. Diese Technik hat aber den Nachteil, dass infolge der vollständigen Durchstrahlung die Erfassung der dreidimensionalen Orientierung von Einzelfasern nicht möglich ist.

Prinzipiell könnten sich auch mikroskopische Methoden zur Analyse der räumlichen Verteilung von Fasern eignen [16,19]. Eine exakte Analyse würde aber genau definierte Fasergeometrien voraussetzen, was in der Praxis nicht gegeben ist. Selbst kleinste Abweichungen von nominellen Querschnitten führen im Schliffbild zur Falschbeurteilung der Lage einer Faser. Weitere zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden wie Ultraschallmikroskopie, Neutronenstreuung, NMR etc. sind apparativ sehr aufwändig und erfassen meist nur geringe Volumen. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurde die Erfassung der Faserorientierung mittels der auf Röntgendurchstrahlung basierenden Röntgencomputertomographie ermöglicht.

3.3 Dauerlastverhalten

Bisher liegen nur vereinzelte Untersuchungen zum Dauerlasttragverhalten von faserverarmten Spritzbetonen vor.

Das Tragverhalten von faserverarmtem Spritzbeton wird an plattenförmigen Prüfkörpern oder an Biegebalken bestimmt. Während die Prüfung an den allseitig gelagerten plattenförmigen Prüfkörpern ein statisches unbestimmtes System darstellt, erfolgen die Biegebalkenprüfungen am statisch bestimmten System. Als Modifikation werden Prüfungen an gekerbten plattenförmigen Prüfkörpern durchgeführt. Bezüglich des Lastfalls entspricht dies dem Biegebalken und wird im Folgenden nicht näher betrachtet.

3.3.1 Platten

Die Prüfung des Tragverhaltens an plattenförmigen Prüfkörpern wurde für Stahlfasern entwickelt und dient der Bestimmung des Last-Verformungsverhaltens und ist in SN EN 14488-5 beschrieben. Die Bestimmung dient als Grundlage für die Berechnung des Energieabsorptionsvermögens bis zu einer vorgegebenen Durchbiegung. Üblicherweise erfolgt die Beurteilung bis zu einer Durchbiegung von 25 mm. Projektspezifisch werden zu erreichende Energieabsorptionswerte definiert.

In der Literatur finden sich praktische keine Ausführungen zum Thema Dauerlastversuche an Platten. Analog zu den Balkenversuchen wurden im Rahmen der Untersuchungen Platten mit und ohne Kerbung vorgebrochen und das Verhalten bei unterschiedlichen Lastenniveaus beurteilt.

3.3.2 Balken

Bisher wurde die Verwendung von Kunststofffasern im Untertagebau v.a. auch hinsichtlich des Langzeitverhaltens im gerissenen Zustand (und nur in diesem) als problematisch angesehen [20,43]. Im Gegensatz zu Stahl können auf Polyolefinen basierte Fasern unter dauernd wirkender Spannung zu einer zeitabhängigen Verformung („Kriechen“) neigen. Durch entsprechende Additive, Erhöhung des Kristallinitätsgrades bzw. des E-Moduls, kann das Kriechen stark vermindert werden [43]. Insbesondere bei neuesten Fasergenerationen werden deutlich höhere Kristallinitätsgrade durch grössere Reckgrade (stärkere Verstreckung bei der Herstellung) mit deutlich verbesserten Elastizitätsmodulen erreicht.

Dieses Wissen ist aber wesentlich bei der Diskussion der Gebrauchstauglichkeit von Kunststofffaserspritzbeton, sofern nicht nur eine kurzfristige Felssicherung angestrebt wird. Ziel ist es, das Dauerlastverhalten eines Kunststofffaserspritzbetons derart zu kontrollieren, dass unter Einbezug der üblichen Vorhaltemasse ein Kriechversagen im gerissenen Zustand ausgeschlossen werden kann.

Nur wenige Dauerlastversuche von Kunststofffaserbeton an Biegebalken sind dokumentiert [43]. In Balkenversuchen sind aufgrund der Versuchsgeometrie die Lasteinwirkung und die Spannungsverhältnisse im Rissbereich besser definiert als bei Platten, da die Lasteinwirkung eindimensional erfolgt. Sie können daher mathematisch einfacher beschrieben werden. Dies gilt insbesondere bei Verwendung von Einkerbungen, welche die Risszone einschränken. Es stellt sich dabei aber die prinzipielle Frage nach dem Praxisbezug von Biegebalkenversuchen. In der Praxis werden sich die Risse bei der schwächsten Stelle ausbilden und kaum vorgegebenen Pfaden folgen. Zudem ist in der Praxis mit mindestens zweidimensionalen Belastungen von Applikationsflächen zu rechnen. Eine eindimensionale Belastung wie im Biegebalkenversuch tritt bei den meist flächigen Spritzbetonanwendungen im Gegensatz zum Hochbau nie auf.

Biegebalkenversuche spielen auch bei der Bemessung von Faserbeton (allerdings zumeist nur im Ortsbetonbereich, ZB DAfStb-Richtlinie 2010) eine zunehmende Rolle. Daher wurde das Kriechverhalten ausgewählter Fasertypen in der vorliegenden Arbeit auch anhand von Biegebalkenversuchen untersucht. Es wurde dabei ein Versuchsaufbau analog zu jenem von Gossila [8] gewählt. Zur Erzeugung klar definierter Risspositionen und -breiten wurden die Versuchsbalken mit einer Kerbe versehen. Bei der Anordnung der Lasteinleitung und den Prüfkörperdimensionen folgte man einschlägigen EN-Normen im Bereich „Biegezugfestigkeit von Faserbeton“.

Die Beurteilung des Dauerlastverhaltens von Faserbeton erfolgt in Balkenversuchen im gerissenen Zustand, da sich ohne Riss einzig das Zugkriechen des Kompositmaterials bemerkbar machen würde. Die eingebetteten Fasern beeinflussen das Kriechverhalten von ungerissenem Beton aufgrund ihres geringen Anteils (ca. 0.5 Volumen%) nicht wesentlich.

3.4 Beständigkeit

Zur chemischen Beständigkeit (Frost-Tausalz, Sulfatangriff etc.) von reinem Spritzbeton (ohne Fasern) liegen verschiedene Untersuchungen und Langzeitbeobachtungen vor [9,10,11]. Die Untersuchungen am Feststoff erfolgen mit analogen Methoden, welche für die Untersuchung von Mörtel oder Ortsbeton entwickelt wurden. Es ergeben sich betreffend der Dauerhaftigkeit meist analoge Schlussfolgerungen wie beim Ortsbeton, wo die Porosität resp. die Permeabilität des Gefüges als wesentliche Einflussfaktor gelten.

Durch den Verlust des Grösstkornanteils entsteht im Wesentlichen ein feinkörnigeres Material [12,13], dessen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit analog dem Einfluss des Grösstkorns im Ortsbeton oder Mörtel ist.

Hinsichtlich Phasenzusammensetzung und angesichts der teilweise hohen Zusatzmitteldosierungen und der speziellen Applikationstechnik sind jedoch im Vergleich zu Ortsbeton durchaus auch unterschiedliche Schadensmechanismen zu erwarten. Diese sind aber nicht Thema der vorliegenden Untersuchungen.

Da im Unterschied zum reinen Spritzbeton (ohne Fasern) die mechanischen Lasten, insbesondere im gerissenen Zustand, hauptsächlich von den Fasern übernommen werden, beeinflusst die Beständigkeit der Fasern das Langzeittragverhalten wesentlich.

Im Tunnelbereich können unterschiedliche chemische Belastungen auf den Spritzbeton einwirken [50,51]. Einerseits werden Tausalze oft bis weit vom Portalbereich entfernt durch Spritzwasser verfrachtet. Andererseits sind aggressive Bergwässer vorhanden, dies meist in Form von sulfathaltigen Lösungen. Insbesondere sind auch Einflüsse der hohen Zusatzmittelkonzentrationen des Spritzbetons (Beschleuniger) denkbar. Oft werden sulfat- oder alkalibasierte Zusatzmittel eingesetzt. Selbst mit tiefen pH-Werten (Säureangriff), manchmal als Folge von Mikroorganismen, ist zu rechnen.

Unterschiedliche Fasermaterialien sind unterschiedlichen Risiken ausgesetzt und wirken sich entsprechend auf das Langzeitverhalten aus. So dominiert bei den üblicherweise verwendeten unveredelten (preiswerteren) Stahlqualitäten das Korrosionsrisiko. Bei Kunststoff sind Versprödung oder (selten) Verseifung mögliche Risiken. Die Korrosion von Stahlfaserbeton (Ortsbeton) wurde ausgiebig untersucht [52,53], ohne die explizite Berücksichtigung der Besonderheiten von Spritzbeton inklusive einem Einfluss der Struktur des Faserskeletts zu berücksichtigen.

Dabei kann Korrosion oder chemische Beanspruchung in massiven Faserspritzbetonschalen vor allem dann (teilweise sogar ausschliesslich) kritische Ausmasse erreichen, wenn die Fasern offen vorliegen, also nicht mehr vom intakten Faserspritzbeton vor chemischem Angriff geschützt werden [54]. Die Dauerhaftigkeit des die Fasern umhüllenden reinen Spritzbetons wird unter diesem Gesichtspunkt sekundär.

Über das Langzeitverhalten von Kunststofffaserspritzbeton in einer teilweise aggressiven Tunnelumgebung (Chloride, Sulphate etc.) ist erst wenig bekannt. Von den Faserherstellern wird meist auf das Verhalten der für die Faserherstellung verwendeten Kunststoffe verwiesen. Betreffend Polymerfasern gibt es dazu einzelne Untersuchungen mit Feinstfasern [19], welche aber weniger zur mechanischen Verstärkung, sondern aus anderen Überlegungen (Brandschutz, Schwindrissverminderung) eingesetzt werden. Aus Kostengründen werden makrosynthetische Kunststofffasern meist aus Polyolefinen (Polypropylen, Polyethylen, HDPE etc.) hergestellt. Dabei gelten diese bei der Herstellung von Kunststofffasern verwendeten Polymere allgemein als chemisch beständig.

Ausser der Zusammensetzung des Fasermaterials hängt das Verhalten von Faserspritzbeton gegenüber chemischer Einwirkung von seiner Struktur, seinem Gefüge und der Ausbildung des Faserskeletts (Faserverteilung, Faser-Matrix Interface) ab. Insbesondere dem Faser-Matrix Interface kann beim Stofftransport eine wichtige Rolle zukommen. Auch das Faser-Beton Interface kann chemisch beansprucht werden und damit die Verbundfestigkeit zwischen Faser und Spritzbeton beeinflussen. Durch die fortschreitende Hydratation des Zements verändert sich dieses Interface ebenfalls, führt dann aber meist eher zu einer Verdichtung und damit zu einer Verbesserung des Faser-Spritzbetonverbundes. Wird der Faserverbund dabei aber zu stark, so wird eine rissüberbrückende Faser bei Zugbelastung reissen und nicht kontinuierlich ausgezogen. Der Verbundwerkstoff Faserspritzbeton kann dadurch verspröden (embrittlement) [56], das heisst, das erwünschte duktile Nachbruchverhalten des Faserspritzbetons entfällt.

Zur sicheren Verwendung dieses vielversprechenden Werkstoffs Kunststofffaserspritzbeton ist daher gerade die Kenntnis dessen Langzeitverhaltens unerlässlich und wird deshalb im Rahmen dieses Projekts untersucht.

4 Untersuchungsprogramm und -methode

4.1 Untersuchte Fasern

Die Untersuchungen werden an verschiedenen Fasertypen unterschiedlicher Faserproduzenten durchgeführt. Das aktuelle Forschungsprojekt zielt ausdrücklich nicht auf die Entwicklung neuer Fasern ab. Die unterschiedlichen am Markt erhältlichen Fasern haben unterschiedliche stoffliche und geometrische Eigenschaften, deren Einfluss auf die Dauerhaftigkeit im Forschungsprojekt untersucht wird. Die eingesetzten 5 Fasern (4 makropolymeren Fasertypen und eine Stahlfaser (Referenz)) wurden so ausgewählt, dass sie durch die relevante Applikationsform – Spritzen – verarbeitet werden können und die typischen, heute am Markt verfügbaren Fasermaterialien abdecken. Dies schränkt den Parameter Faserlänge auf einen Bereich bis maximal etwa 55 mm ein.

Die für die Durchführung der ersten Messreihe ausgewählten Fasern unterscheiden sich in folgenden Fasereigenschaften (Einflussfaktoren):

- Längen-Querschnitts-Verhältnis
- Querschnittsgeometrie
- Oberflächenstruktur
- Endverankerung
- Elastizitätsmodul
- Zugfestigkeit
- Zeit-Dehnungsverhalten (Kriechen)

Tab. 1 Eigenschaften der in den Experimenten verwendeten Fasern nach Herstellerangaben

Material	Form	Oberfläche	Verankerung	Länge	Durchmesser	E-Modul	Zugfestigkeit
[-]	[-]	[-]	[-]	[mm]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
Stahl	gekröpft	glatt	Endhaken	35	0.55	210000	1345
orientiertes Polyester	flach, geprägt	strukturiert	Endhaken	40	0.88	11300	400-800
Polyolfine	gerade	rau	keine Endhaken	50	0.50	>10000	>600
modified Olefin	gerade	strukturiert	keine Endhaken	54	0.56	7100-10000	550-640
PP/PE	flach, gerade	glatt	keine Endhaken	50	0.59	9500	620

4.2 Spritzbetonrezeptur

Die Betonzusammensetzung ist für die Eigenschaften des Verbundwerkstoffes Faserspritzbeton sowohl während der Verarbeitung als auch im Langzeitverhalten von entscheidender Bedeutung.

Einerseits beeinflusst die Mischungszusammensetzung die rheologischen Eigenschaften des Frischbetons und damit die Pumpfähigkeit, eventuell auftretende Pulsation, die wiederum zeitlich schwankende Beschleunigerdosierung bewirken kann. Gleichermassen wird aber auch der Mischungsprozess von Druckluft, Beton und Beschleuniger in Mischkammer, Spritzdüse und auf dem Weg bis zur Spritzbetonoberfläche beeinträchtigt und somit die Eigenschaften der auf der Felsoberfläche oder in einer Spritzkiste aufgebauten Spritzbetonschicht. Die Frischbetoneigenschaften des auf die Oberfläche auftreffenden Spritzbetons beeinträchtigen das Rückprall- und Faserrückprallverhalten massgebend sowie die Ausrichtung der Fasern in der Spritzbetonschicht.

Für die Beschreibung des Langzeitverhaltens von Faserspritzbeton spielt der Verbund von Fasern und Beton eine entscheidende Rolle. Sie beeinträchtigt sowohl die Migrationsfähigkeit von Gasen, Wasser und Ionen entlang der Fasern als auch die Interface-Eigenschaften zwischen beiden Materialien. Besonders bei langanhaltender mechanischer Belastung kommt es im Interface-Bereich neben Faser- und Betonkriechen auch zum Verbundkriechen, welches damit abhängig von der verwendeten Betonrezeptur ist.

Um bestmögliches Verbundverhalten zwischen Faser und Beton zu erzielen, wäre die optimale Anpassung der Betonrezeptur an den Fasertyp erforderlich. Von den Herstellern der im Forschungsprojekt betrachteten Fasern konnten keine auf den jeweiligen Fasertyp optimierten Nassspritzbeton-Rezepturen angeboten werden. Aus diesem Grund und um beste Vergleichbarkeit der Untersuchungsergebnisse zu erhalten wurden alle Experimente mit ein und derselben Standard-Faserspritzbeton-Rezeptur hergestellt. Tabelle 2 zeigt die Zusammensetzung der verwendeten Versuchsspritzbetongrundmischung.

Tab. 2 Mischungszusammensetzung der Spritzbeton-Grundmischung für 1 m³ verdichteten Frischbeton

Zement	CEM I 42.5 N	400 kg
Steinkohlenflugasche	Hydrolent	50 kg
Wasser	Leitungswasser	192 kg
Gesteinskörnung	Sand 0/1, Tardis	7 %
	Sand 0/4, Tardis	57 %
	Kies 4/8, Tardis	36 %
Fliessmittel	Sika SC 303	1.2 M.-% (vom CEM)
Fasern		nach Herstellerangaben
w/z (Sollwert)		0.48
Konsistenz- (Sollwert)	Ausbreitmass	500 mm

4.3 Herstellung von Quadratplatten

Der Spritzbeton wurde mit einer Spritzbetonpumpe Typ Suprema über 30 m Schlauchleitung mit D= 65 mm im Dichtstrom zur Düse gepumpt. Die Düsenführung erfolgte mit einem ferngesteuerten Spritzarm Typ Aliva. Unmittelbar an der Düse wurde der Betonstrom aufgerissen und der Beschleuniger dosiert.



Abb.1 Spritzbetonapplikation und -prüfung



Abb.2 Spritzdüse mit Aufreisser

Folgende Parameter im Spritzprozess wurden konstant belassen, sofern für Einzelprüfungen nichts Gegenteiliges beschrieben ist:

- Förderleistung: 6 m³/h
- Düsendurchmesser 45 mm
- Beschleuniger: 6 % eines alkalifreien Beschleunigers

4.4 Felsimitation

Im Rahmen von Spritzversuchen an künstlichen Gesteinsstrukturen (Abb.3) sollen – unter reproduzierbaren, realitätsnahen Randbedingungen - die Parameter ermittelt werden, die den Faserrückprall und die Faserorientierung wesentlich beeinflussen.

Mit den künstlichen Gesteinsstrukturen lassen sich im Vergleich zu ebenen Platten realistische Spritzbedingungen reproduzierbar herstellen. Flächen bzw. Schablonen zur Herstellung von Flächen mit definierten Strukturen wie sie in Abb. 3. beispielhaft dargestellt sind können bei spezialisierten Firmen bezogen werden.

Die ermittelten Einflussparameter werden sowohl im Hinblick auf den Faserrückprall als auch auf die Festigkeits- und Dauerhaftigkeitseigenschaften beurteilt. So wird eine gesamteinheitliche Beurteilung gewährleistet.

Die Produktion der künstlichen Felsplatten mit den Dimensionen L/B/H 3.50 m / 1.40 m / 0.10 m erfolgte mittels einer Matrice auf einem Schaltisch und ermöglichte damit, so viele Platten in gleicher Qualität zu produzieren wie erforderlich.

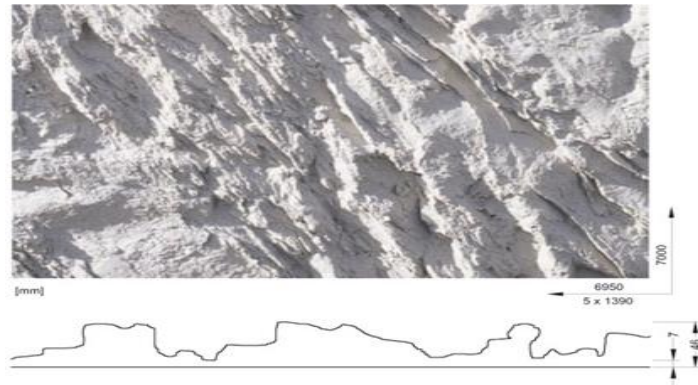


Abb. 3 Kunstfelsimitation (Cheyenne_2_121G, Reckli AG, Schweiz)



Abb.4 Kunstfelsimitation (Cheyenne_2_121G, Reckli AG, Schweiz) vor und nach der Spritzbetonapplikation (Wandgrösse 3.5 x 1.39 m).

4.5 Prüfmethode

4.5.1 Charakterisierung des Ausgangsbetons

Für die verschiedenen Versuche wurde angestrebt, möglichst gleiche Spritzbetone zu verwenden. Zur Charakterisierung der Betongemische wurden die folgenden Prüfungen angewendet:

- Frischbetonkontrolle gemäss SN EN 12350 (Rohdichtebestimmung (Teil 6), Bestimmung Luftporengehalt (Teil 7), Ausbreitmass (Teil 5) und Wassergehaltsbestimmung gemäss SIA 262/1 Anhang H). Es erfolgt eine Bestimmung pro Mischung.
- Würfeldruckfestigkeit am Ausgangsgemisch gemäss SN EN 12390-3 im Alter von 7, 28 und 90 Tagen an jeweils 2 Würfeln. Es wird der Mittelwert der Bestimmungen ausgewiesen.

- Bestimmung der Festbetonrohddichte. Diese erfolgt im Zusammenhang mit der Druckfestigkeitsbestimmung und wird analog ausgewiesen.

4.5.2 Charakterisierung des applizierten Spritzbetons

Zur Charakterisierung der applizierten Spritzbetone wurden die folgenden Prüfungen angewendet:

- Bohrkerndruckfestigkeit gemäss SN EN 12504-1 und SN EN 12390-3 im Alter von 28 Tagen an jeweils 5 Bohrkernen. Es wird der Mittelwert der Festigkeit ausgewiesen.
- Bestimmung der Rohddichte des applizierten Spritzbetons. Diese erfolgt im Zusammenhang mit der Druckfestigkeitsbestimmung und wird analog ausgewiesen.
- Bestimmung des Last-Verformungsverhaltens an plattenförmigen Prüfkörpern gemäss SN EN 14488-5 bzw. SIA 162/2 und die daraus abgeleitete Energieabsorption bei 25 mm Deformation. Die Prüfung erfolgt jeweils an drei Prüfkörpern. Der Spritzüberstand über der geforderten Plattendicke von 100 mm wird an der ausgehärteten Probe abgehobelt.

4.5.3 Rückprall, Faserrückprall, Fasergehalt

Zur Evaluation des Rückprall- und des Faserrückprallverhaltens sowie zur Herstellung der Probekörper zur Bestimmung der Faserorientierung wurden Betonplatten verwendet, deren Oberflächen als künstliche Felsoberfläche ausgebildet waren. Derartiges Vorgehen bot den Vorteil, dass der Faserspritzbeton auf eine unregelmässige „Felsoberfläche“ appliziert werden konnte, die den Bedingungen im Felsvortrieb ähnlicher ist als eine glatte Betonoberfläche oder der Boden einer Spritzkiste. Alle Versuchsbetone konnten somit auf exakt gleiche „Fels-„ Oberflächengeometrien appliziert werden.



Abb.5 Versuchsanordnung von drei künstlichen Felsplatten vor der Spritzbetonapplikation



Abb.6 Versuchsanordnung zur Bestimmung des Rückpralls und des Faserrückpralls sowie zur Produktion der Proben zur Bestimmung der Faserorientierung

Für die Versuche der ersten Versuchsserie wurden jeweils drei künstliche Felsplatten senkrecht nebeneinander aufgestellt. Mit den drei nebeneinanderstehenden Platten wurde eine homogene Spritzfläche erzeugt, die es ermöglichte, auf der mittleren Platte einen Prüfkörper ohne wesentliche Randeffekte zu erzeugen

Die Platten wurden vor und nach den Versuchen gewogen, so dass die insgesamt aufgetragene Faserspritzbetonmenge durch Differenzbildung ermittelt werden konnte.

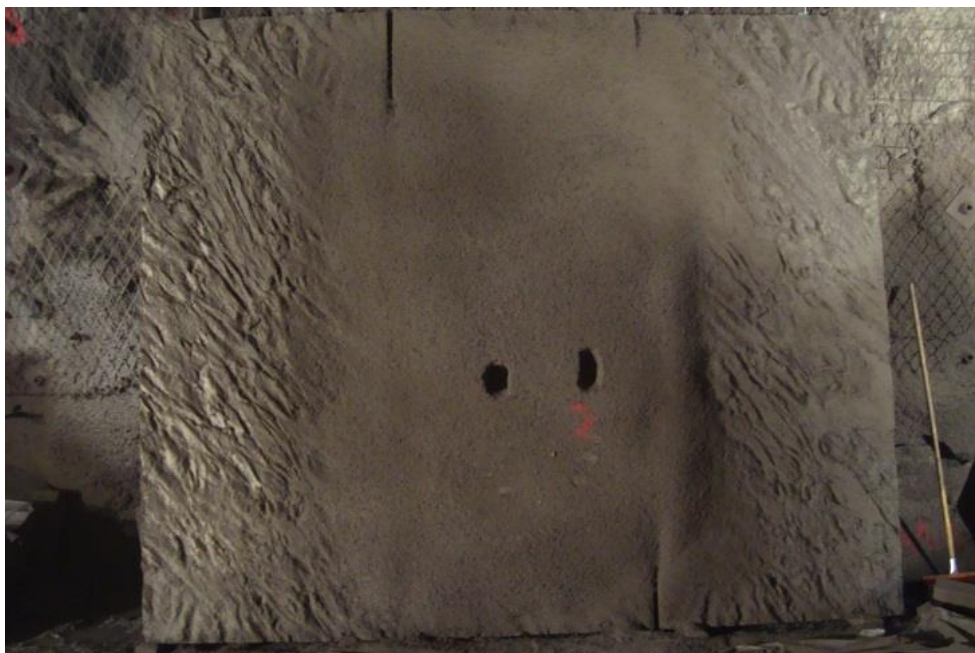


Abb.7 Anordnung der künstlichen Felsplatten nach der Spritzbetonapplikation, 2 Probenahmestellen zur Bestimmung des Fasergehaltes in der Spritzbetonschicht

Der Rückprall wurde auf dem ausgelegten Plastik aufgenommen.

Die Rückprallmessung erfolgte in zwei Schritten. Zunächst erfolgte der Auftrag einer Lage Spritzbeton von 3 cm Dicke auf die künstlichen Felsplatten mit anschliessendem Messablauf wie oben beschrieben. Anschliessend erfolgt das weitere Auftragen des Spritzbetons bis zu einer Dicke von 10 cm und wiederum ein Messablauf zur Bestimmung der Rückprallwerte.

Die Bestimmung des Fasergehaltes erfolgte an Proben aus dem frisch applizierten Spritzbeton durch Auswaschen und im zweiten Schritte an ausgewählten Bohrkernen aus den Probeplatten. Die Bestimmung an den Proben erfolgt gemäss SN EN 14'488-7 (Prüfung von Spritzbeton- Teil 7: Fasergehalt von faserverstärktem Beton).

4.5.4 Dauerlastprüfungen

Dauerlastprüfungen wurden an den beiden Prüfungen (Balken und Platten) durchgeführt, die üblicherweise auch zur Bestimmung und Beurteilung des Tragverhaltens von faserverstärktem Spritzbeton herangezogen werden.

Da für Dauerlastprüfung/Kriechversuche keine normierten Prüfvorgaben existieren, wurden die gewählten Prüfverfahren im Rahmen dieses Projektes entwickelt.

Kriechversuche an Platten

Das Dauerlastverhalten definiert vorbelasteter, gebrochener Faserspritzbetonprüfkörper wurde an quadratischen Platten mit den Abmessungen (L x B x H) 600 x 600 x 100 mm³ und an aus gespritzten Platten gesägten Prismen der Abmessungen 550 x 150 x 150 mm³ ermittelt. Zudem wurden für jeden im Versuchsprogramm berücksichtigten Fasertyp Referenzplatten aus dem Ausgangsbeton betoniert und teilweise im Plattenprüfverfahren untersucht.

Da für Dauerlastprüfungen bzw. Kriechversuche keine normierten Prüfvorgaben existieren wurden die gewählten Prüfverfahren im Rahmen dieses Projektes entwickelt.



Abb.8 Prüfstände zur Kriechprüfung an Balken in der Empa



Abb.9 Prüfstände zur Kriechprüfung an Quadratplatten im VersuchsStollen Hagerbach

Die Abbildungen 9 und 10 zeigen die zur Untersuchung des Langzeitverhaltens unter statischer Last eingesetzten Versuchseinrichtungen. Die in Abbildung 11 dargestellte Anordnung leitet die erforderliche Belastung über ein Hebelsystem zur Vervielfachung, der aus der Schwerkraft der aufgelegten Massestücke resultierenden Belastung, in die Prüfkörper ein. Beide Prüfanordnungen erzeugen die Belastung statisch durch die Gewichtskraft aufgelegter Massestücke.

Als Prüfkörper für die Dauerlastversuche an Spritzbetonplatten wurde der Faserspritzbeton während der ersten und zweiten Versuchskampagne in quadratische Spritzkisten eingebracht. Die dem Formboden zugewandte Seite der so hergestellten Platte blieb nach dem Ausschalen normalerweise unbearbeitet, während alle anderen Prüfkörperseiten durch Diamantsägen und -schleifen den Vorgaben der EN 14488-5 entsprechend nachgearbeitet wurden.

Analog der Bestimmung der Energieabsorption von Stahlfaserspritzbeton nach EN 14488-5 wird auch die Vorbelastung der Prüfkörper verformungsgeregelt durchgeführt, anders als bei der Bestimmung der Energieabsorption, aber bereits bei einer Deformation von 3 mm in der Plattenmitte abgebrochen. Eine Deformation von 3 mm stellt sicher, dass sich die relevanten Hauptrisse in der Platte bereits gebildet haben und die aus der Plattenbiegung resultierenden Zugspannungen von den rissüberbrückenden Fasern aufgenommen werden. Nach der Vorbelastung wurde auf der Unterseite im Zentrum jeder Platte ein 10 mm x 10 mm grosses Aluminiumblättchen aufgeklebt, um nach Versuchsbeginn der Messspitze der Messuhr ein sicheres Widerlager mit hinreichender Wiederholgenauigkeit zu bieten.



Abb.10 Prüfstand zur statischen Belastung vorgebrochener Faserspritzbetoplatte

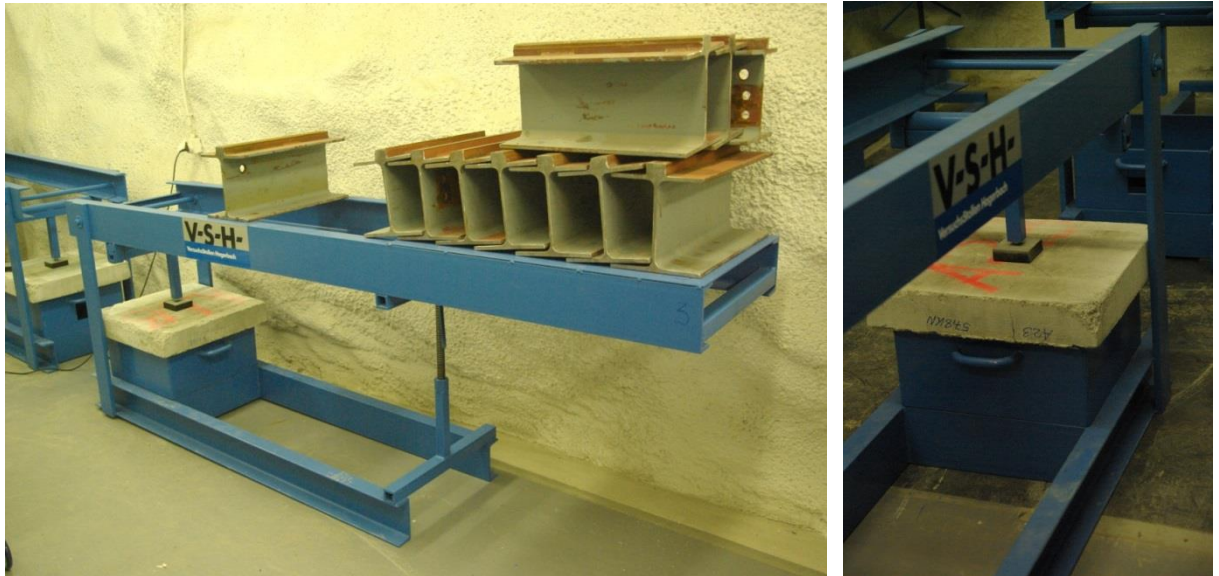


Abb.11 Zur Akklimatisierung gelagerte, vorbelastete Spritzbetonplatten

Spätestens 24 Stunden vor Versuchsbeginn wurden die so vorbereiteten Prüfkörper auf dem starren Stahlkasten, welcher als kontinuierliches Auflager dient und eine freie Spannweite der Platte von 500 mm x 500 mm gewährleistet, zentrisch gelagert. Die darauf folgende Zeitspanne von mindestens 24 Stunden vor der Lasteinleitung stellte die Anpassung des Prüfkörpers an das Klima im Prüfraum sicher.

Da die Gebirgstemperatur im Versuchsstollen ganzjährig unter 20° C liegt, konnte die Einhaltung dieses Sollwertes für die Prüftemperatur allein durch die Heizung realisiert werden. Die relative Luftfeuchte wurde durch Regulation der Frischluftzufuhr und einen luftfeuchtigkeitsgeregelten Entfeuchter möglichst konstant auf dem Sollwert von 65 % gehalten. Die Klimadaten wurden gemeinsam mit den Deformationswerten planmässig registriert.

Die zentrische Belastung erfolgt über einen kugelgelagerten, starren quadratischen Stempel von 100 mm Kantenlänge. Die Abmessungen sowohl des Auflagerkastens als auch des Belastungsstempels entsprechen denen der Prüfmaschine zur Bestimmung des Energieabsorptionsvermögens nach EN 14488-5, welche auch zum Vorbrechen der Platten benutzt wurde.



Abb.12 Auflagerrahmen und Belastungsstempel auf deformierter Spritzbetonplatte

Entsprechend der bei der Vorbelastung jeder Platte bis zu einer Durchbiegung von 3 mm registrierten residuellen Last wurden unter Berücksichtigung der Hebelverhältnisse die Massestücke aufgelegt und so längs des Hebelarms positioniert, dass sie am Belastungsstempel die zuvor festgelegte Last von 50, 70 oder 90 % der residuellen Kraft hervorrufen. Zu diesem Zweck wurde am freien Ende des Hebelarms eine Kranwaage angebracht und gegen einen über jeder Maschine am Gebirge verankerten Haken verspannt. Nach erfolgtem Einjustieren der Belastungsstücke wurde der Hebelarm dann langsam aus der Verspannung gegen das Gebirge gelöst und die Last entsprechend dem zuvor gewählten Niveau auf den Belastungsstempel übertragen.

Die Messung der Deformation in Plattenmitte erfolgte in vordefinierten Zeitintervallen an der sich unterhalb der Platte im Auflagerkasten befindlichen digitalen Messuhr mit einer Ablesegenauigkeit von 0.001 mm.

Zunächst wurden Lastniveaus von 50, 70 und 90 % der residuellen Last eingestellt. Belastungen von 90 % führten in der Regel zum spontanen Versagen oder zum Versagen nach wenigen Stunden oder Tagen. Waren die gemessenen Deformationen über lange Zeit nahezu konstant, wurde die Belastung schrittweise unter Registrierung der verursachten Deformationen erhöht.

In den folgenden beiden Abbildungen sind typische Rissbilder an im Dauerlastversuch stark deformierten Faserspritzbetonplatten nach dem Langzeitversuch zu sehen. Für die im Projekt eingestellten Energieabsorptionswerte traten überwiegend Rissbilder mit vier oder fünf Hauptrissen auf. Abhängig von der Anzahl und Ausrichtung der Hauptrisse können bei gleichem Ausgangsbeton jedoch unterschiedliche Anzahl von Rissen deutlich voneinander abweichende Rissflächeninhalte und damit unterschiedliche Anzahlen rissüberbrückender Fasern auftreten. Dies führt natürlich zu unterschiedlicher Belastung der Einzelfaser und damit zu abweichendem Kriechverhalten. Aus diesem Grund wurden in einer späteren Versuchsphase zwei kreuzweise durch das Zentrum der Platte führende Nuten von etwa 10 mm Tiefe eingesägt, um die Spannungen entlang dieser Nuten zu konzentrieren und die Ausbildung von vier senkrecht zueinander verlaufenden Hauptrisse zu induzieren.



Abb.13 Typisches Rissbild an einer bis zu starker Deformation geprüften Kunststofffaserspritzbetonplatte

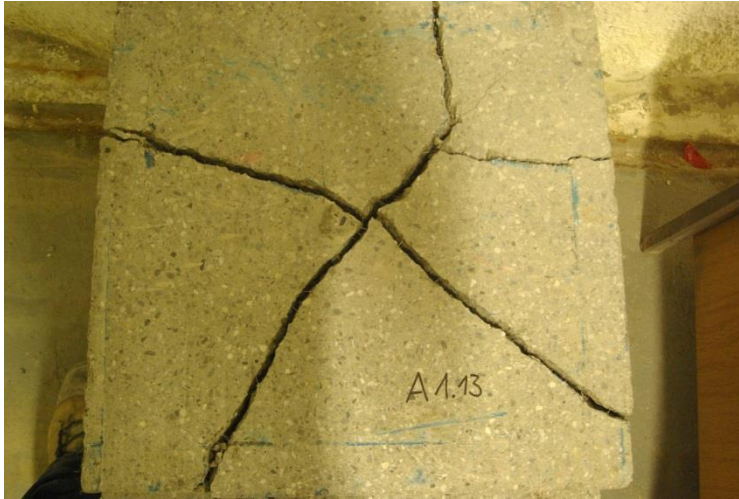


Abb.14 Typisches Rissbild an einer bis zu starker Deformation geprüften Stahlfaserspritzbetonplatte

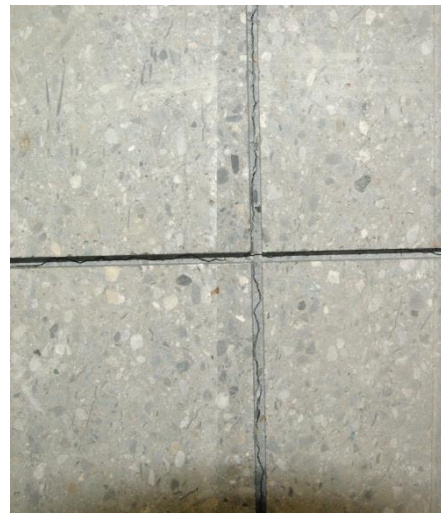


Abb.15 Vorbelastete Spritzbetonplatte mit Kreuznut

Abb.15 zeigt ein Beispiel dieser Prüfkörpervorbereitung nach der Vorbelastung der Platte und der Rissausbildung.

Kriechversuche an Balken

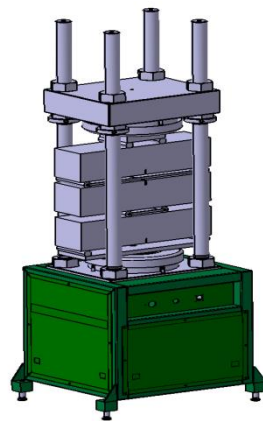
Es wurde Spritzbeton, im Versuchsstollen Hagerbach in Quadratschalungen gespritzt, mit einem Fasergehalt von 6 kg/m^3 (Kunststofffasern - analoge Dosierung bei anderer Faserdichte) bzw. 35 kg/m^3 (Stahlfasern) verwendet. Aus den gespritzten Platten wurden Balken $150 \times 150 \times 550 \text{ mm}^3$ entnommen.

Die Untersuchungen erfolgten im Zustand II: Durch Vorbelastung wird eine dem Gebrauchszustand entsprechende Anfangsrissbreite erzeugt. Die Probekörper wurden im Alter von ca. 120 Tagen daher zunächst dehnungsgeregelt (EN 14651) bis zu einer definierten Rissweitenöffnung (CMOD2) von 1.5 mm (Grenzdurchbiegung $1.32 \text{ mm} = \delta_{L2}$) weggesteuert belastet. Die Belastungsgeschwindigkeit wurde in Abweichung von der Norm konstant auf 0.24 mm/min festgesetzt. Die Probekörper wiesen eine Kerbe von 25 mm Tiefe auf.

Für die Dauerbelastung wurden die Balken in Belastungsrahmen eingebaut (jeweils 3

Balken mit (fast) gleicher Belastung. Das Gewicht der Balken wurde bei der Festlegung des Belastungsniveaus berücksichtigt. Entsprechend schaute die Kerbe des mittleren Balkens nach oben, die anderen beiden Kerben nach unten. Die Lasteinleitung erfolgte entsprechend einer vier-Punkt Auflage in Analogie zu EN 14488-3:2006. Es wurden Belastungsniveaus von 90 %, 70 % bzw. 50 % der residuellen Last im Zustand II (bei Durchbiegung δ_{L2}), welche bei der Rissinduktion erreicht wurde, angesetzt.

Die Rissöffnungsweite $CMOD(t_x)$ wurde nach der Belastung einmal pro Woche mit einem Dilatometer (Ablesegenauigkeit 1 Mikrometer) gemessen. Der Messbolzenabstand betrug 50 mm. Die Langzeitbelastung endete mit Erreichen einer bestimmten Standzeit (ca. 2 Jahre) oder einer Grenzverformung (3 mm Rissweitenöffnung).



Balken 550 x 150 x 150 mm³

mit Kerbe

(Kerbtiefe 25 mm, EN 14651)

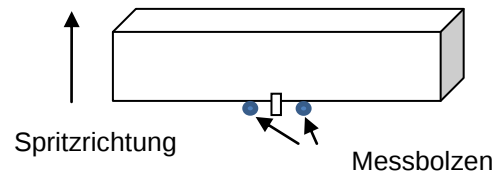


Abb.16 Schematische Darstellung Dauerlastprüfeinrichtung Biegebalken



Abb.17 Prüfung des Tragverhaltens unter Last

4.5.5 Ermittlung der Faserverteilung und -orientierung mittels RCT

Entnahme der Probekörper

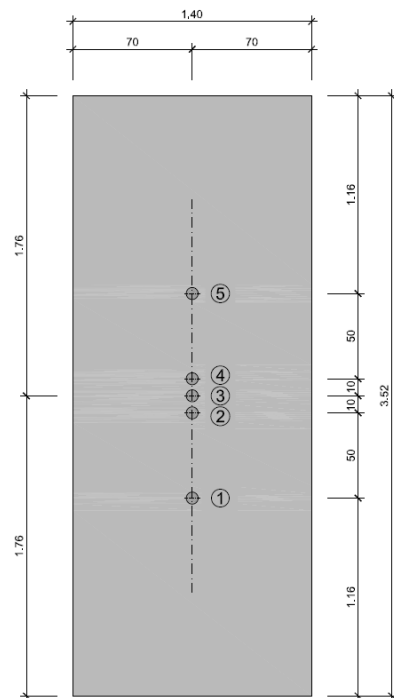


Abb.18 Entnahmestellen für Prüfkörper zur Bestimmung der Faserorientierung

Abb.18 beschreibt Anordnung der Prüfkörperentnahmestellen. Bohrkern wurden jeweils in der mittleren der drei Platten entnommen (Kap. 4.5.3), die für die Ermittlung des Faserrückpralls erstellt wurden. Durch die doppelt symmetrische Anordnung der Entnahmepunkte sowie das vollständige Durchbohren sowohl der Trägerplatte als auch der Spritzbetonschicht wurde sichergestellt, dass die Faserorientierung für alle Versuchsbetone an exakt der gleichen Stelle mit identischer Untergrundtopographie entnommen wurden.

Die Faserverteilung und Faserorientierung in der auf die Kunstfelswand aufgetragenen Spritzbetonschicht wurden mittels Röntgen-Computertomographie untersucht. Dazu wurden vom erhärteten Spritzbeton zunächst Bohrkern mit Durchmesser 60 mm entnommen und später auf Bohrkernabschnitte der Höhe geschnitten. Die Bohrkernentnahme erfolgte so, dass der Übergang zur Kunstfelswand gerade noch im untersten Teil der Bohrkern erhalten blieb. In den Untersuchungen hat sich gezeigt, dass trotz sehr leistungsstarkem Tomographieequipment die Analyse dickerer Bohrkern nicht möglich war.

Die Durchstrahlung der Betonkerne erfolgte auf der μ CT-Anlage der Empa mit einer Viscom Röhre TXD-160 kV bei 140 kV Beschleunigungsspannung und 140 mA Röhrenstrom. Die Strahlung wurde mit einem Perkin Elmer 1621-CN3 ES Detektor erfasst. Zunächst wurden in verschiedenen Teilschritten die erzielten Signale verbessert. Strahlaufhärtungs- (Effekte des unterschiedlich langen Strahlenwegs) und Ringartefakte konnten mittels entsprechenden Standard-Bildbearbeitungsalgorithmen korrigiert werden (Abb.19).

Während sich dadurch im Falle der Stahlfasern bereits zur 3D-Analyse geeignetes Bildmaterial ergab (beispielsweise waren auch Endhaken deutlich zu erkennen), erwies sich die 3D-Rekonstruktion und -analyse von Kunststofffasern als schwierig. Hauptproblem waren die relativ geringen Kontrastunterschiede zwischen Fasermaterial und Luft einerseits, andererseits aber auch die grosse Anzahl unregelmässiger

Lufteinschlüsse mit scharfen Ecken und Kanten (Lunker). Dies stellt denn auch einen wesentlichen Unterschied zum Ortsbeton dar, wo Lunker selten sind und Luftporen meist konvexe Formen annehmen.

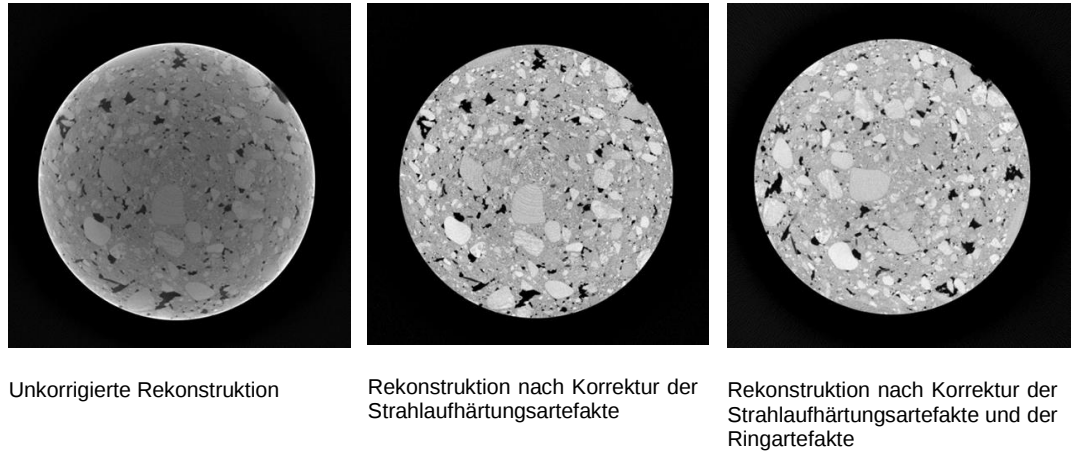


Abb.19 Bearbeitungsschritte der Röntgenbilder (Durchmesser 60 mm)

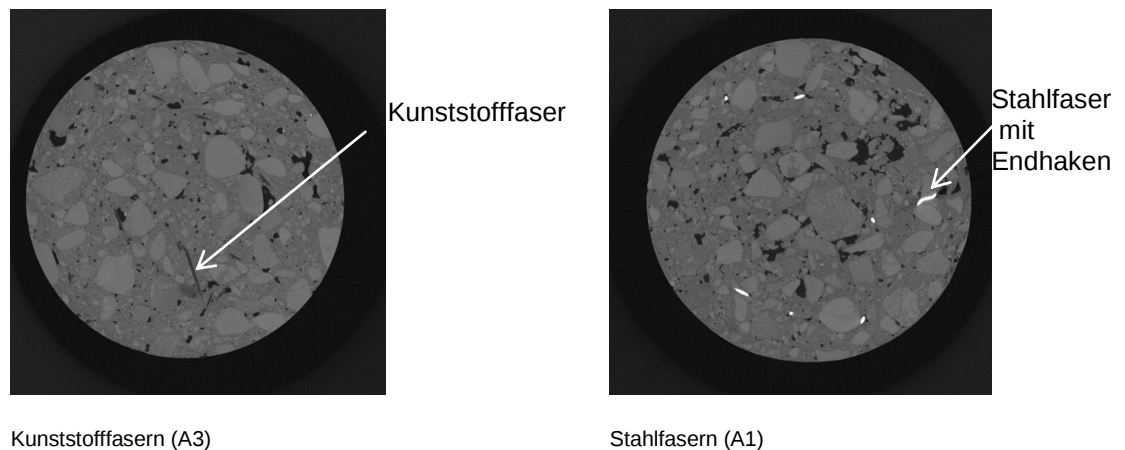


Abb.20 Bearbeitete Röntgenschnitte durch einen Bohrkern (Durchmesser 60 mm)

Zur weiteren Bildanalyse wurden daher der Reihe nach Grauwerte segregiert und der Bilddatenraum erweitert (Zylinder => Quader). Dann erfolgte eine erste Eliminierung der Luftporen durch Selektion eines Grauwertbereichs. Wesentlich komplexer war die Nachverfolgung und Separierung einzelner Fasern (Dr. Beat Münch, Empa), auf die im Rahmen dieses Berichts nicht eingegangen wird. Nur so viel: es musste dafür eigens ein neuer morphologischer Filter (Abb.20) kreiert werden, welcher die Nachverfolgung der Fasern, deren Separierung und die Feineliminierung der restlichen Luft gestattete. Schliesslich gelang auch bei kunststoffbasierten Fasern eine 3D-Rekonstruktion und -analyse der Faserverteilung und -orientierung. Jeder einzelnen Faser werden dabei im Phasenraum die entsprechenden Kugelkoordinaten (ϕ , θ) zugeteilt. Die entsprechende Äquatorebene wurde parallel zur Applikationsfläche (Reckli-Wand) gewählt, entsprechend liegt die Polachse parallel zur Spritzrichtung. Um eine allfällige Orientierung der Fasern zu beurteilen, wurden alle Kugelkoordinaten in einem Diagramm aufgetragen. Dabei wird an Stelle der Koordinate θ aus Skalierungsgründen der $\cos\theta$ verwendet (Kugel !). Anschliessend wird die dazugehörige Streuellipse (Hauptachsen der Streuungen) ermittelt. Bei völlig zufälliger räumlicher Orientierung ergäbe sich dabei ein Kreis.

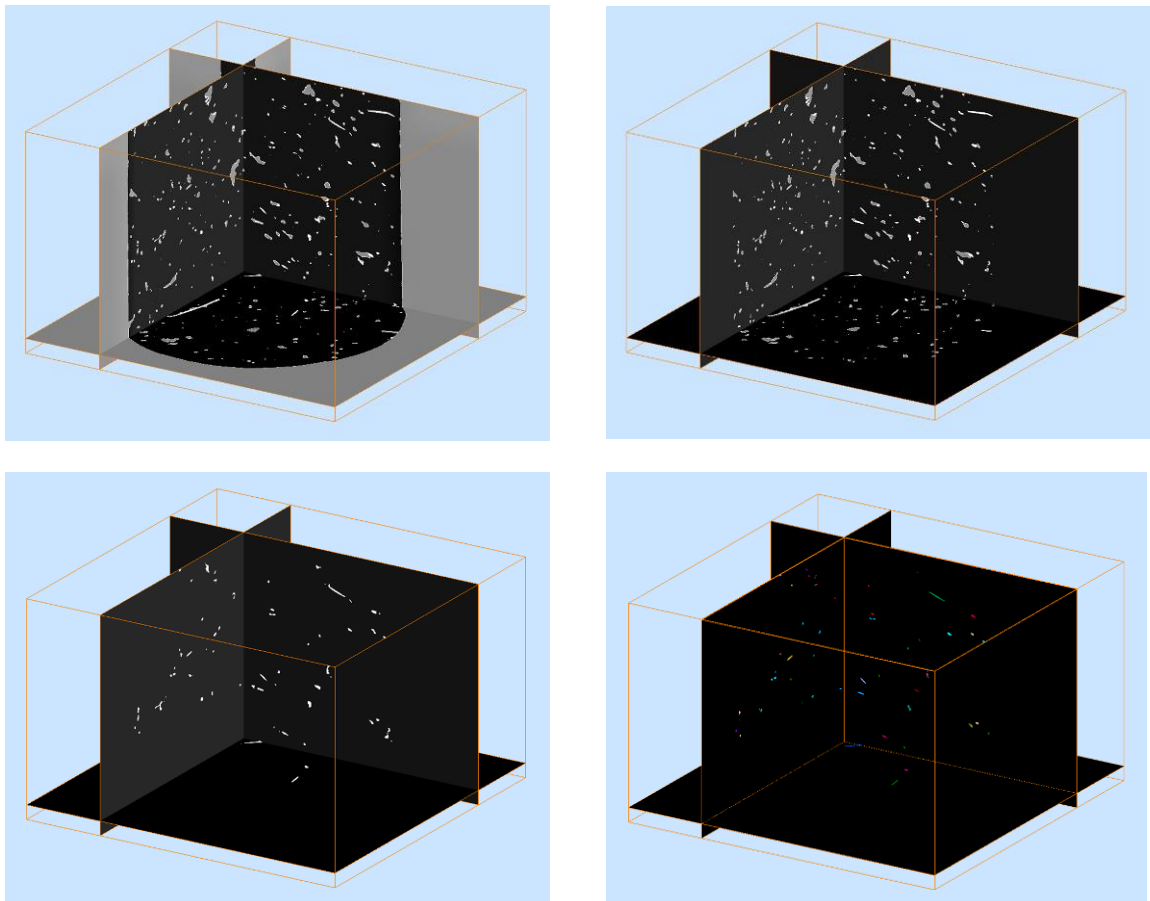


Abb.21 Segregation der Grauwerte, Erweiterung des Bilddatenraums, Selektion des Grauwertes

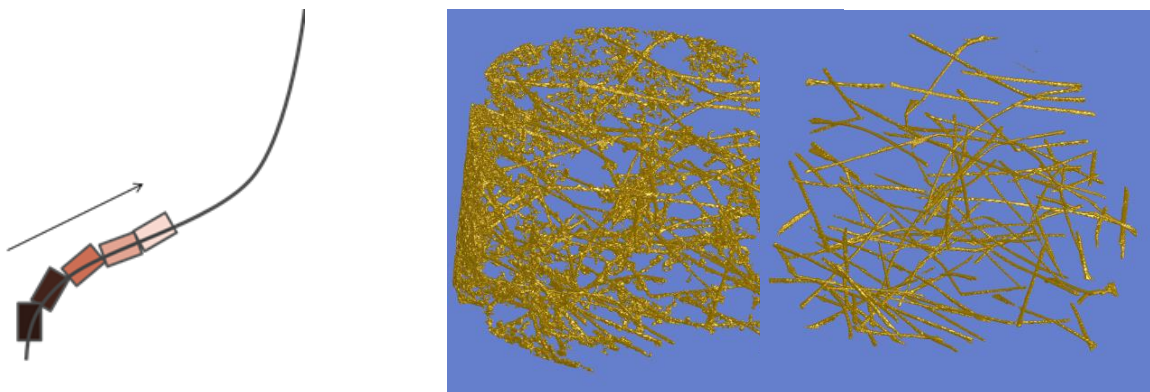


Abb.22 Schematische Funktionsweise morphologischen Filters und Filter-Resultat

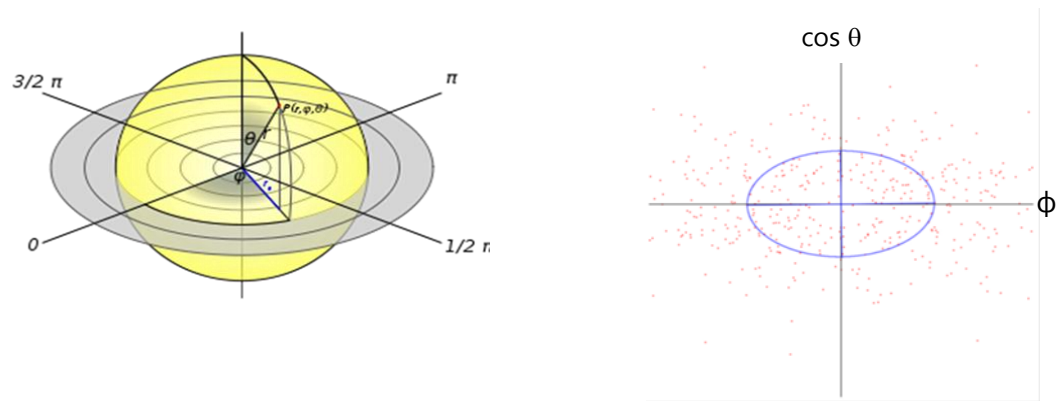


Abb.23 Parametrisierung der Orientierung der Fasern im 2D-Phasenraum. Jeder Einzelfaser wird im Phasenraum eine entsprechende Kugelkoordinate (ϕ , θ) zugeordnet (links). Durch Auftrag der einzelnen Faserkoordinaten im (ϕ , $\cos \theta$) Diagramm ergibt sich eine Punktwolke. Deren Streuellipse verdeutlicht schliesslich die räumliche Orientierung der Fasern (rechts).

Genauer untersucht wurden Bohrkern, welche mittig aus dem auf die Kunstreliefplatten gespritzten Spritzbeton entnommen wurden. Diese Bohrkern wurden in zwei Abschnitte mit einer Zylinderhöhe von jeweils 50 mm zerteilt. Abschnitt 1 entspricht dabei der ersten Spritzschicht nahe der Applikationsfläche, mit Abschnitt 2 wurde eine Spritzbetonschicht in einem Abstand von mindestens 50 mm von der Applikationsfläche untersucht (Abb.24).

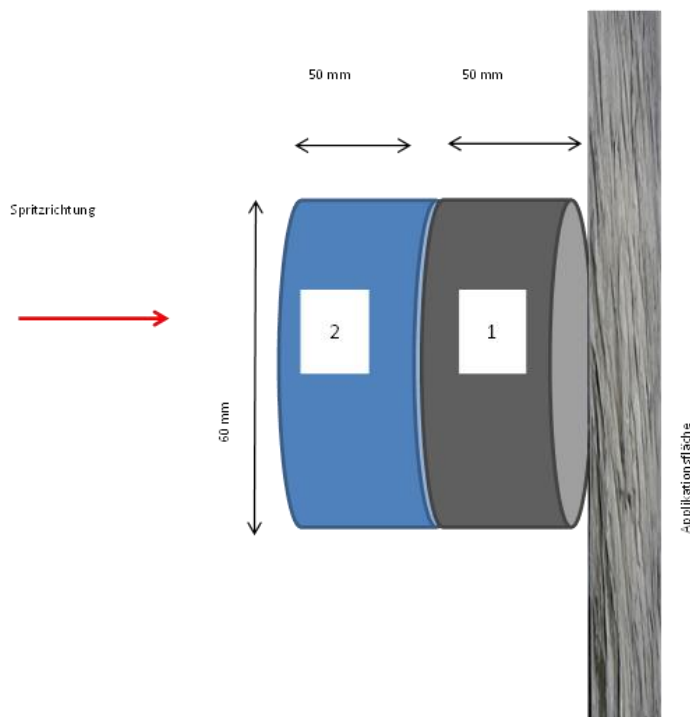


Abb.24 Bohrkernentnahme zur Ermittlung der Faserorientierung

4.5.6 Beständigkeit gegen chemischen Angriff

Zur Beurteilung der chemischen Widerstandsfähigkeit (Beständigkeit) von Spritzbeton mit Kunststofffasern wurden Langzeitversuche, hauptsächlich in aggressiver Umgebung unter Berücksichtigung möglicher Tunneleinflüsse wie Sulfate, Streusalze und Säuren in direktem Vergleich, mit handelsüblichen Stahlfasern durchgeführt. Das Verhalten unter Dauerlast wurde aus praktischen Gründen davon getrennt behandelt.

Die chemische Widerstandsfähigkeit wurde einerseits anhand von mechanischen Belastungstests (Quadratplattenversuche nach SIA 162/6), andererseits anhand mikroskopischer Untersuchungen vor bzw. nach den Langzeitversuchen beurteilt.

Als Ausgangsmaterial wurden gespritzte Quadratplatten verwendet (Kapitel 4.3). Da derartige Platten bei der Herstellung meist überfüllt werden, wurden die Platten zunächst im Auftrag auf eine Dicke von ca. 100 mm parallel geschnitten.

Die mechanischen Versuche werden an definiert vorbelasteten (mit definierten Rissweiten versehenen) Quadratplatten ($600 \times 600 \times 100 \text{ mm}^3$) durchgeführt. Die Vorbelastung erfolgte im Alter von ca. 120 Tagen in einem Quadratplattenversuch nach SIA 162/6 bis zu einer Grenzdurchbiegung von 3 mm (Abb.25). Dadurch wurden jeweils 4 bis 6 vom Zentrum zum Rand auslaufende Risse erzeugt.

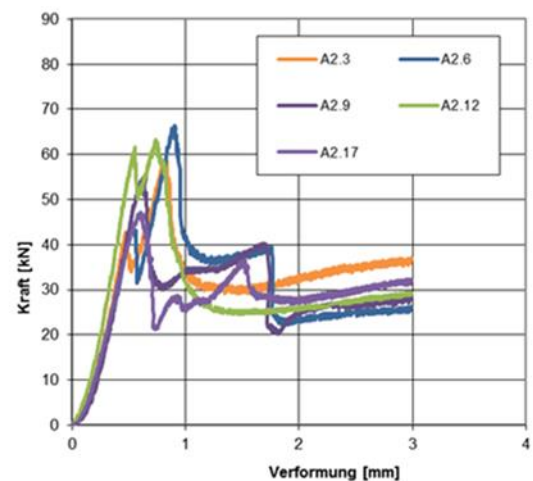


Abb.25 Rissinduktion in einem unterbrochenen Quadratplattenversuch nach SIA 162/6. Der Versuch wurde nach Erreichen der Grenzdurchbiegung von 3 mm gestoppt. links: Versuchsaufbau, rechts: Typisches Kraft-Verformungsdiagramm bei der Risserzeugung

Des Weiteren wurden für die mikroskopischen Untersuchungen (nach Belastung) Balken ($600 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$) aus Quadratplatten entnommen. Diese hier wurden in einem unterbrochenen Biegezugversuch (3-Pkt., Stützweite 300 mm) zweifach vorgebrochen. Dadurch wurden pro Prisma jeweils zwei Risse mit einer Rissbreite von ca. 0.5 und 1.2 mm erzeugt. Fünf derartige Balken (jeweils eines pro Fasertyp) wurden zu einer Serie zusammengesetzt und jeweils gleich gelagert resp. belastet.

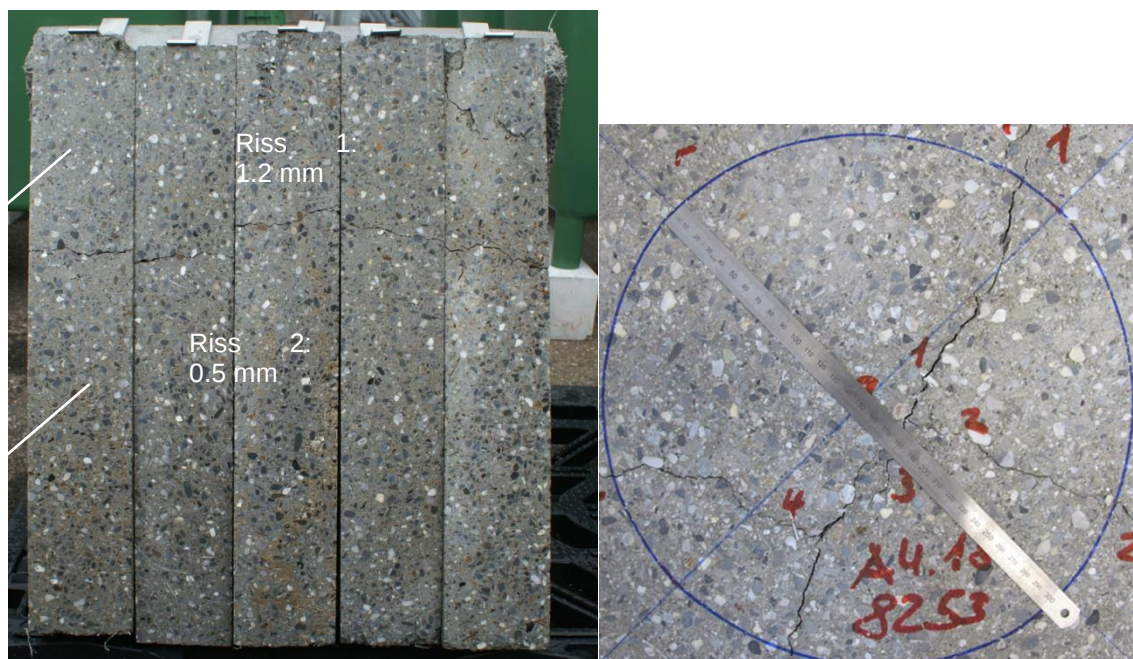


Abb.26 Balken (links Mikroskopie) und Quadratplatten (rechts residuelle Festigkeit) beim Beständigkeitsversuch

Die vorgebrochenen Quadratplatten und Balken wurden während einem Jahr verschiedenen Beanspruchungen unterworfen. Als Referenz wurden jeweils eine ungebrochene und eine vorgebrochene Quadratplatte in einem Klimaraum (20°C / 90 % r.F.) gelagert. Pro Fasertyp wurden jeweils eine vorgebrochene Quadratplatte und ein vorgebrochenes Prisma der freien Bewitterung in Dübendorf ausgesetzt (Lagerung 2) oder regelmässig mit verschiedenen Medien (Lagerung 3 bis 5) übergossen (Tab. 3).

Diese Art der Beanspruchung bildet dabei eine Spritzwasserbeanspruchung nach. Prinzipiell kommen im Tunnelbau aber auch Beanspruchungen in wasserführenden Trennrissen vor. Erfahrungsgemäss sind derartige Beanspruchungen eher härter als die hier gewählte Beanspruchungsweise, da dabei das Beanspruchungsmedium stetig erneuert wird.

Dazu wurden die Quadratplatten und Balken aufrecht auf eine Unterlage in einen Plastikcontainer gestellt und einmal pro Woche mit jeweils 5 Litern mit Hilfe einer Giesskanne mit der entsprechenden Lösung (Salzlösung, Sulfatlösung, niedrig konzentrierte Schwefelsäure) übergossen. Ein Teil der Lösung wurde im Behälter aufgefangen und ein zweites Mal wiederverwendet. Jedes zweite Mal wurde eine frische Lösung verwendet. Der Füllstand des Beanspruchungsmediums im Container wurde ausreichend tief gehalten, so dass das Medium den Prüfkörper nicht berührte. Durch einen Deckel wurde der Behälter bei den Lagerungen 3 bis 5 zugedeckt (Abb.27).

Tab. 3 Lagerungsbedingungen beim Beständigkeitsversuch

Lagerung 1	90 % RF / 20°C	nicht zugedeckt	ohne Medium
Lagerung 2	freie Bewitterung	nicht zugedeckt	ohne Medium
Lagerung 3	3 % NaCl-Lösung	zugedeckt	wöchentlich, 5 l
Lagerung 4	4 g/l Na ₂ SO ₄ -Lösung	zugedeckt	wöchentlich, 5 l
Lagerung 5	2 %ige Schwefelsäure	zugedeckt	wöchentlich, 5 l
Referenz 1	vor Beanspruchung	ungebrochen	ohne Medium
Referenz 2	Klimaraum 20°C / 90 % r.F.	ungebrochen	ohne Medium



Abb.27 Beanspruchung mit verschiedenen wässrigen Lösungen durch Übergiessen der Prüfkörper (Quadratplatten für residuelle mechanische Belastungsversuche, Balken für Mikroskopie)

Diese Versuche liefen gesamthaft ein Jahr. Danach wurde die residuelle Festigkeit (im Quadratplattenversuch nach SIA 162/6) ermittelt, um den Effekt der chemischen Belastung auf das Tragverhalten zu quantifizieren.

Aus den Balken wurden jeweils zwei kleinere Stücke ($100 \times 100 \times 50 \text{ mm}^3$), welche den Riss mit beinhalteten, entnommen. Der Riss wurde unter Vakuum durch Verfüllung mit einem aushärtenden Harz bis zur mikroskopischen Analyse konserviert. Kurz vor der Analyse wurden diese Stücke senkrecht zum Riss mittig zerteilt und daraus jeweils ein polierter Anschliff hergestellt, so dass die Risse auf der ganzen Breite des ursprünglichen Prismas im Auflicht-Mikroskop (hochauflösendes Stereomikroskop, Zeiss Stemi SV 11) analysiert werden konnten.

4.6 Arbeitsprogramm

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Eigenschaften des faserverstärkten Spritzbetons wie sie in Abb.28 dargestellt sind, untersucht. Dies sind im Einzelnen:

- Rückpralloptimierung/ Faserorientierung
- Dauerfestigkeitseigenschaften
- Langzeitbeständigkeit gegen chemische Angriffe

Die genannten Eigenschaften müssen immer als Gesamtheit betrachtet werden, da gegenseitige Wechselwirkungen bestehen und Optimierungen in einer Richtung allenfalls zu gegenteiligen Entwicklungen an andere Stelle führen.

Das Langzeitverhalten der faserverstärkten Spritzbetone wird vor dem Hintergrund der Faserverteilung und -orientierung im Spritzbeton beurteilt, die im Rahmen der Rückprallbestimmung ermittelt wurden.

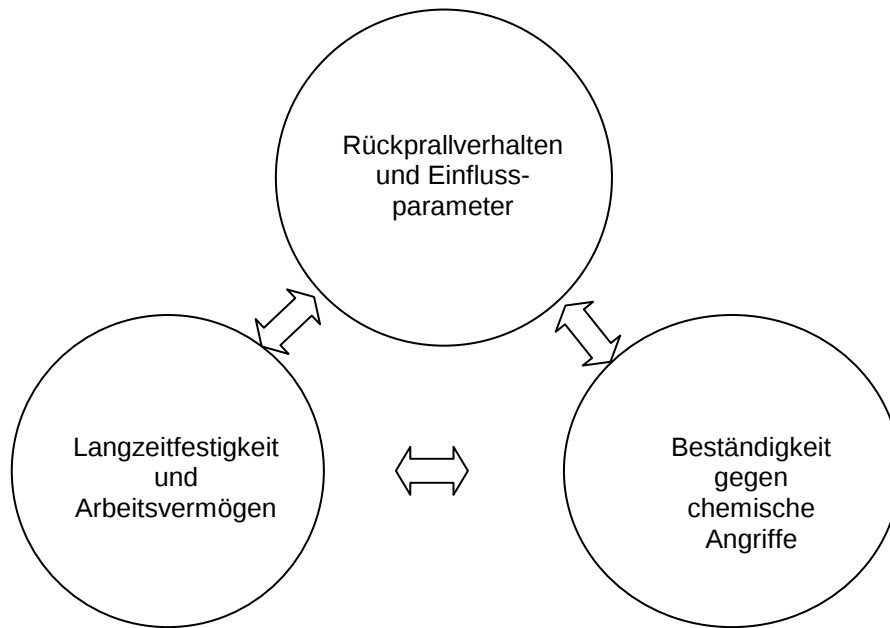


Abb.28 Wechselwirkung zwischen den unterschiedlichen Parametern

Abweichend vom ursprünglichen Projektterminplan wurden die Prüfkörper für die Teilprojekte Dauerfestigkeit und Beständigkeit gegen chemische Angriffe bereits während dieser ersten Versuchsreihe hergestellt. Die Bearbeitung der verschiedenen Fragestellungen erfolgte weitgehend parallel. Dabei wurde bewusst das Risiko eingegangen, dass die Prüfkörper für die Dauerlastprüfungen und die Bestimmung der Beständigkeit an Prüfkörpern erfolgen, die nicht unter optimalen Bedingungen erstellt wurden. Die Prüfverfahren zur Beurteilung des Dauerlastverhaltens und Beständigkeit wurden grundsätzlich beurteilt und hatten nicht zum Ziel, die Erreichung bestimmter Eigenschaften nachzuweisen.

Nach der Auswahl der in der Untersuchung berücksichtigten Fasern erfolgten in einem ersten Untersuchungsschritt Spritzbetonapplikationen zur Bestimmung der Faserorientierung und des Rückprallverhaltens. In dieser Phase wurden Spritzbetonmuster in Spritzkisten für die weiteren Untersuchungen der Dauerhaftigkeitseigenschaften hergestellt.

Die weiteren Untersuchungen erfolgten parallel zueinander:

- Auswertung der Messreihe bezüglich der Faserorientierung und Faserverteilung durch Röntgentomographie
- Dauerfestigkeitseigenschaften an plattenförmigen Prüfkörpern
- Dauerfestigkeitseigenschaften an Biegebalken
- Langzeitbeständigkeit gegen chemische Angriffe

Parallel zu den genannten und im Projektumfang geplanten Arbeiten konnten weitere Resultate zum Rückprallverhalten von faserverstärktem Spritzbeton aus anderen Projekten adaptiert werden, die im entsprechenden Kapitel berücksichtigt sind.

Die aktuellen Erkenntnisse aus dem Projekt wurden während der Projektdauer am World Tunnel Congress in den jeweiligen internationalen Fachgremien („ITA WG 12 – Sprayed concrete“ und „ITAtch AG Sustainable Sprayed Concrete“) vorgestellt und diskutiert. Damit wurde sichergestellt, dass Erfahrungen aus aller Welt – insbesondere in Australien ist der Einsatz von Kunststofffasern weitverbreitet - im Projekt Berücksichtigung fanden.

5 Spritzverhalten Kunststoffaserspritzbeton

von

5.1 Spritzbetoncharakterisierung

Die Eigenschaften des applizierten Spritzbetons sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt. Da für jeden Fasertyp ein eigener Beton hergestellt wurde, variieren die Betonqualitäten in engen Bandbreiten

Tab. 4 Spritzbetoneigenschaften

Parameter	Faser 1	Faser 2	Faser 3	Faser 4	Faser 5
Frischbetoneigenschaften					
- Rohdichte [kg / m ³]	2388	2364	2268	2303	2314
- Luftporengehalt [%]	2.3	1.4	4.9	3.9	3.2
- Ausbreitmass[mm]	470	600	510	490	470
- w/z-Wert [-]	0.49	0.49	0.47	0.48	0.50
Würfeldruckfestigkeit [MPa]					
- 7-Tage	49.4	48.6	42.2	45.1	47.5
- 28 Tage	55.9	58.2	51.3	51.3	57.8
- 90 Tage	66.3	63.3	57.9	58.2	65.2
Betonrohddichte [kg / m ³]					
- 7 Tage	2390	2378	2303	2347	2351
- 28 Tage	2415	2381	2328	2339	2357
- 90 Tage	2411	2393	2342	2311	2339
Bohrkerndruckfestigkeit [MPa]					
- 28 Tage	40.1	44.8	42.2	38.1	43.9
Rohdichte Spritzbeton [kg / m ³]					
- 28 Tage	2268	2271	2252	2294	2268
Energieabsorption bei 25 mm [J]	1002	346	877	807	759

Bezüglich der Frischbetoneigenschaften zeigen die untersuchten Betone ein weitgehend einheitliches Bild. Auffallend ist der im Vergleich zu den übrigen Mischungen niedrige Luftporengehalt. Die diesbezüglichen Ursachen wurden nicht weiter evaluiert.

Die Rohdichten und Druckfestigkeiten der applizierten Spritzbetone erzielen Werte, die in der erwarteten Größenordnung liegen. Die erreichten Festigkeiten des Spritzbeton mit der Faser 4 erreichen die tiefsten Werte, obwohl die Rohdichte hier den höchsten Wert aufweist.

Ausgehend von einer angestrebten Energieabsorption von 800 J fällt der niedrige Wert der Mischung mit der Faser 2 auf. Die Mischung mit der Faser 1 (Referenzfaser) liegt deutlich über dem angestrebten Energieabsorptionsvermögen. Durch Anpassung der Faserdosierung kann davon ausgegangen werden, dass der Zielwert von 800 J erreicht werden kann.

5.2 Spritzversuche: allgemeine Feststellungen/Beobachtungen

Der Applikationsprozess des Spritzbetons erfolgte bei allen Mischungen ohne Auffälligkeiten oder Schwierigkeiten. Dies kann als Indiz dafür gesehen werden, dass alle

in die Untersuchung einbezogenen Fasern den Anforderungen des Marktes bezüglich Verarbeitbarkeit gerecht werden.

5.3 (Faser-) Rückprall

Der Rückprall von Spritzbeton und Fasern wurde gemäss den in Kap. 4.5.3 beschriebenen Verfahren bestimmt.

Die Resultate für die Rückprallmengen an der vertikalen Wand sind in den folgenden Abbildungen zusammengestellt. Je Mischung ist jeweils der Rückprall der ersten Lage, die direkt auf den Untergrund appliziert wurde und der zweiten Lage, die im Nachgang an die erste Lage auf diese appliziert wurde.

Die Mehrheit der applizierten Mischungen zeigt das erwartete Bild, dass der Rückprall der zweiten Lage geringer ist als in der ersten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der zweiten Lage der applizierte Spritzbeton auf einen weichen Untergrund trifft als bei der ersten Lage. Auch die grössere Spritzstärke führt dazu, dass ein grösserer Anteil vom Spritzbeton frisch in frisch ineinander verarbeitet wird, wodurch der Rückprallanteil reduziert wird.

Die Wiederholung der Versuchsreihe mit speziellem Focus auf der Applikation der ersten Spritzlage zeigte deutliche Unterschiede in den Rückprallanteilen, die teilweise den Faktor 2 unter den gleichen Randbedingungen zeigten. Diese Feststellung führt zur Schlussfolgerung, dass das Rückprallverhalten eines Spritzbetons sehr sensitiv auf minimale Veränderungen im Spritzprozess reagiert.

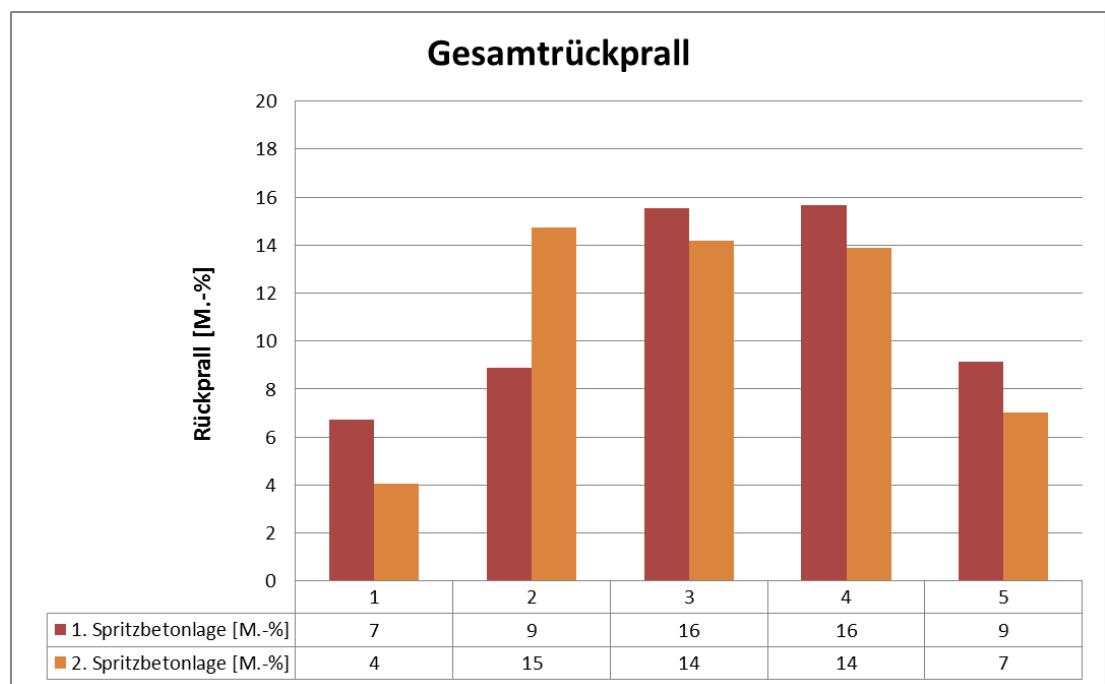


Abb.29 Spritzbetonrückprall

Parallel zum Gesamtrückprall des Spritzbetons wurde der Faserrückprall bzw. der Faseranteil in applizierten Spritzflächen und in den Spritzkisten beurteilt. Die folgende Abbildung stellt dem Faseranteil im Ausgangsgemisch, der zu 100 % gesetzt wurde, den relativen Faseranteilen im Spritzbeton an der Wand und in Spritzkisten gegenüber.

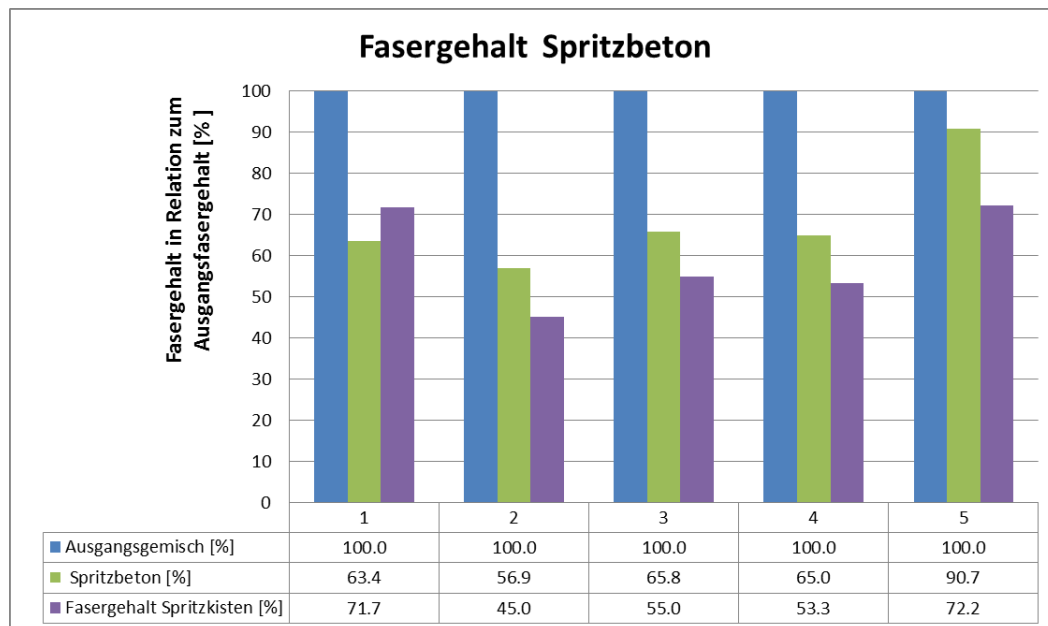


Abb.30 Fasergehalt Spritzbeton

Bei der Referenzmischung mit Stahlfaser (Mischung 1) zeigt sich bei den Proben in der Spritzkiste ein höherer Faseranteil als bei den Proben, die von der Wand entnommen wurden. Dies ist ein Effekt, der auch von anderen Untersuchungen und Prüfungen bekannt ist. Aus anderen Untersuchungen sind teilweise deutlich höhere Faserrückprallwerte gemessen worden. Es ist zu vermuten, dass beim Erstellen der Spritzkisten ein Teil des Faserrückpralls wieder in die Spritzkiste zurückfällt bzw. sich in den Eck- und Randbereichen ansammelt. Diese Fasern sind bezüglich der Tragfähigkeit nicht wirksam, werden aber bei der Fasergehaltsbestimmung der Gesamtprobe miterfasst.

Die umgekehrten Verhältnisse zeigen sich bei den Spritzbetonen mit Kunststofffasern. Bei allen Mischungen mit Kunststofffasern liegt der Fasergehalt bei den Proben von der Wand über dem aus der Spritzkiste.

Wiederholungen von Spritzapplikationen mit Kunststofffasern zeigen teilweise deutlich höhere Fasergehalte bzw. niedrigere Faserrückprallwerte.

Als Fazit aus den vorliegenden Untersuchungen werden die folgenden Schlussfolgerungen gezogen:

- Unter scheinbar gleichen Versuchsrandbedingungen kann der Rückprall von Spritzbeton und Fasern deutlich variieren
- Der Faserrückprall wird hauptsächlich vom Gesamtrückprall dominiert, evtl. individuelle Besonderheiten einzelner Fasern werden davon bisher 'überdeckt'.
- Die verschiedenen untersuchten Kunststofffasern zeigen keine signifikanten unterschiedlichen Verhalten bezüglich des Rückprallverhaltens

Im Folgenden werden Resultate zusammengestellt, die im Rahmen von weiteren Untersuchungsarbeiten gewonnen werden konnten und dazu dienen, die Einflussfaktoren auf den Spritzprozess besser zu verstehen.

Im Rahmen von Reihenuntersuchungen wurden die folgenden Parameter variiert:

- Düsenabstand (0.8 m, 1.5 m, 2.5 m)
- Luftvolumenstrom ($5 \text{ m}^3/\text{min}$, $10 \text{ m}^3/\text{min}$, $15 \text{ m}^3/\text{min}$)

Mit den sich daraus ergebenden 9 Parameterkombinationen wurden Spritzbetone aus einer Produktionscharge auf eine Trägerplatte aufgetragen (Abb.31) und unter anderem Festigkeit und Faseranteil in den Spritzmustern bestimmt.



Abb.31 Spritzmuster zur Evaluation Einfluss Düsenabstand und Luftvolumenstrom

In einem ersten Untersuchungsschritt wurde unbewehrter Beton mit einer Beschleunigerdosierung von 6 % verarbeitet. Die Resultate sind in Abb.33 summarisch dargestellt. Die detaillierte Darstellung der Resultate findet sich in Abb.32 und [2]. Auffallend ist die vergleichsweise geringe Streuung der Festigkeitsresultate bei der Variation der Spritzparameter Düsenabstand und Luftmenge.

Die höchsten Druckfestigkeiten werden bei einem Düsenabstand von 1,5 m erzielt, der in der Literatur als optimaler Wert angegeben wird. Die geringsten Festigkeiten werden bei kleinem Düsenabstand (0,8 m) und grosser Förderluftmenge (15 m³/min) festgestellt. Weniger signifikant kleiner gegenüber den maximalen Festigkeiten sind die Druckfestigkeiten bei grossem Düsenabstand (2,5 m) und kleiner Luftmenge (5 m³/min). Mit Streuungen der Druckfestigkeiten über weite Bereiche der Parameterstudie von nur 4% zeigen sich die Spritzbetoneigenschaften bei dieser Beschleunigerdosierung wenig sensibel gegenüber Veränderungen der Spritzparameter.

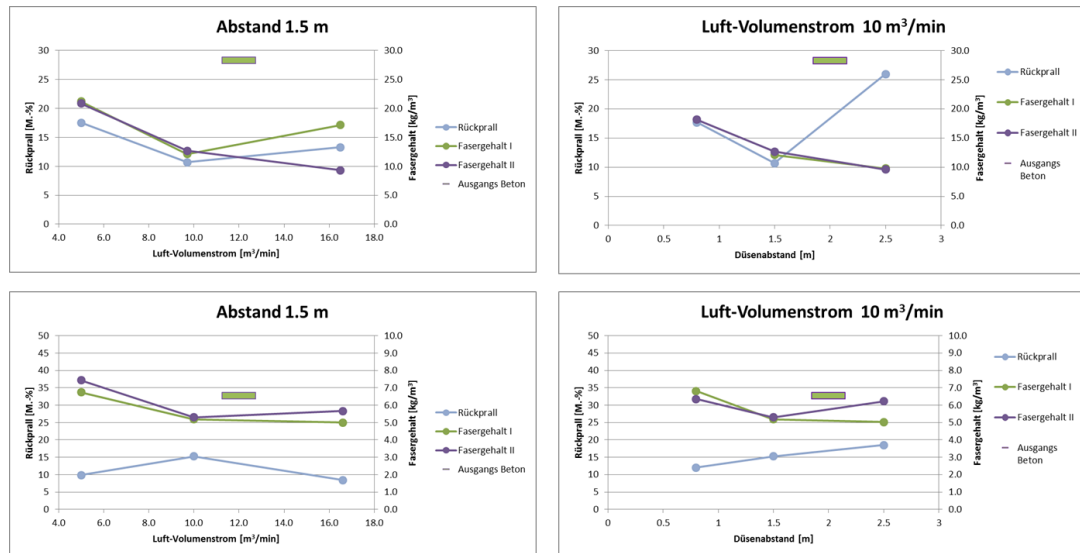


Abb.32 Rückprall als Funktion von Luft-Volumenstrom und Düsenabstand (oben Faser 1 und unten Faser 3)

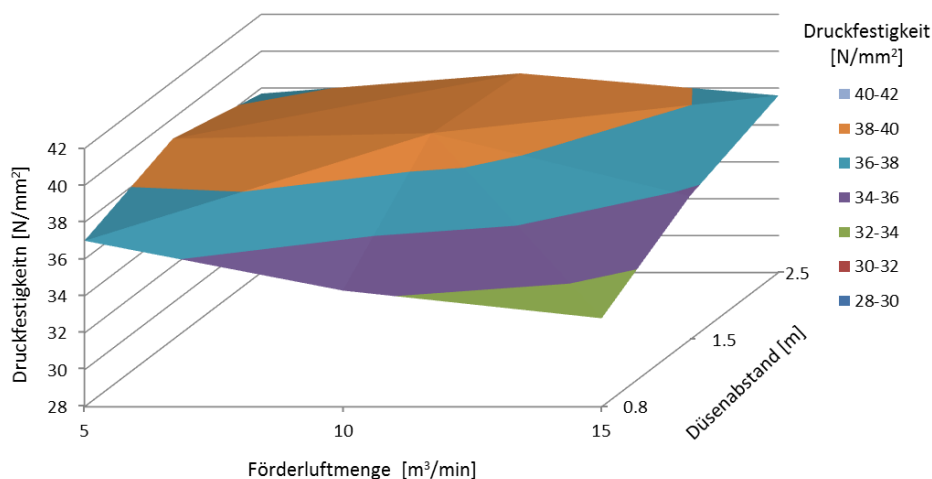


Abb.33 Druckfestigkeit als Funktion von Luft-Volumenstrom und Düsenabstand bei 6 % BE-Dosierung

Die Resultate aus früheren Untersuchungen ohne Faserzugabe [2] wurden bei den beschriebenen Prüfungen mit Faserzugaben bestätigt. Dies sowohl bezüglich der absoluten Höhe der Festigkeitswerte als auch bezüglich des Einflusses von Förderluftmenge [m³/h] und Düsenabstand. Es wurde kein signifikanter Einfluss der Art der Fasern auf die Druck-Festigkeitswerte festgestellt.

Wird bei gleichem Ausgangsgemisch die Beschleunigerdosierung auf 9 % erhöht, ergeben sich Festigkeitswerte und Verteilungen wie in Abb.34 dargestellt. Die Aussagen zu den generellen Relationen bezüglich des Einflusses von Förderluftmenge und Düsenabstand bleiben unverändert. Die besten Festigkeitsresultate und auch höchsten Dichtewerte werden bei den oben erwähnten und auch in der sonstigen Fachliteratur genannten Parameterkombinationen von 1,5 m Düsenabstand und 10 m³/h Förderluftmenge erzielt. Für die „idealen“ Parameter-Kombinationen von Förderluftmenge und Düsenabstand erreichen die ermittelten Druckfestigkeitswerte nahezu identische Werte. Bei Proben aus der Spritzkiste werden bei der erhöhten Beschleunigerdosierung

geringfügig niedrigere Festigkeiten ermittelt, bei den Proben aus der Wand liegen die Werte bei der geringeren Beschleunigerdosierung geringfügig höher. Diese Variationen werden als nicht signifikant erachtet.

Es fällt jedoch auf, dass die absoluten Festigkeitswerte bei extrem ausfallenden Parametern deutlich niedrigere Werte als das „Optimum“ aufweisen. Während bei den Resultaten mit niedriger (6 %) Beschleunigerdosierung mit Ausnahme der Prüfkörper, die mit extrem kleinem Düsenabstand (0,8 m) erstellt wurden, nur geringe Differenzen in den Festigkeitswerten bestehen (4 %), ergeben sich bei der hohen (9 %) Beschleunigerdosierung beim Abweichen von den optimalen Spritzparametern Festigkeitseinbußen von deutlich über 10 %. Diese sind bei der hohen Beschleunigerdosierung und bei den kleinen Düsenabständen am höchsten (20 %). Jedoch sind signifikante Festigkeitseinbußen auch bei den grösseren Düsenabständen und nicht idealen Förderluftmengen zu verzeichnen.

Mit zunehmender Beschleunigerdosierung reagiert das System Spritzbeton empfindlicher auf Abweichungen von den idealen Spritzparametern.

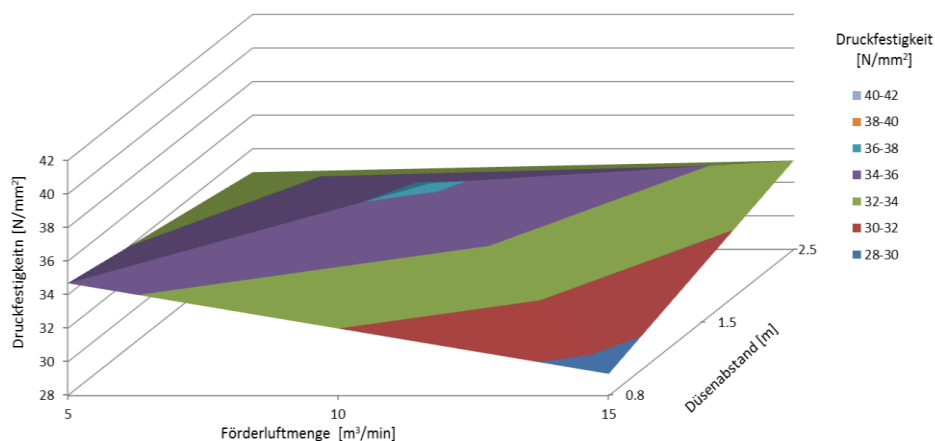


Abb.34 Druckfestigkeit als Funktion von Luft-Volumenstrom und Düsenabstand bei 9 % BE-Dosierung

Während der Spritzarbeiten ergab sich die Möglichkeit, den Spritzstrahl mit einer Hochgeschwindigkeitskamera zu beobachten. Abb.35 zeigt die Situation am Austritt aus der Düse. Im eingekreisten Bereich fällt eine „Wolke“ mit einer Materialkonzentration - vermutlich eindosierter Beschleuniger – auf, die nicht homogen in den Spritzstrahl eingemischt ist. Diese Inhomogenitäten werden sich auch im Spritzbeton widerspiegeln und führen dort zu teilweise nicht erklärbaren Resultaten.



Abb.35 Spritzbetonaustritt an Düse (Aufnahme mit Hochgeschwindigkeitskamera)

5.4 Faserorientierung

Die Fasern in den untersuchten Bohrkernen, so wie sie zerstörungsfrei mittels Röntgencomputertomographie rekonstruiert wurden, sind in der Seitenansicht (seitlicher Blick auf die Mantelfläche des untersuchten Bohrkerns, somit senkrecht zur Spritzrichtung) und in der Aufsicht (Blick von oben auf den untersuchten Bohrkern, somit parallel zur Spritzrichtung) in den Abb.36 wiedergegeben. Zudem ist die dazugehörige Streuellipse dargestellt.

Dabei zeigen sich vor allem mit Stahlfasern sehr schöne Details wie deutlich sichtbare Endhaken. Bei einzelnen Kunststofffasertypen sind aber noch relativ grosse Anteile schlecht definierter Strukturen und unterbrochene Fasern, welche dann als Einzelfasern interpretiert werden, zu sehen. Die genaue Analyse der Streuellipsen ist daher mit einer gewissen Vorsicht durchzuführen.

Schon auf diesen Abbildungen wird eine Bevorzugung der Faserrichtung senkrecht zur Spritzrichtung deutlich. Die Fasern orientieren sich entlang der Applikationsfläche und liegen vermehrt parallel zur Wand, auf die der Spritzbeton aufgetragen wurde. Dies wird in den Streuellipsen verdeutlicht. Zunächst wird ersichtlich, dass die Streuellipsen nicht kreisförmig sind. Sie sind deutlich in Polrichtung verengt. Somit sind die Fasern parallel zur Äquatorebene (senkrecht zur Polachse) und somit senkrecht zur Spritzrichtung orientiert.

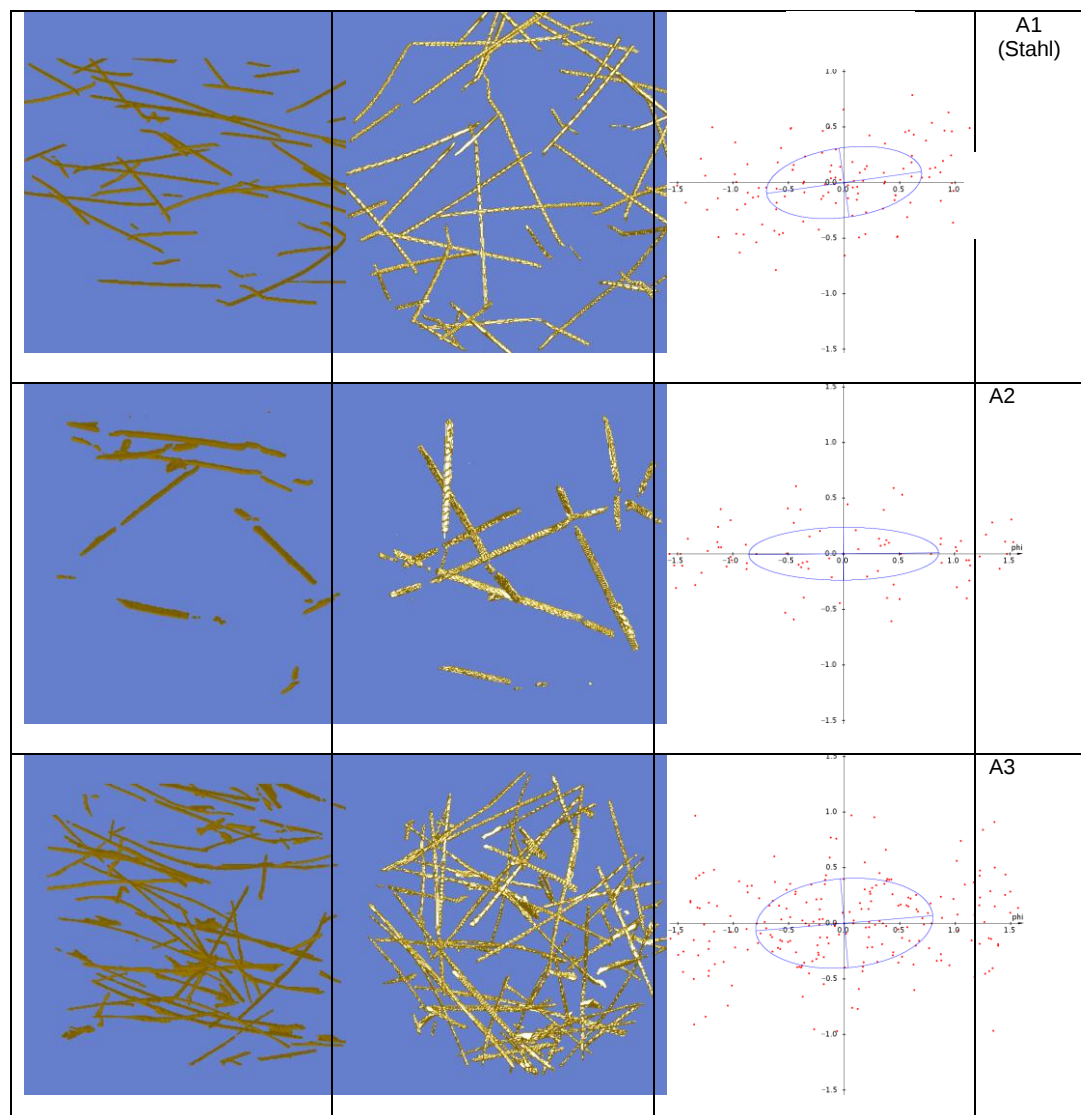
Die Hauptachsen der Streuellipsen sind im Wesentlichen parallel zu den Koordinatenachsen und die Mittelpunkte der Streuellipsen liegen jeweils genau auf dem Schnittpunkt der Koordinatenachsen ϕ resp. $\cos \theta$. Neben der bevorzugten Orientierung entlang der Applikationsfläche ergibt sich somit keine weitere Bevorzugungsrichtung, was auf eine homogene Applikation des Faserbetons schliessen lässt.

Bei Fasern mit grösseren Durchmessern ergeben sich aber durchaus gewisse Bereiche mit geringeren Faseranteilen. Eine geringe Faseranzahl im Ausgangsgemisch kann somit zu einer gewissen Inhomogenität in der Faserverteilung führen, welche evtl. rein statistisch bedingt sein könnte. Eine grössere Faseranzahl im Ausgangsgemisch (Fasern mit geringerem Durchmesser) kann sich somit positiv hinsichtlich einer verbesserten

Gleichmässigkeit des Spritzbetons auswirken. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass dazu als notwendige Voraussetzung die Fasern schon im Ausgangsgemisch gleichmässig verteilt sein müssen, resp. sich entsprechend gut dispergieren lassen.

In Tab. 5 Mittelwerte der Raumkoordinaten der einzelnen Fasern und der Streuellipse wird die Lage der Streuellipsen (Mittelpunktkoordinaten x , y) und deren Hauptachsenlängen (a , b) sowie deren Winkelabweichung α (von der Koordinatenachse ϕ) für jeden untersuchten Bohrkernabschnitt wiedergegeben. Als Mass des Orientierungsgrades der Fasern wurde der Quotient der Hauptachsen gebildet. Wäre die Faserorientierung im Raum uniform würde dieses Verhältnis den Wert 1 annehmen. Es werden teilweise aber deutlich kleinere Werte ermittelt, was auf eine starke räumliche Orientierung der Fasern hinweist. Die beobachteten Winkel α sind generell sehr klein, die Hauptachsen der Streuellipsen sind weitgehend parallel zu den Koordinatenachsen. Somit ist die Verteilung der Fasern gleichmässig.

Im Allgemeinen zeigt sich, dass die ermittelte Orientierung senkrecht zur Spritzrichtung in der zweiten Spritzschicht (weiter weg von der Applikationsfläche) sogar noch verstärkt vorliegt. In einer anlogen Arbeit (nur Faser A1 und A3) wurden teilweise eine sogar noch stärkere Orientierung von Kunststofffasern ermittelt [35]. Dies zeigt auf, dass bei der Orientierung der Fasern Applikationsparameter und Spritzbetonzusammensetzung eine Rolle spielen.



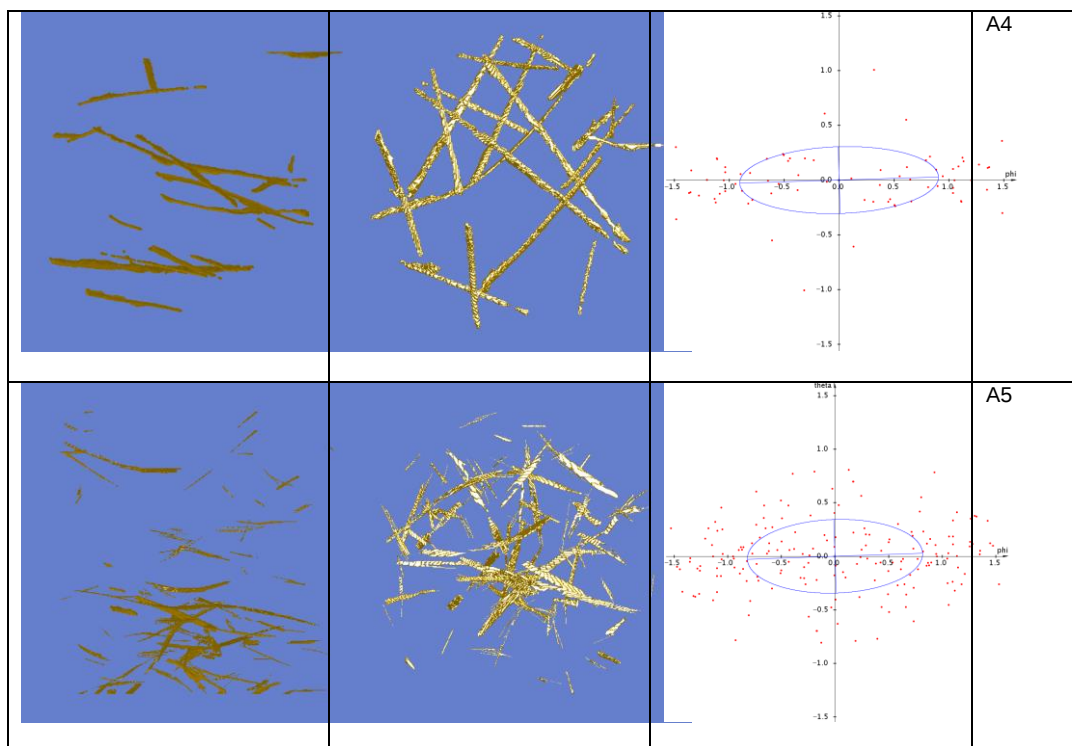
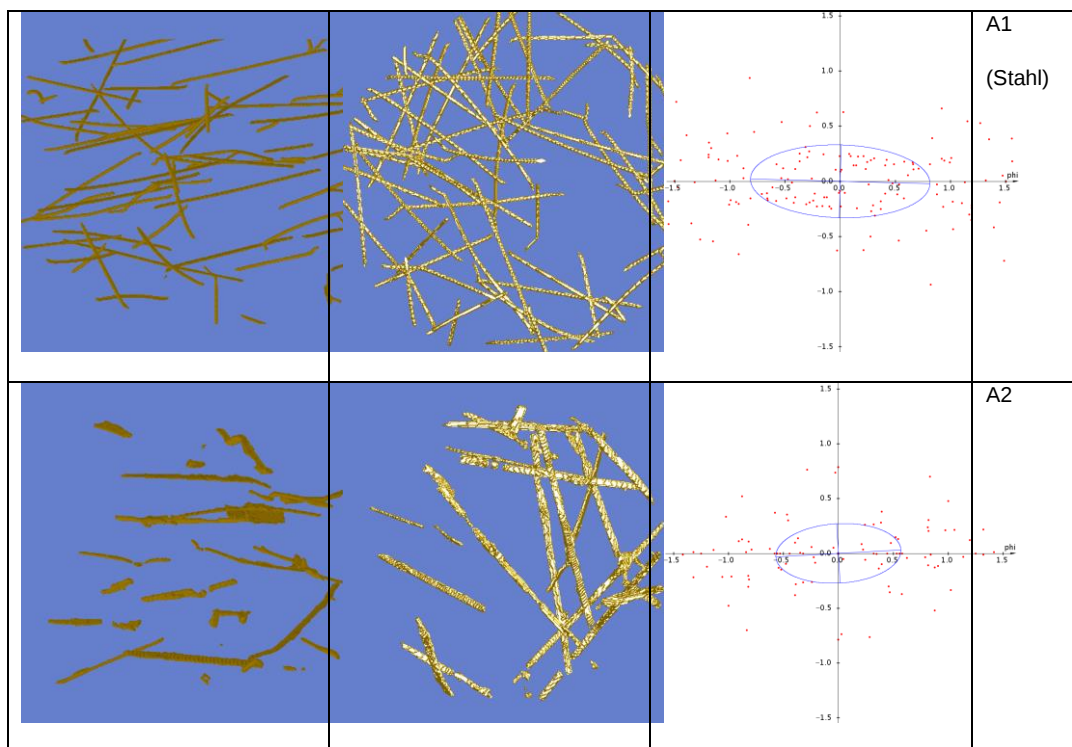


Abb.36 Mittels Röntgencomputertomographie ermittelte Faserverteilung im Bohrkernabschnitt der Lage 1 (gleich bei der Applikationsfläche). Links: Seitenansicht, Mitte: von oben, Rechts: räumliche Verteilung der Einzelfasern



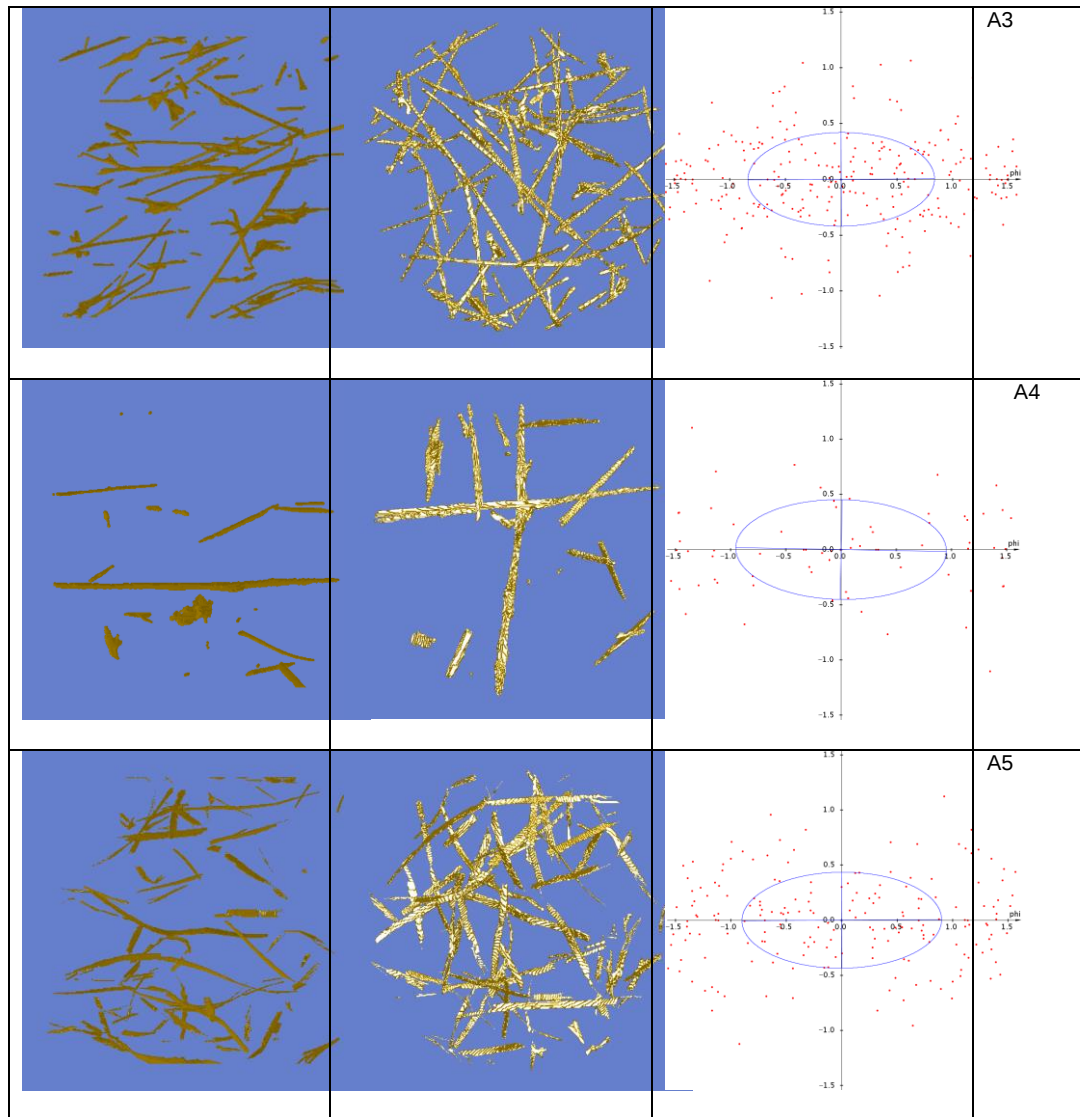


Abb.37 Mittels Röntgencomputertomographie ermittelte Faserverteilung im Bohrkernabschnitt der Lage 2 (Abstand 50 mm von der Applikationsfläche). Links: Seitenansicht, Mitte: von oben, Rechts: räumliche Verteilung der Einzelfasern

Tab. 5 Mittelwerte der Raumkoordinaten der einzelnen Fasern und der Streuellipse

	A1-1	A1-2	A2-1	A2-2	A3-1	A3-2	A4-1	A4-2	A5-1	A5-2
Mittel x	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mittel y	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
sigmax	0.70	0.81	0.86	0.57	0.80	0.84	0.90	0.95	0.84	0.72
sigmay	0.32	0.33	0.24	0.27	0.40	0.42	0.31	0.45	0.32	0.35
Ellipse Achse a	0.70	0.81	0.86	0.57	0.80	0.84	0.90	0.95	0.85	0.72
Ellipse Achse b	0.31	0.33	0.24	0.27	0.40	0.42	0.30	0.45	0.30	0.34
alpha [°] *)	8.07	-1.60	0.48	3.24	4.84	0.39	1.85	-1.01	6.69	-6.05
Achsenverhältnis Streuellipse	0.44	0.41	0.28	0.48	0.50	0.50	0.34	0.47	0.36	0.47

*) alpha = Winkel Hauptachse der Streuellipse zur Koordinatenachse

5.5 Fazit Untersuchung Spritzverhalten

Die ausgeführten Untersuchungen zeigen eine Vielzahl von Einflussparametern auf den Spritzprozess und die Eigenschaften des Betons.

Die in der Literatur vielfach genannten optimalen Parameterkombinationen von Düsenabstand und Förderluftmenge bestätigen sich. Ein nicht optimaler Düsenabstand kann nicht durch die Anpassung der Förderluftmenge kompensiert werden.

Abweichungen von den Idealwerten führen nicht immer zu signifikanten Abweichungen bei den Festigkeitswerten des Spritzbetons. Insbesondere bei niedrigen Beschleunigerdosierungen und damit relativ langsamen Reaktionsverhalten des Spritzbetons sind die Auswirkungen auf die Festigkeiten gering.

Es zeigt sich jedoch, dass nur geringe Veränderungen am Spritzprozess – hier die Erhöhung der Beschleunigerdosierung von 6 % auf 9 % - die Sensibilität des Spritzvorganges deutlich steigern. Die Erhöhung der Beschleunigerdosierung führt zu einer schnelleren Reaktion des Spritzbetons, die sich augenscheinlich in deutlich niedrigen Festigkeiten manifestiert, wenn der Spritzbeton nicht unter idealen Randbedingungen appliziert wird.

Auf Grund der ausgeführten Untersuchungen können keine Rückschlüsse gezogen werden, die für die Applikation von Kunststofffasern grundsätzlich andere Applikationsgrundsätze empfehlen lassen als für Stahlfasern.

Bei den Kunststofffasern wird eine Tendenz zur Ausrichtung senkrecht zur Spritzrichtung festgestellt. Dies ist im Regelfall als positiv zu beurteilen, da die Fasern bei einer Orientierung senkrecht zur Spritzrichtung in der Ebene liegen in der die Lasten aufgenommen werden. Dies wirkt sich in der Praxis in einem grösseren Energieabsorptionsvermögen aus, als es bei einer völlig zufälligen Faserorientierung zu erwarten wäre. Für die Anwendung ist das effektiv erreichte Arbeitsvermögen an Spritzbetonproben zur Beurteilung massgeblich.

Der Faserrückprall wird hauptsächlich vom Gesamtrückprall dominiert, evtl. individuelle Besonderheiten einzelner Fasern werden davon nach bisherigen Erkenntnissen 'überdeckt'. Massnahmen, die zur Reduzierung des Gesamtrückpralls angewendet werden beeinflussen in gleicher Weise auch den Faserrückprall.

6 Dauerlastverhalten

6.1 Prüfergebnisse

6.1.1 Plattenprüfung

Abbildung 7 zeigt die relevanten Lasten in kN, welche bei der Vordeformation der Versuchsplatten der ersten Versuchskampagne aufgezeichnet wurden.

Die Erstbruchlast der Platten beschreibt im Wesentlichen das Verhalten des Betons. Es wurden Werte zwischen 50 und 80 kN registriert, ohne dass dabei eine klare Tendenz zu erkennen ist. Der Vergleich der aufgenommenen Maximallast mit der Erstbruchlast zeigt die Fähigkeit der Spritzbetonscheibe Lasten im ungebrochenen und im gebrochenen Zustand aufzunehmen. Für die Prüfkörper, die bereits in der Erstbruchlast ihre Maximallast erreicht hatten, führte die Lastaufnahme der Fasern im gebrochenen Zustand lediglich zur Verzögerung des Versagens der Spritzbetonscheibe und über die Deformation zur Energieabsorption. Für die Prüfkörper deren maximallast die Erstbruchlast überstieg, führte das aktivieren der Fasern neben der Aufnahme von Deformation zusätzlich zu einer Steigerung der aufnehmbaren Biegebeanspruchung. Beide Ausprägungen der Maximallast sind für alle Fasertypen zu beobachten.

Bruchlast, Maximallast, residuelle Lasten der Vorbelastung

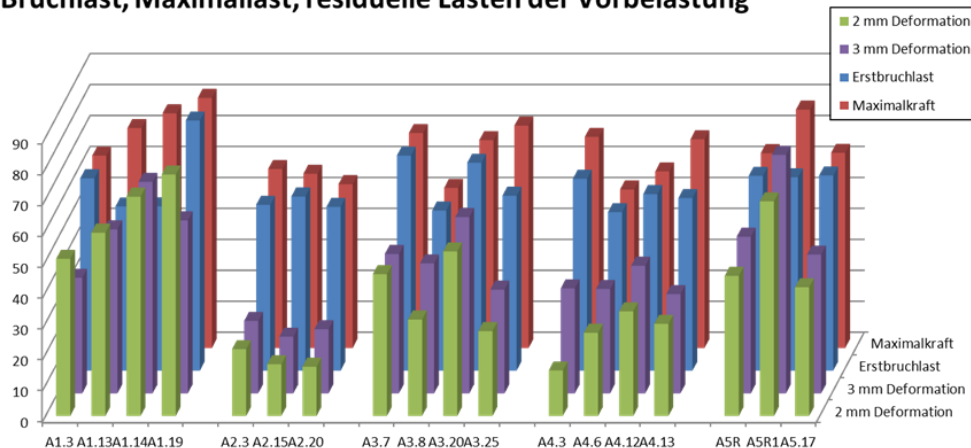


Abb.38 Maximallast, Erstbruchlast und residuelle Lasten bei 2 und 3 mm Deformation für die erste Prüferie

Für Deformationen von zwei und drei mm ist zu beobachten, dass Prüfkörper mit Stahlfasern für die größere Deformation von 3 mm weniger Last aufnehmen als bei 2 mm Deformation, während alle Kunststofffasern umgekehrtes Verhalten zeigten.

Im Vergleich der absoluten Werte der aufgenommenen Lasten treten deutliche Unterschiede zwischen dem Tragverhalten der betrachteten Kunststofffasern auf. Im direkten Vergleich sind auch die aufgenommenen Lasten der Stahlfaserbeton-Referenzplatten etwas höher, jedoch ist auch das Arbeitsvermögen dieser Prüfkörper höher als das der Kunststofffaserspritzbeton Varianten, weshalb der direkte Vergleich schwierig ist.

Für die Bewertung des Langzeitverhaltens unter statischer Beanspruchung sind die Werte aus Abbildung 7 jedoch nur bedingt relevant, da sie lediglich im Kurzzeittest mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 1 mm/min ermittelt wurden. Es kann beobachtet werden, dass bei einer Deformation von 3 mm alle Hauptrisse in der Platte bereits ausgebildet sind und der Wert der residuellen Last bei 3 mm Deformation wird als

Eingangsgröße für die nachfolgende statische Belastung benötigt.

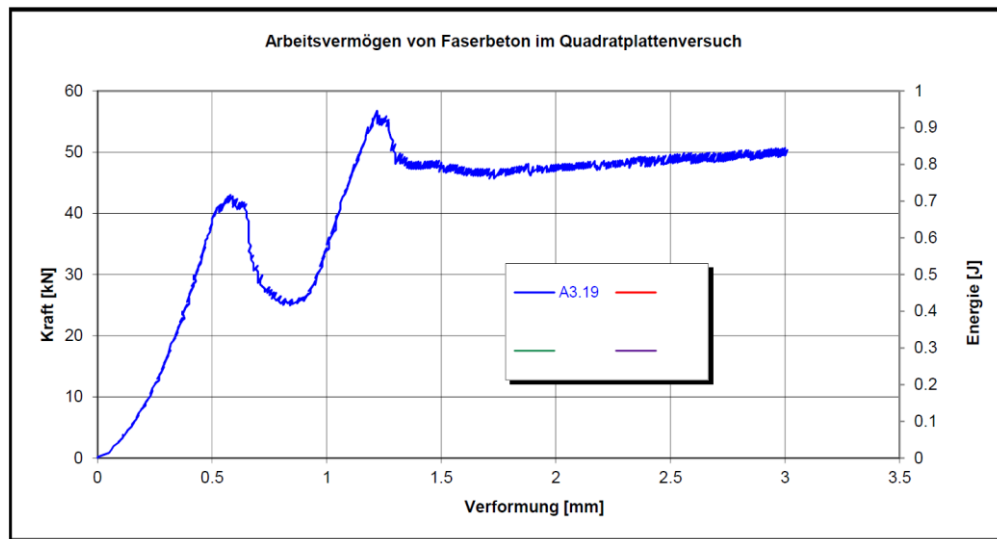


Abb.39 Kraft -Verformungsverlauf der Vorbelastung für Versuchsplatte A3.19

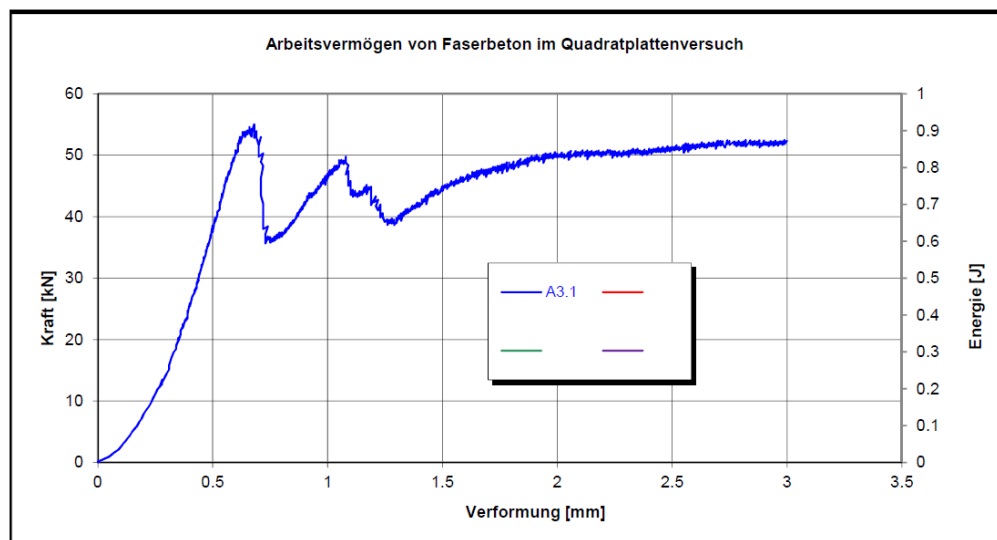


Abb.40 Kraft-Verformungsverlauf der Vorbelastung für Versuchsplatte A3.1

Aufgrund der unidirektionalen Lastausbreitung in den Faserspritzbetonplatten kann die Rissausbildung in gleichermassen hergestellten Platten, verursacht durch kleine Unregelmässigkeiten im Gefüge voneinander verschieden erfolgen. In der Regel traten während der Versuche zum Projekt 4 oder 5 Hauptrisse auf. Die Abbildungen 8 bis 13 zeigen Beispiele für unterschiedliche Rissausbildungen. Plötzlicher Einbruch der aufgenommenen Last bei mehr oder minder gleichbleibender Verformung zeigt darin die Ausbildung eines Risses im spröden Material Beton an, während das Versagen der Fasern durch geringere Neigungen der Kurve geprägt ist.

Für die Platten A3.1 und A3.19 waren bei einer Deformation von 1.5 mm bereits alle Hauptrisse ausgeprägt, während weitere Verformung der Platte A3.6 auf 2 mm zur erneuten Rissbildung führte.

Die Probekörper der Versuchsserie A4 erfuhren regelmässig weitere Rissbildung zwischen 2.0 und 2.5 mm Deformation oder am Beispiel der Platte A4.8 sogar noch darüber hinaus.

Aufgrund der unidirektionalen Lastausbreitung in den Faserspritzbetonplatten kann die Rissausbildung in gleichermassen hergestellten Platten, verursacht durch kleine Unregelmässigkeiten im Gefüge voneinander verschieden erfolgen. In der Regel traten während der Versuche zum Projekt 4 oder 5 Hauptrisse auf. Die Abbildungen 8 bis 13 zeigen Beispiele für unterschiedliche Rissausbildungen. Plötzlicher Einbruch der aufgenommenen Last bei mehr oder minder gleichbleibender Verformung zeigt darin die Ausbildung eines Risses im spröden Material Beton an, während das Versagen der Fasern durch geringere Neigungen der Kurve geprägt ist.

Für die Platten A3.1 und A3.19 waren bei einer Deformation von 1.5 mm bereits alle Hauptrisse ausgeprägt, während weitere Verformung der Platte A3.6 auf 2 mm zur erneuten Rissbildung führte.

Die Probekörper der Versuchsserie A4 erfuhren regelmässig weitere Rissbildung zwischen 2.0 und 2.5 mm Deformation oder am Beispiel der Platte A4.8 sogar noch darüber hinaus.

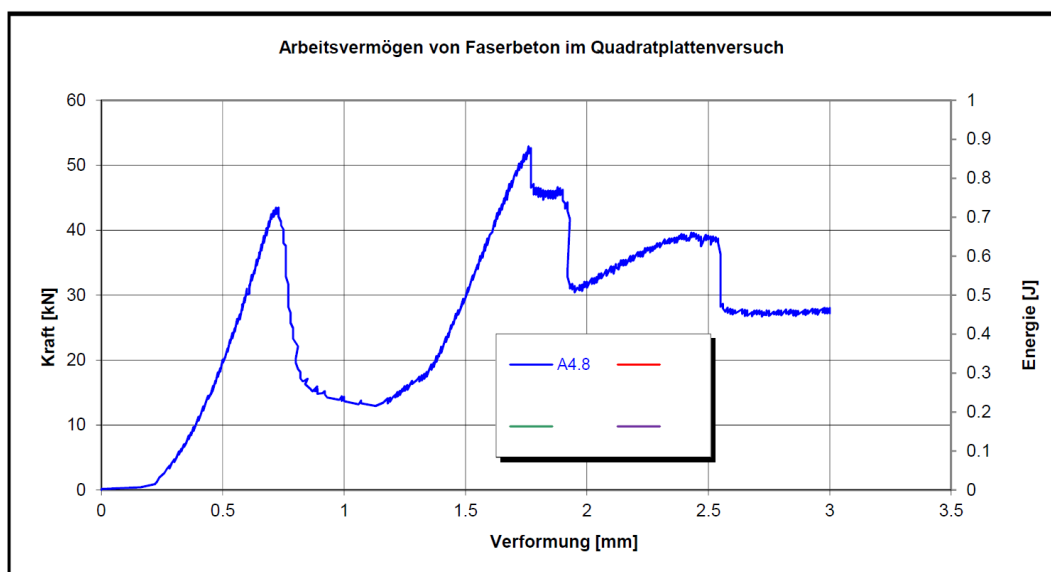


Abb.41 Kraft-Verformungsverlauf der Vorbelastung für Versuchsplatte A4.8

Um sicher zu stellen, dass alle Hauptrisse am Beginn der Kriechprüfung vorhanden sind und damit realitätsnahe Bedingungen vorherrschen erscheint die Vordeformation der Platten auf 3 mm sinnvoll und wurde für all Probekörper im Projekt umgesetzt.

Die Abb.42 bis Abb.47 zeigen das Kriechverhalten der bis zu einer Deformation von 3 mm vorgebrochenen Faser-Spritzbetonplatten. Wie in der Legende angegeben wurden die Platten zunächst mit einer statischen Last von 50 % ihrer residuellen Festigkeit bei 3 mm Deformation belastet.

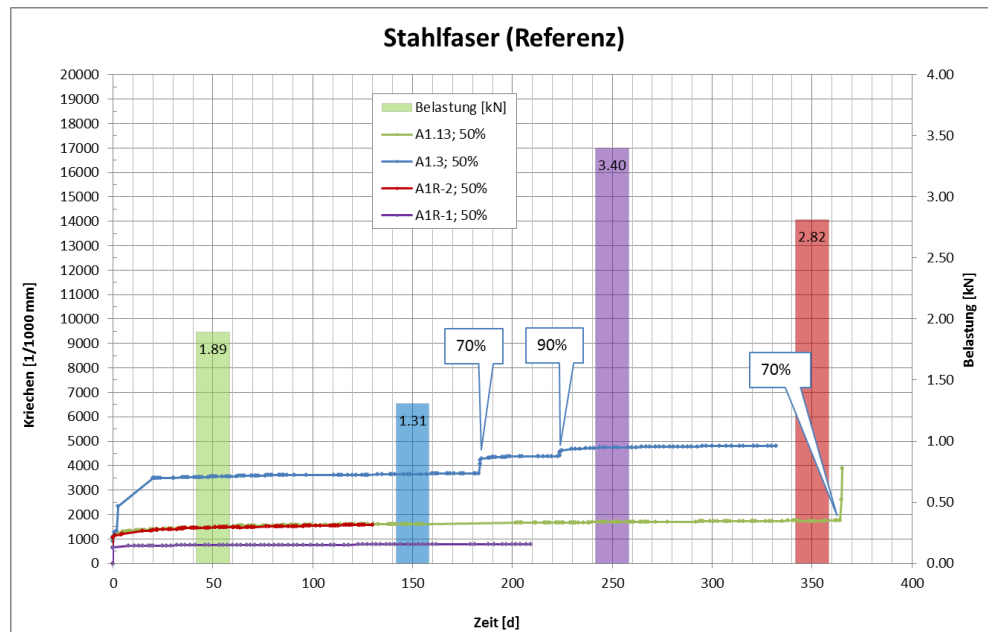


Abb.42 Kriechverformung der Referenz- Stahlfaserbetonplatten und aufgebrachtes Lastniveau

In Abb.42 ist der Verformungsverlauf der Platten mit Stahlfaserspritzbeton dargestellt.



Abb.43 Faser 1 mit Rissverlauf ausserhalb der eingesägten Kreuznut

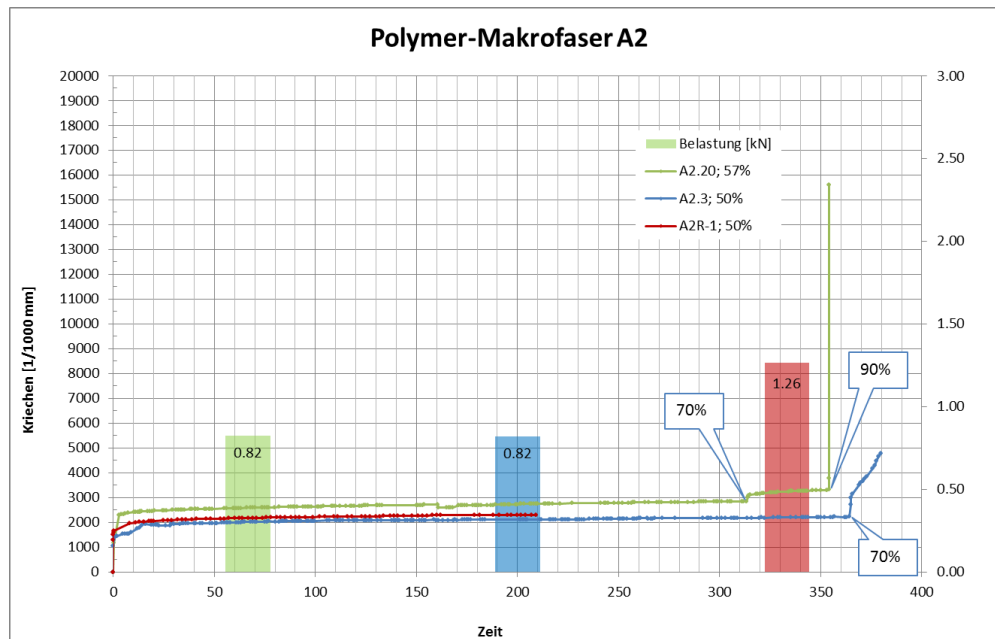


Abb. 44 Kriechverformung und aufgebrachtes Lastniveau von Faserbetonplatten; Faser 2

Die mit Faser 2 hergestellten Platten wiesen vergleichsweise geringe residuelle Festigkeiten bei 2 und 3 mm Deformation auf, weshalb sie mit nur recht geringen Lasten beansprucht wurden. Diesen geringen Belastungen hielten Sie über eine Versuchsdauer von einem Jahr ohne starke Kriechverformung stand. Die Laststeigerung auf 79 bzw. auf 90 % führte das Versagen herbei.

Die Platte A2R-1 (Herstellung durch Giessen) wurde mit einer Kreuznut versehen. Bis zum Ende der Projektlaufzeit (210 Tage Prüfdauer) kam es kaum zu Kriecherscheinungen.

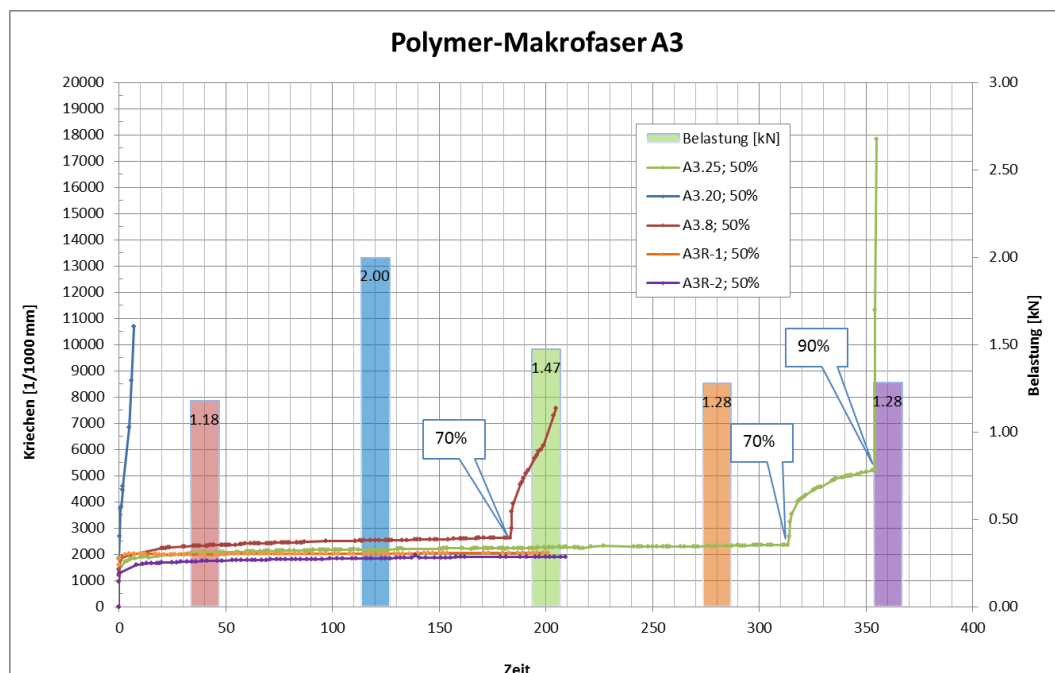


Abb. 45 Kriechverformung und aufgebrachtes Lastniveau von Faserbetonplatten; Faser 3

Mit Ausnahme des Prüfkörpers A3.20, welcher innerhalb weniger Tage versagte, zeigten all Platten sehr gute Kriechstabilität bei 50 % Lastniveau. Erst die Erhöhung des

Lastniveaus auf 70 % bzw. 90 % der residuellen Last bei 3 mm Deformation führte zum Versagen der Platten.

Die Prüfkörper A3R-1 und A3R-2 waren gegossene Platten mit nachträglich eingesägter Kreuznut. Sie widerstanden der Belastung mit sehr geringer Kriechdeformation bis zum Projektende.

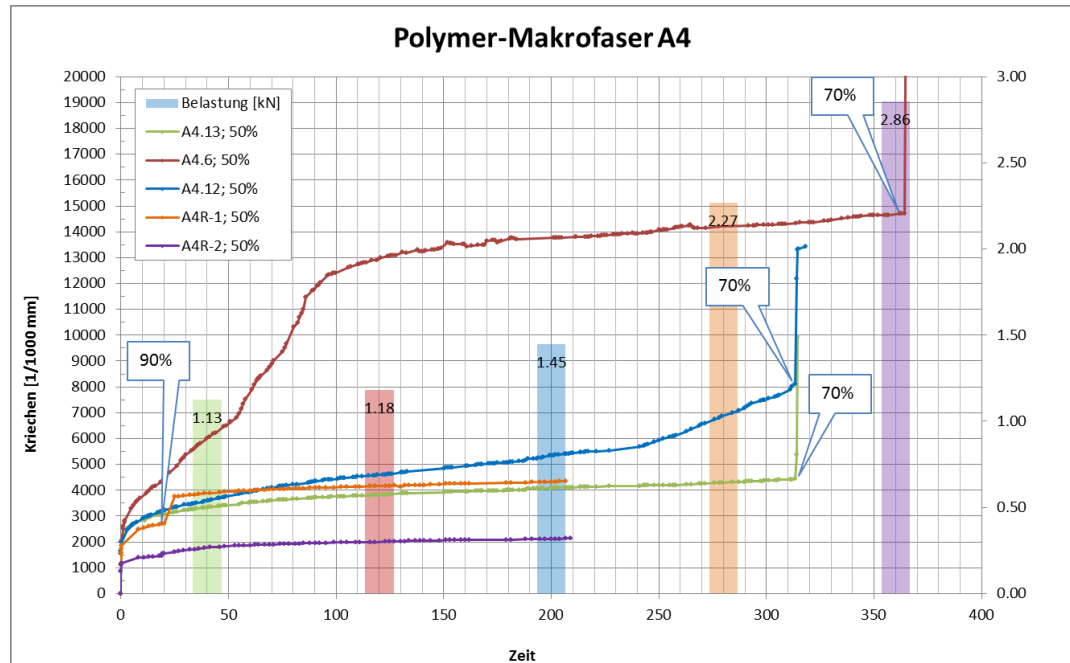


Abb.46 Kriechverformung und aufgebrachtes Lastniveau von Faserbetonplatten; Faser 4 (R-gegossene Platte)

Die mit Polymerfaser 4 hergestellten Platten wiesen recht große Kriechverformungen auf, Widerstanden dem 50 % Lastniveau jedoch bis zu einem Jahr. Erst die Lasterhöhung auf 70 bzw. 90 % verursachte vollständiges versagen.

Die gegossenen Platten A4R-1 und A4R-2 mit eingesägter Kreuznut widerstanden Belastungen von 50 bzw. 90 % mit leichter Kriechdeformation bis zum Projektende und einer Prüfdauer von 210 Tagen.

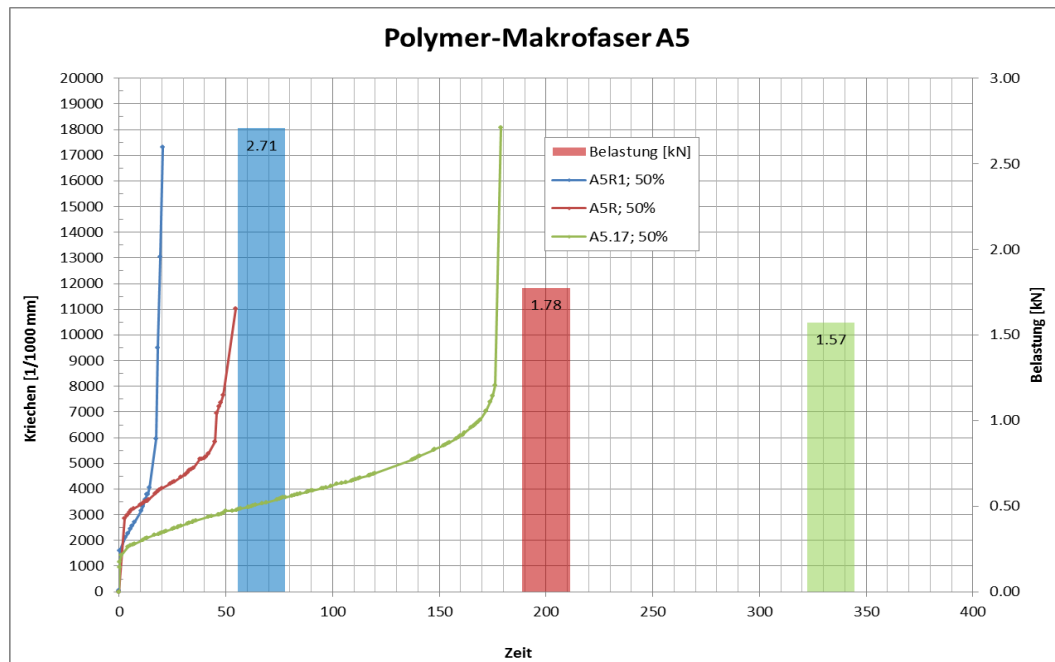


Abb.47 Kriechverformung von Faserbetonplatten der Faser 5 und aufgebracht Lastniveau

Die Prüfkörper mit Polymerfaser 5 wurden aufgrund ihrer Vorbelastungscharakteristik mit vergleichsweise hohen Lasten beansprucht. Dies führte zu starken Verformungen und dem Versagen auf dem 50 % Lastniveau nach 20, 50 und 170 Tagen.

6.1.2 Biegebalken

Die Untersuchungen erfolgten in gerissenem Zustand. Zur Risserzeugung wurden die Biegebalken bis zu einer Rissweitenöffnung (CMOD2, EN 14651) von 1.5 mm (EN14651: $\delta_{L2} = 1.32$ mm) belastet. Die dabei ermittelten residuellen Festigkeiten $f_{R,2}$ der für die Kriechversuche an Biegebalken verwendeten Balken sind in Tab. 6 aufgelistet. Daraus abgeleitet wurde die zu wählende Last in den Dauerbelastungsversuchen.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen der mechanischen Prüfungen im Rahmen der Quadratplattenversuche zeigen sich bei den ermittelten Messwerten ($f_{R,2}$) in den Balkenversuchen relativ grosse Streuungen. Diese Streuungen sind einerseits auf inhomogene Faserverteilung, grosse Lunkeranzahl und vermutlich die durch die Einkerbung vorgegebene Bruchebene begründet. Zudem erfolgt der Bruch in diesem Versuch relativ abrupt, was insbesondere bei den empfindlicheren Kunststofffasern zu einer tendenziellen Überlastung und Faserriss in dieser Bruchphase führen könnte.

Tab. 6 Prüfkörperauswahl und Belastungsniveaus

	Festigkeit $f_{R,2}$ [Mpa]		Belastung theoret.		Belastung effektiv		
	[N/mm ²]	[%]	[N/mm ²]	[kN]	[%]	[N/mm ²]	[kN]
A1	1.2	90	1.08	3.38	90.5	1.09	3.39
A1	1.7	70	1.19	3.72	69.5	1.18	3.69
A1	2	50	0.99	3.09	49.5	0.99	3.09
A2	1.2	90	0.99	3.09	90	0.99	3.09
A2	0.8	70	0.56	1.75	70	0.56	1.75
A3	1.2	90	1.08	3.38	90.5	1.09	3.39
A3	1.6	70	1.12	3.50	73.3	1.17	3.66

A3	1.6	70	1.1	3.44	67.9	1.09	3.39
A3	1.4	50	0.7	2.19	46.9	0.66	2.05
A4	1.3	90	1.17	3.66	90.9	1.18	3.69
A4	1.5	70	1.05	3.28	71.7	1.08	3.36
A5	1.1	90	0.99	3.09	90.0	0.99	3.09
A5	1.4	70	0.98	3.06	70.0	0.98	3.06

In Abb.48 sind die im Laufe der Zeit infolge von Kriechen sich ergebenden Zusatzverformungen bei den gewählten Belastungsniveaus wiedergegeben. Es wird dabei die Differenz aus der Rissweitenöffnung zur Zeit t (CMOD $_t$) und der Rissweitenöffnung nach 1 d Belastung des Prüfkörpers (CMOD $_1d$) aufgetragen, da die Rissweitenöffnung CMOD $_0$ je nach Fasertyp einer gewissen Elastizität unterworfen ist. Eine anderweitige Wahl des Basiswertes hat sich dabei nicht als bessere Lösung herausgestellt.

Bei der höchsten Belastungsstufe von 90 % waren zwei Fasertypen instabil. Die Instabilität trat innerhalb sehr kurzer Zeit nach der Belastung auf. Dieses Resultat beruht aber nur auf den Beobachtungen an einem Balken und darf in Anbetracht der Streuung der residuellen Lasten nicht verallgemeinert werden. Durch die starken Streuungen besteht nach der Wahl des Belastungsniveaus eine gewisse Gefahr der Überschätzung der verbleibenden Rest-Tragfähigkeit, dies insbesondere bei sehr hohen Belastungsniveaus von 90 % und bei grossen Lasten. Die geometrisch eher flacheren Faservarianten scheinen sich besser zu stabilisieren. Dies ist eventuell durch eine geringere Querkontraktion begünstigt. Dasselbe gilt wohl auch bei dünneren Fasern.

Bei Belastungsniveaus von 70 % und darunter sind alle Fasertypen in den Dauerlastversuchen stabil. Generell ist anzumerken, dass in diesem Versuchsprogramm nur relativ hochmodulige Fasern untersucht wurden und die erzielten Resultate nicht auf niedermodulige Fasertypen verallgemeinert werden dürfen.

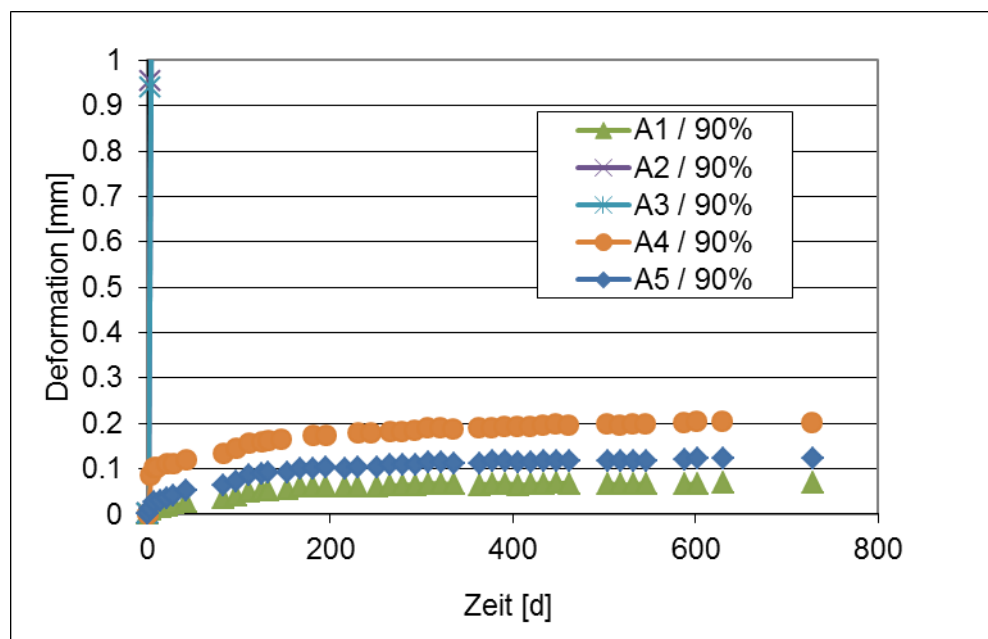


Abb.48 Kriechverhalten von Balken bei einer Dauerlast von 90 % der residuellen Last

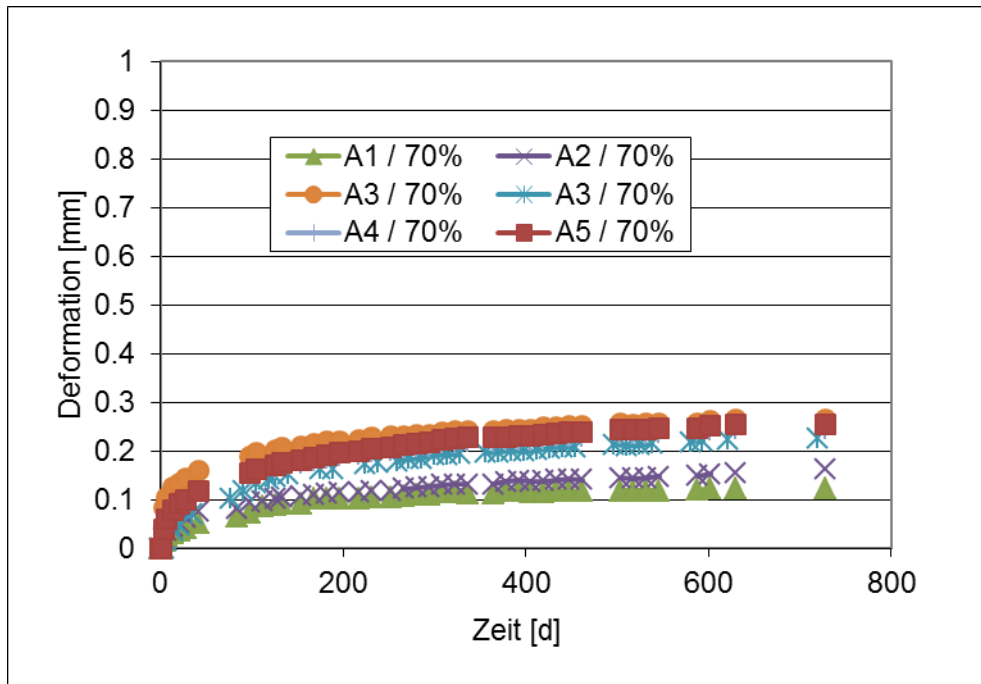


Abb.49 Kriechverhalten von Balken bei einer Dauerlast von 70 % der residuellen Last

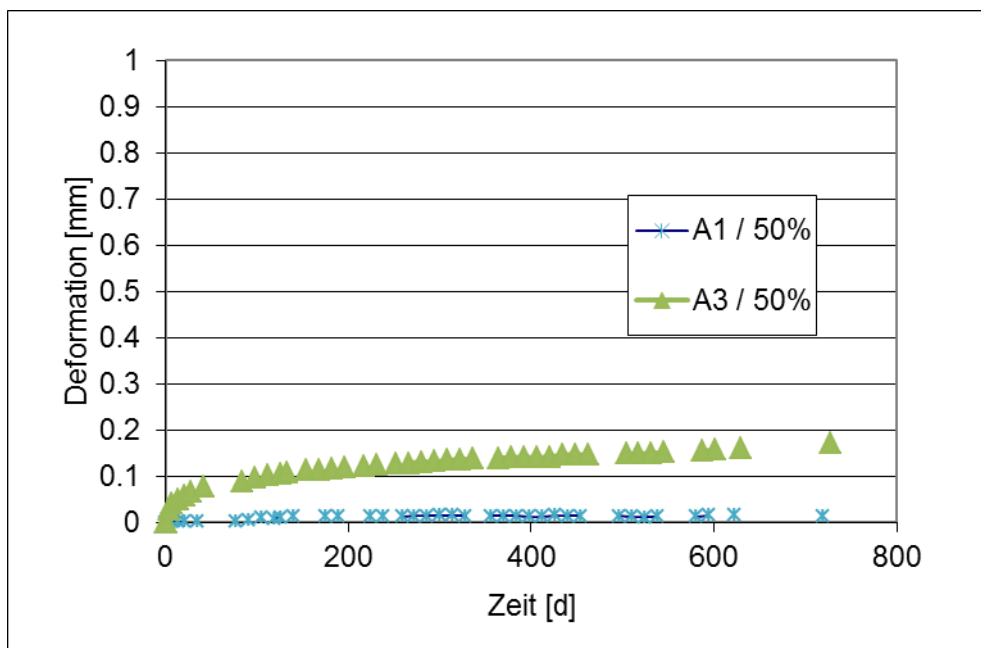


Abb.50 Kriechverhalten von Balken bei einer Dauerlast von 50 % der residuellen Last

7 Chemische Beständigkeit

7.1 Rissweiten nach Rissinduktion

Nach der Rissinduktion wurden die entstandenen Rissweiten genau vermessen (Tab. 7). Dabei wurde einerseits die Rissbreite in Plattenmitte, andererseits die Breite der verschiedenen Risse im Abstand von 15 cm von der Plattenmitte ausgemessen. Die Rissbreiten bei 15 cm wurden auch als Summe aufaddiert. Angegeben sind jeweils die Mittelwerte von 5 Quadratplatten. Des Weiteren ist die mittlere Anzahl der Risse angegeben.

Bei den Quadratplatten mit der Referenzfaser (Stahlfaser) ergaben sich im unterbrochenen Quadratplattenversuch (Durchbiegung bis 3 mm) tendenziell mehr Risse als bei den Kunststoffvarianten. Eine grössere Rissanzahl ist hinsichtlich der Spritzbetonqualität als positiv zu werten. Am wenigsten Risse wurden mit Fasertyp A2 gefunden. Gleichzeitig war hier die Rissbreite erhöht. Mit den Fasertypen A3 bis A5 ergaben sich ähnliche Rissanzahlen und –breiten, im Vergleich zur Referenzfaser aus Stahl (A1) wiesen diese Quadratplatten eine etwas geringere Rissanzahl, erstaunlicherweise gleichzeitig aber eine tendenziell geringere Riss-Summe auf. Dies lässt sich teilweise mit der grösseren Elastizität der Kunststofffasern begründen.

Tab. 7 Rissbreiten in mm nach der Rissinduktion

Lage		Fasertyp				
	Nr.	A1	A2	A3	A4	A5
Riss Mitte	0	1.45±0.06	1.78±0.22	1.38±0.08	1.36±0.27	1.24±0.09
Risse 15 cm	1	0.85	1.40	0.90	0.94	0.78
	2	0.70	1.36	0.86	0.60	0.72
	3	0.93	1.10	0.84	0.90	0.88
	4	0.68	1.24	0.88	0.58	1.00
	5	0.90	0.80	0.80	0.60	0.67
	6	0.55				
Mittlere Riss-Summe		4.33±0.25	5.26±0.61	4.12±0.49	3.50±0.74	3.78±0.29
Anzahl Risse		5.0±0.6	4.2±0.4	4.8±0.4	4.8±0.4	4.6±0.5

7.2 Residuelle Festigkeiten

Nach einjähriger Belastung wurde die residuelle mechanische Tragfähigkeit der Quadratplatten nach SIA 162/6 ermittelt.

Im Folgenden sind für jeden Fasertyp jeweils die Last-Wegdiagramme bei a) natürlicher Bewitterung b) Tausalzbeanspruchung c) Sulfatbeanspruchung d) Säurebeanspruchung

(tiefe pH) wiedergegeben. Dabei ist jeweils die bei der Rissinduktion ermittelte Last-Deformationskurve (blaue Kurve bis 3 mm Deformation) und die residuelle Last-Deformationskurve nach der einjährigen Beanspruchung aufgetragen. In den dazugehörigen Tabellen sind die gemessenen Lastmaxima und die Last bei maximaler Deformation bei der Rissinduktion, die maximale Last bei Deformationen kleiner als 3 mm nach einjähriger Beanspruchung und die abgeleiteten residuellen mechanischen Eigenschaften aufgelistet.

Für die Last-Deformationskurven der Rissinduktion (blaue Kurve bis 3 mm Durchbiegung) ergibt sich eine relativ geringe Streuung innerhalb des gleichen Fasertyps. Auffällig ist bei Fasertyp A4 der starke Festigkeitsabfall gleich nach dem ersten Bruch mit anschließender Erholung der Tragfähigkeit. Dies könnte evtl. auf ein geringeres Elastizitätsmodul oder ungenügenden Faserverbund bei der ersten Rissbildung zurückgeführt werden.

Bei der Referenzfaser aus Stahl ergibt sich bereits nach einjähriger Belastung eine teilweise starke Reduktion sowohl der erreichten Maximallast als auch betreffend der mechanischen Kennwerte im Vergleich zu nicht belasteten Referenzplatten. Die Maximallasten bei Rissinduktion werden nach der Lagerung nicht mehr erreicht. Besonders stark sind die Verluste im Tragverhalten bei Tausalz- und Säurebelastung. Selbst eine freie Bewitterung (keine Salze) führte zu einem Abfall der Bruchenergie im Vergleich zu Referenzproben [2].

Bei den Kunststofffasertypen konnte weder ein systematischer Abfall der Maximallasten nach der Beanspruchung im Vergleich zur Rissinduktion, noch ein Abfall der residuellen mechanischen Kennwerte nach einjähriger Belastung im Vergleich zu Referenzplatten [2] festgestellt werden.

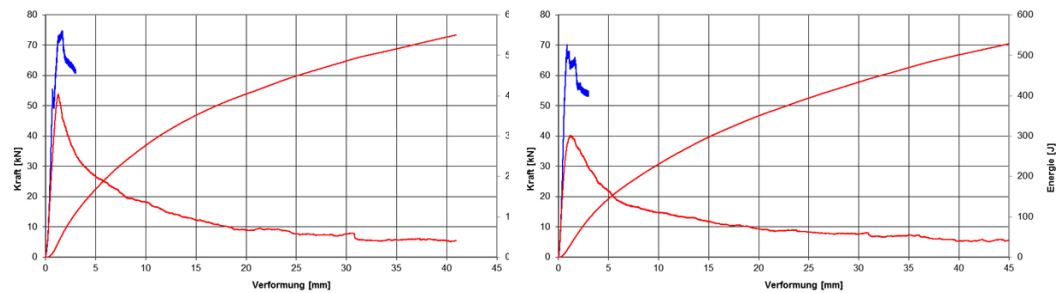
Einzig im Falle der Belastung mit Säure ergeben sich Hinweise auf eine etwas reduzierte residuelle Tragfähigkeit beim Vergleich der maximalen residuellen Traglasten mit den Maximallasten bei der Rissinduktion). Hier kann eine gewisse Schädigung des Spritzbetons oder zumindest des Interfaces zwischen Fasern und Spritzbeton in Rissnähe nicht ganz ausgeschlossen werden.

Tendenziell ergibt sich bei den meisten Kunststofffasertypen mit höherem Probenalter und der damit verbundenen Verbesserung des Faser-Spritzbetoninterfaces (Nachhydratation) ansonsten ein verbessertes Tragverhalten mit höheren Bruchenergien. Eine Ausnahme bildet der Fasertyp A2. Eventuell wird hier durch die Nachhydratation der Faserverbund zu stark, so dass die Fasern der mechanischen Beanspruchung nicht mehr standhalten und reißen, anstatt ausgezogen zu werden. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage nach der effektiven Zugfestigkeit dieses Fasertyps.

Im ungerissenen Spritzbeton mit Stahlfasern (Vergleich Referenz 1 mit Prüfkörper Alter 28d) ist keine reine Altersabhängigkeit weder des Lastmaximums noch der Bruchenergie erkennbar. In der Literatur finden sich dazu aber durchaus auch anderslautende Aussagen [ref].

Natürliche Bewitterung

3% NaCl

4g/l Na_2SO_4

2%-ige Schwefelsäure

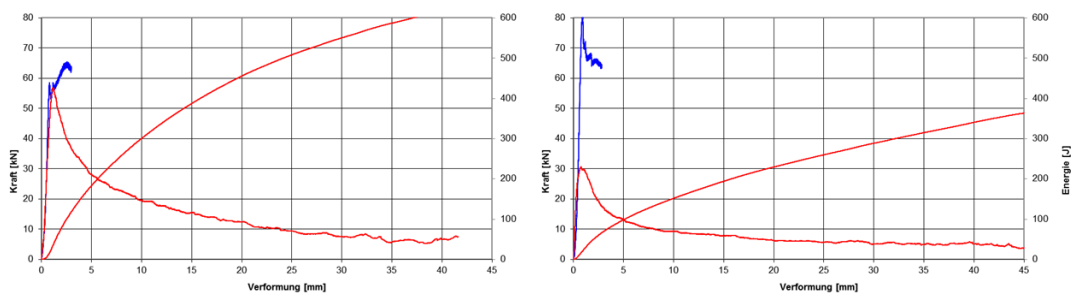


Abb.51 Last-Dehnungskurven vor/nach der Beständigkeitsprüfung von Spritzbeton A1 (Referenz Stahlfasern)

Tab. 8 Resultatzusammenstellung vor/nach der Beständigkeitsprüfung von Spritzbeton A1 (Referenz Stahlfasern)

	Alter	Vor Beanspruchung		Nach Beanspruchung / resp. Referenz (ohne Beanspruchung)			
		Last		Last	f_{ctf}	G_f	
		maximal	bei 3 mm	maximal bei 0.3 mm			
	[d]	[kN]	[kN]	[kN]	[N/mm ²]	[N/m]	[J]
Referenz 1	109	77.2	60.4	-	0.68	5999	831
Referenz 2	521	75.2	65.71	-	0.65	6056	789
Lagerung 1	522	65.5	60.5	58.5	0.50	4574	590
Lagerung 2	527	74.9	60.8	53.8	0.42	3495	449
Lagerung 3	528	70.1	53.2	40.3	0.29	3375	394
Lagerung 4	529	65.5	63.9	56.9	0.48	4212	508
Lagerung 5	532	82.7	64.5	30.8	0.22	1892	260

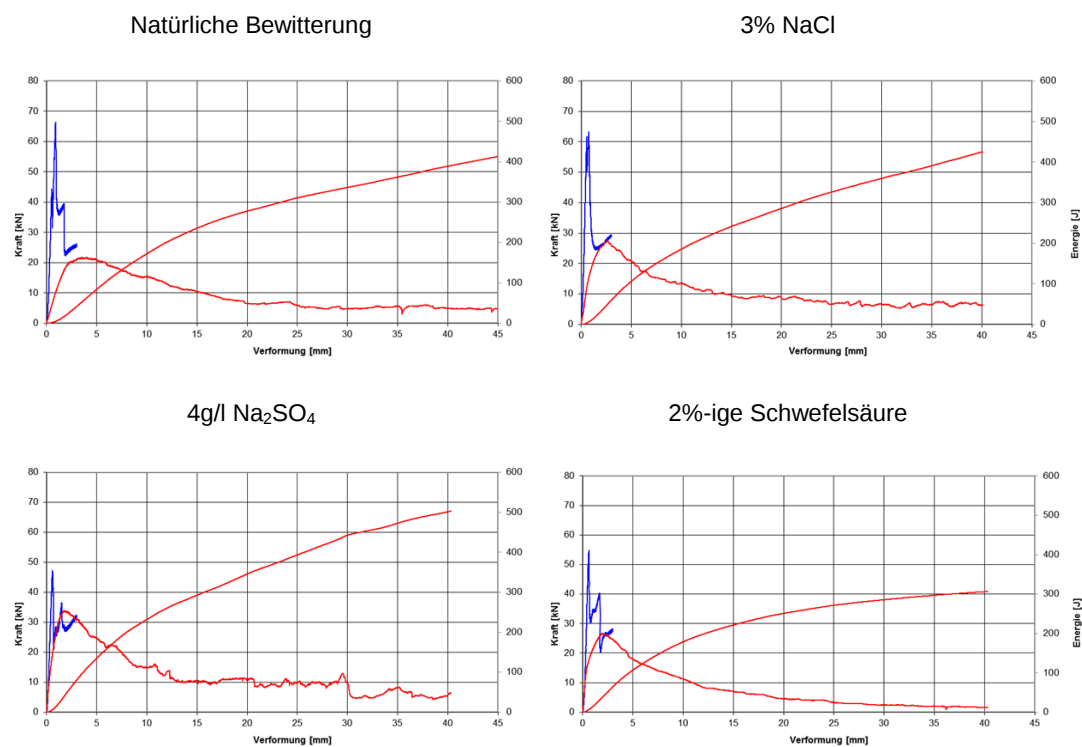


Abb.52 Last-Dehnungskurven vor/nach der Beständigkeitsprüfung von Spritzbeton A2

Tab. 9 Resultatzusammenstellung vor/nach der Beständigkeitsprüfung von Spritzbeton A2

	Alter	Vor Beanspruchung		Nach Beanspruchung / resp. Referenz (ohne Beanspruchung)		
		Last		Last	f_{ctf}	G_f
		maximal	bei 3 mm	maximal bei 0..3 mm		E_{EFNARC}
	[d]	[kN]	[kN]	[kN]	[N/mm ²]	[N/m]
Referenz 1	107	55.8	33.3	-	0.41	5999
Referenz 2	519	51.6	33.3	-	0.34	6056
Lagerung 1	520	58.4	37.1	33.7	0.28	3054
Lagerung 2	525	66.5	26.2	21.1	0.24	2528
Lagerung 3	526	63.3	28.9	27.4	0.24	2562
Lagerung 4	527	47.3	32.4	33.9	0.32	3320
Lagerung 5	530	54.9	28.3	26.8	0.26	2264

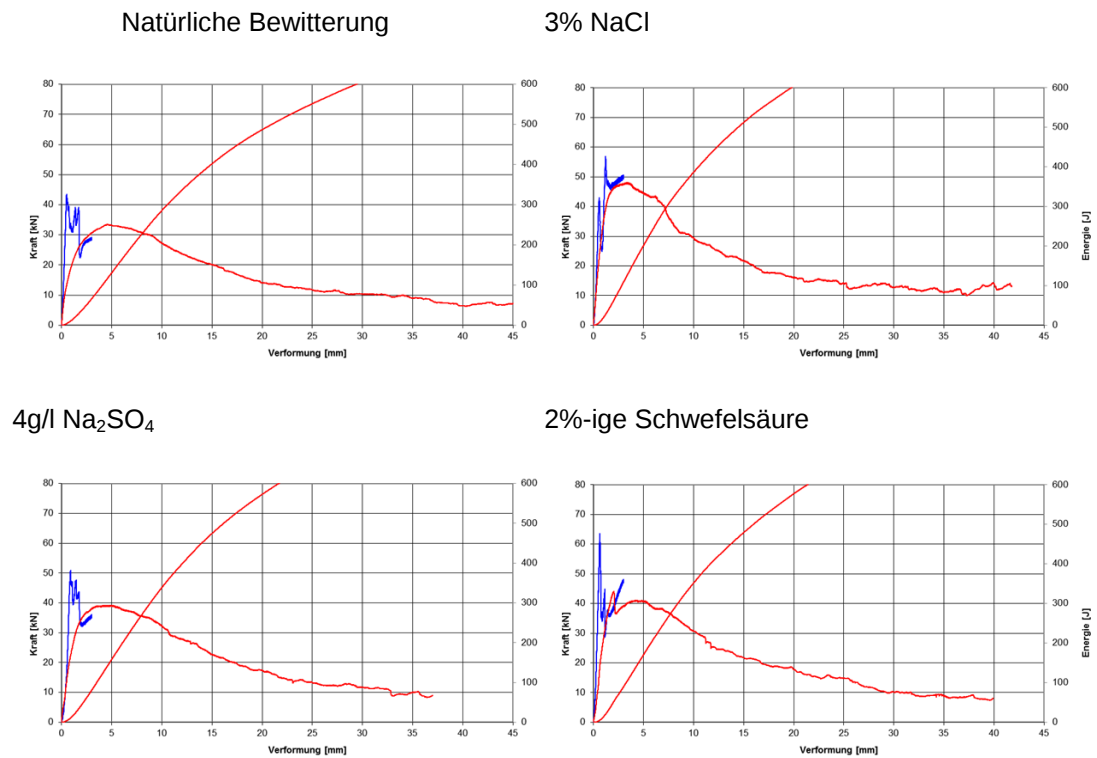


Abb.53 Last -Dehnungskurven vor/nach der Beständigkeitsprüfung von Spritzbeton A3

Tab. 10 Resultatzusammenstellung vor/nach der Beständigkeitsprüfung von Spritzbeton A3

	Alter	Vor Beanspruchung		Nach Beanspruchung / resp. Referenz (ohne Beanspruchung)			
		Last		Last	f_{ctf}	G_f	E_{EFNARC}
		maximal	bei 3 mm	maximal bei 0..3 mm			
	[d]	[kN]	[kN]	[kN]	[N/mm ²]	[N/m]	[J]
Referenz 1	105	53.3	49.9	-	0.50	6029	712
Referenz 2	517	51.3	49.9	-	0.48	5782	660
Lagerung 1	518	55.1	52.4	51.0	0.55	6944	822
Lagerung 2	523	43.5	29.1	30.9	0.37	4857	551
Lagerung 3	524	56.8	49.4	47.5	0.50	5246	673
Lagerung 4	525	51.0	35.4	37.9	0.44	5378	647
Lagerung 5	528	63.5	47.9	39.1	0.47	5657	655

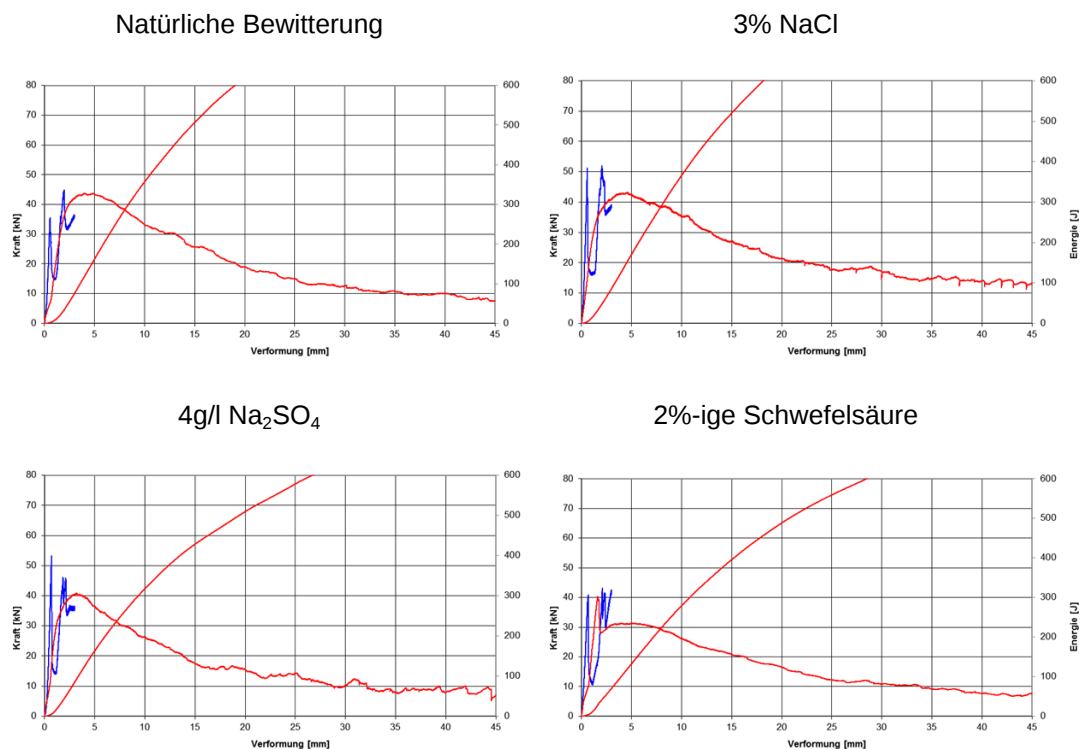
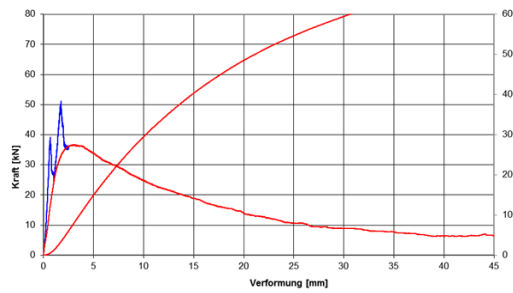


Abb.54 Last-Dehnungskurven vor/nach der Beständigkeitsprüfung von Spritzbeton A4

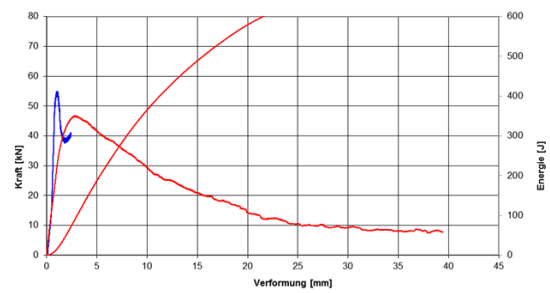
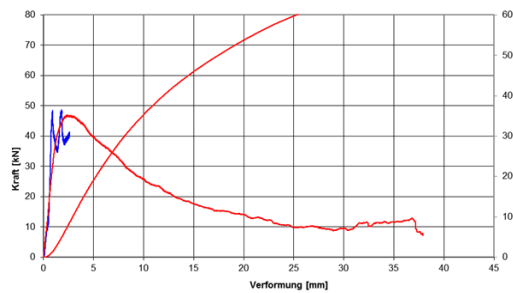
Tab. 11 Resultatzusammenstellung vor/nach der Beständigkeitsprüfung von Spritzbeton A4

	Alter	Vor Beanspruchung		Nach Beanspruchung / resp. Referenz (ohne Beanspruchung)			
		Last		Last	f_{ctf}	G_f	
		maximal	bei 3 mm	maximal bei 0..3 mm			
	[d]	[kN]	[kN]	[kN]	[N/mm ²]	[N/m]	[J]
Referenz 1	102	46.9	29.5	-	0.32	5358	537
Referenz 2	514	49.1	29.5	-	0.40	5698	620
Lagerung 1	515	53.0	27.2	29.7	0.38	5215	559
Lagerung 2	520	44.9	36.3	42.1	0.47	6507	703
Lagerung 3	521	52.1	38.2	40.8	0.50	5406	740
Lagerung 4	522	53.2	35.6	40.5	0.34	4787	578
Lagerung 5	525	43.1	42.6	30.8	0.35	5477	559

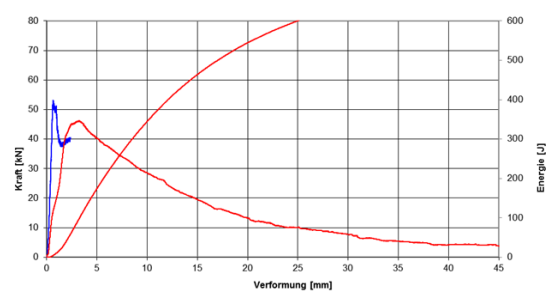
Natürliche Bewitterung



3% NaCl

4g/l Na₂SO₄

2%-ige Schwefelsäure

**Abb.55** Last -Dehnungskurven vor/nach der Beständigkeitsprüfung von Spritzbeton A5**Tab. 12** Resultatzusammenstellung vor/nach der Beständigkeitsprüfung von Spritzbeton A5

	Alter	Vor Beanspruchung		Nach Beanspruchung / resp. Referenz (ohne Beanspruchung)			
		Last		Last	f_{ctf}	G_f	E_{EFNARC}
		maximal	bei 3 mm	maximal bei 0.3 mm			
	[d]	[kN]	[kN]	[kN]	[N/mm ²]	[N/m]	[J]
Referenz 1	57	53.4	47.2	-	0.55	6412	722
Referenz 2	430	59.2	47.7	-	0.43	4385	526
Lagerung 1	431	55.6	46.9	45.7	0.40	4428	546
Lagerung 2	436	51.1	35.2	36.5	0.50	5035	640
Lagerung 3	437	54.9	39.9	46.5	0.51	4981	597
Lagerung 4	438	48.7	41.3	46.3	0.48	4793	600
Lagerung 5	441	53.1	40.4	45.6	0.55	6412	722

7.3 Makroskopische Beobachtungen nach der Beanspruchung

Die Ursache für den Abfall der mechanischen Festigkeit von Stahlfaserspritzbeton ist in der Korrosion der Stahlfasern zu suchen. Diese ist deutlich auf der Frontseite der Quadratplatten bei allen Lagerbedingungen (inklusive Lagerung bei 20°C/90 % im Klimaraum) erkennbar und auf Abb. 56 und Abb. 57 illustriert. Die Korrosion ist dabei nicht auf der ganzen Länge und Tiefe (Abstand zur Oberfläche) eines Risses gleich stark ausgeprägt, sondern tritt mit zunehmender Entfernung von der Oberfläche in reduzierter Form auf. Dies kam besonders im Falle der Beanspruchung mit Tausalzen (NaCl-Lösung, Abb. 56) deutlich zum Vorschein. Eine geringere Rissbreite reduziert demnach die Korrosionsanfälligkeit.

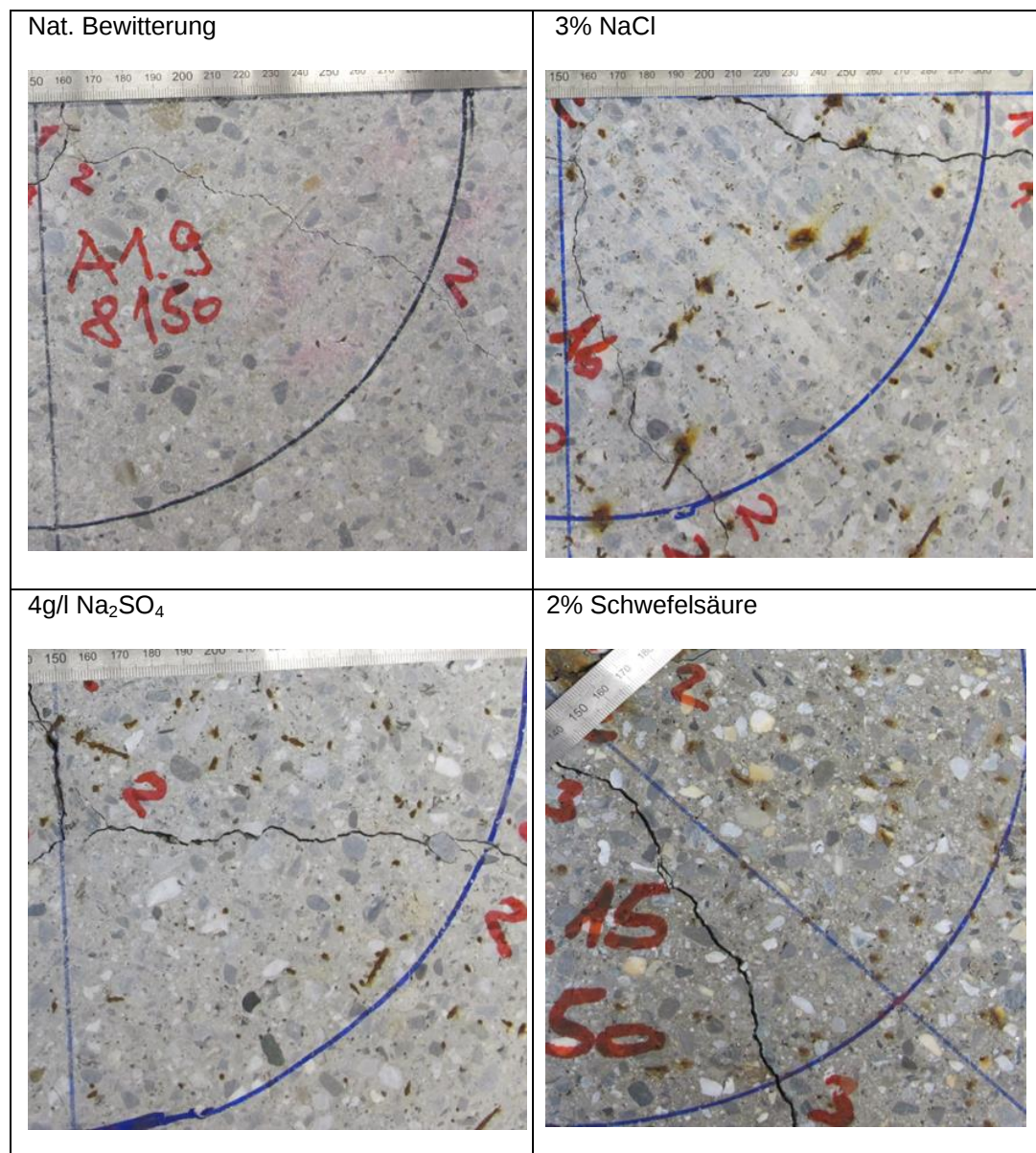


Abb.56 Aufnahme der Vorderseiten der stahlfaserverstärkten Spritzbetonplatten (A1) nach 1 Jahr der Beanspruchung

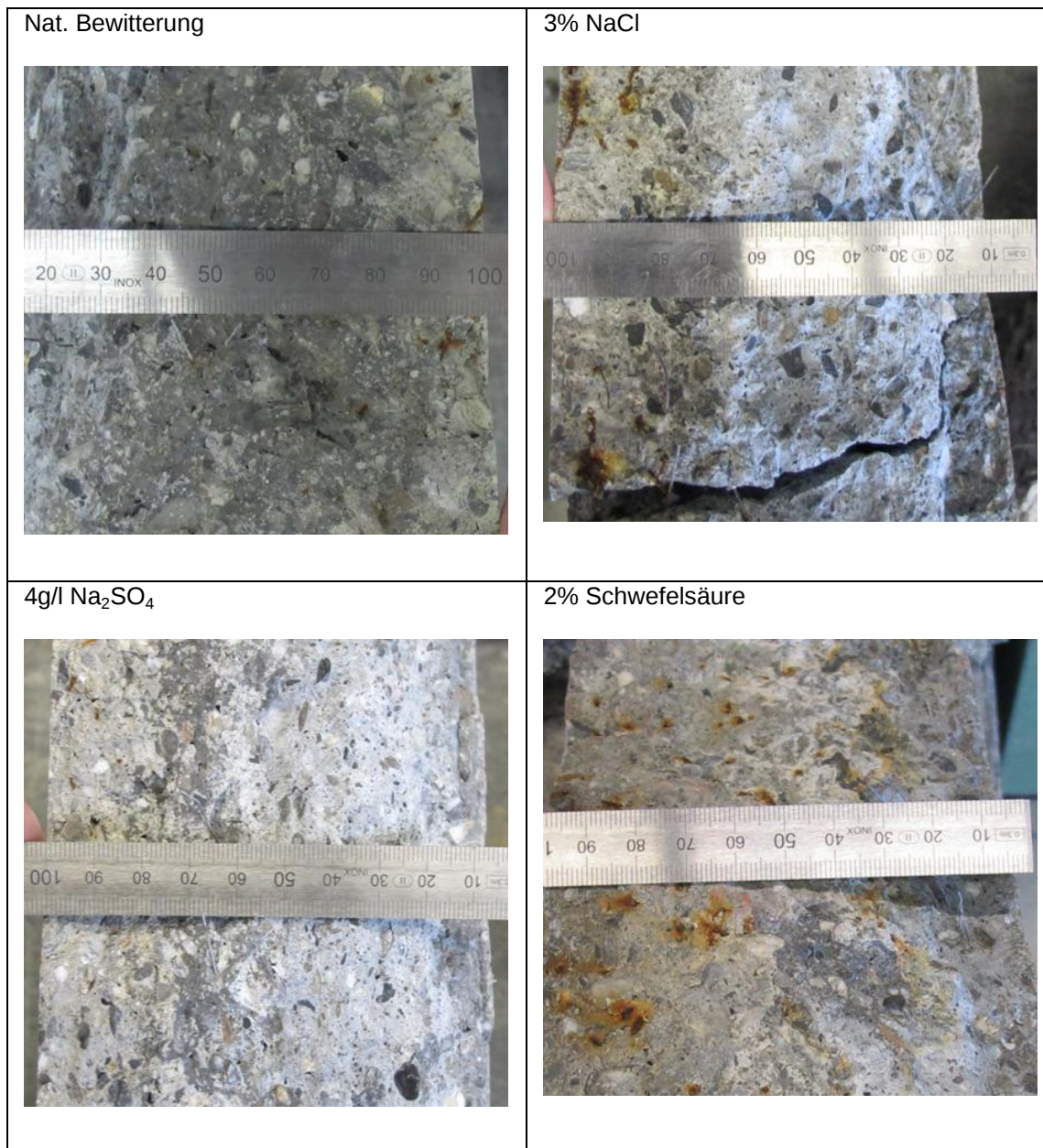


Abb.57 Aufnahme der Rissflächen der stahlfaserverstärkten Spritzbetonplatten (A1) nach 1 Jahr der Beanspruchung (nach dem Quadratplattenversuch zur Ermittlung der residuellen Festigkeiten)

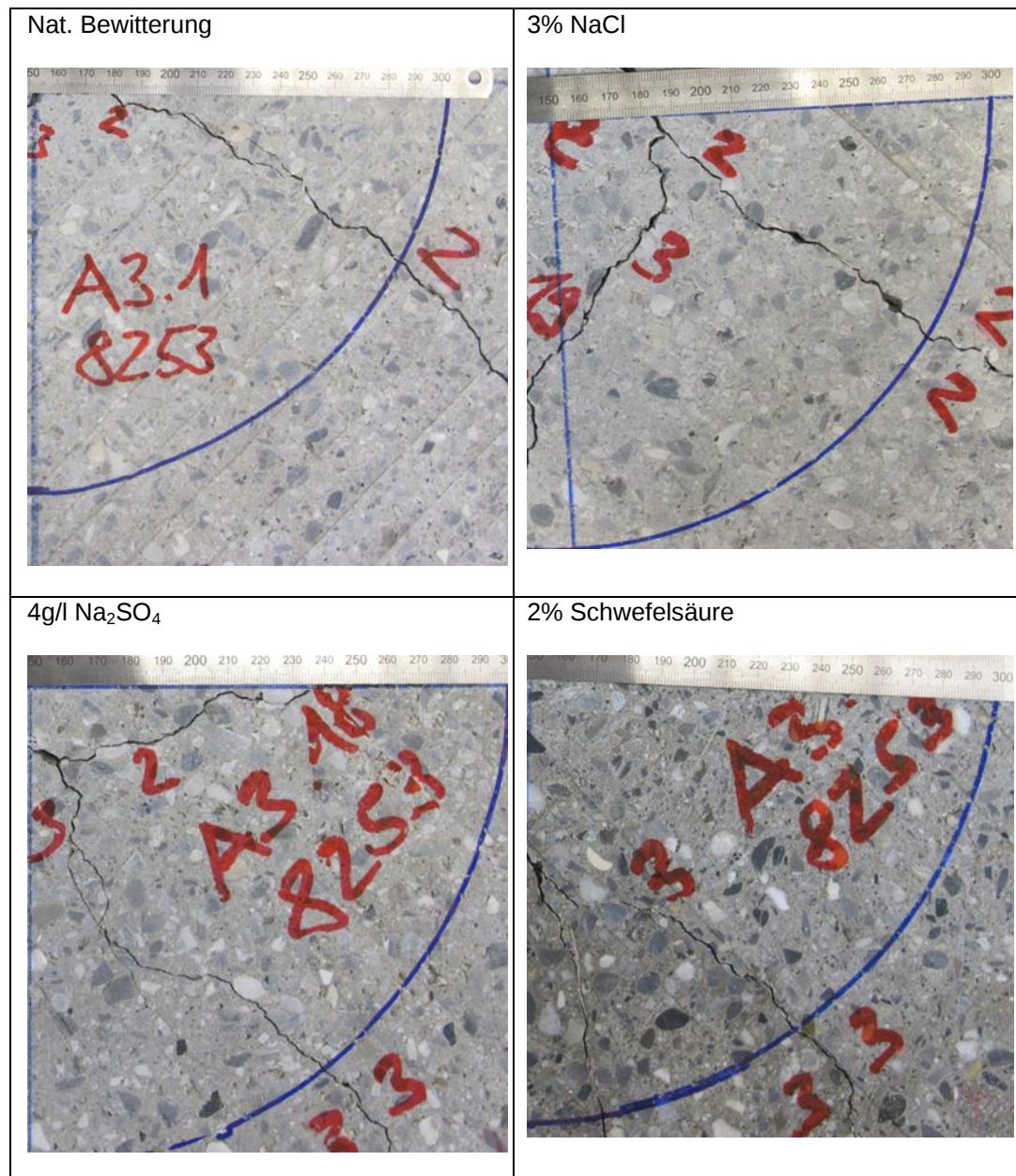


Abb.58 Aufnahme der Vorderseiten von kunststofffaserverstärkten Spritzbetonplatten (A3) nach 1 Jahr der Beanspruchung.

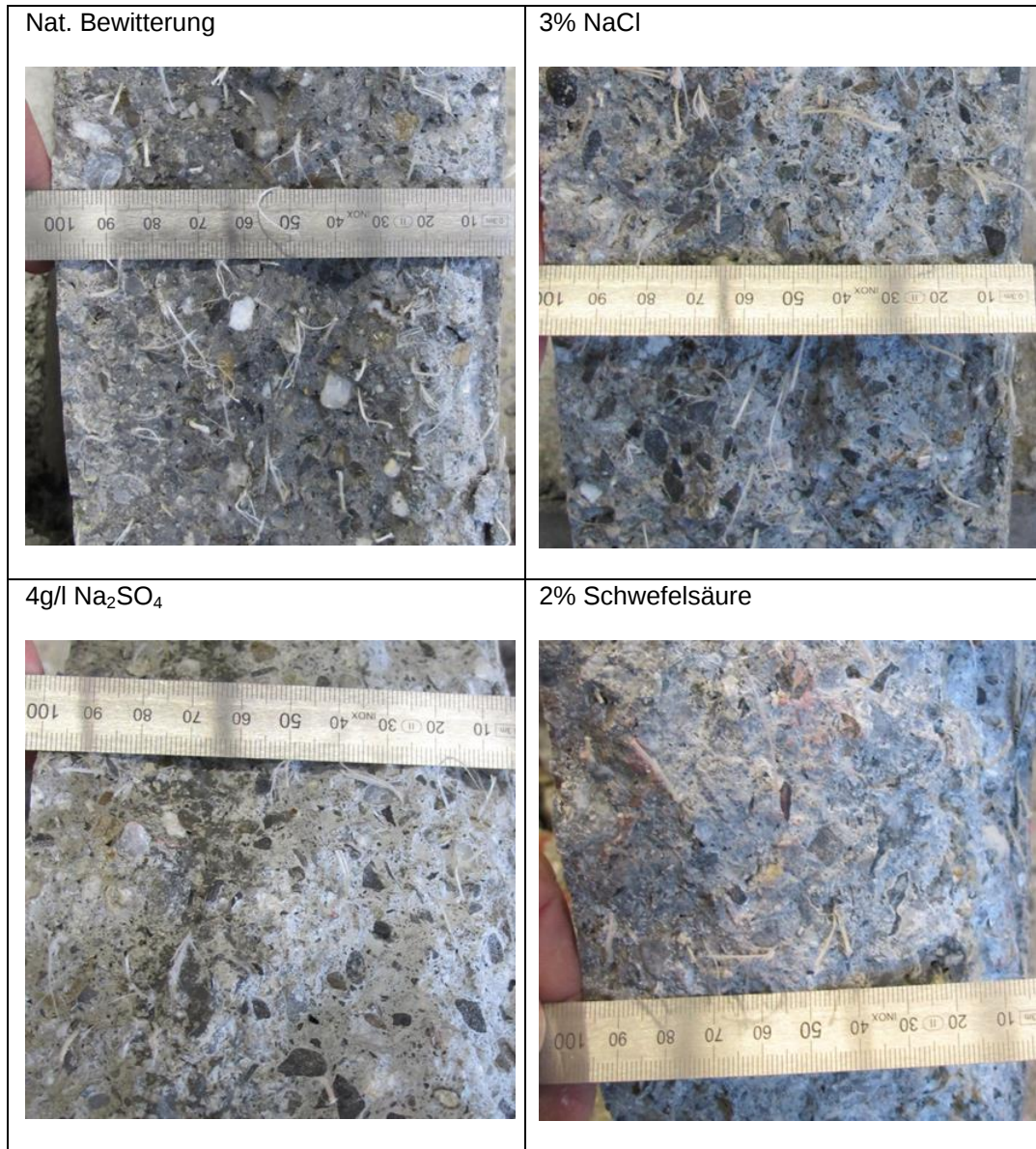
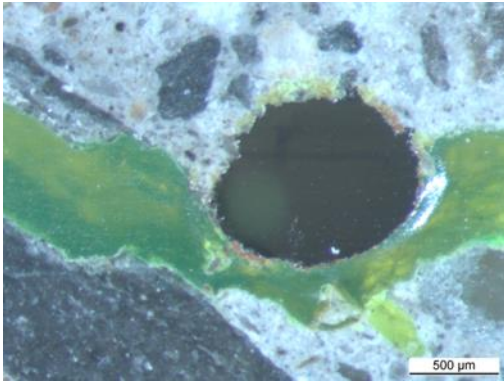
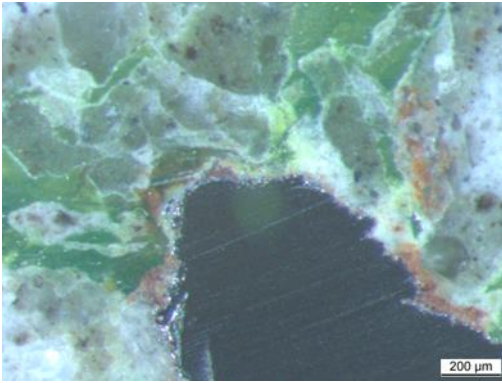
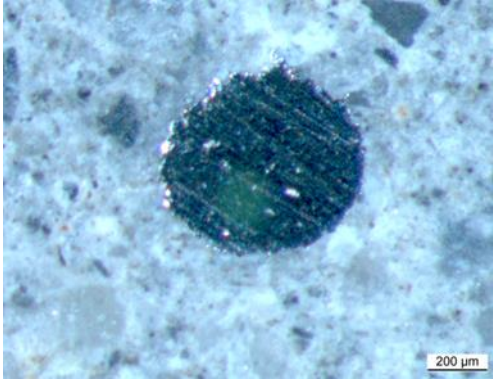
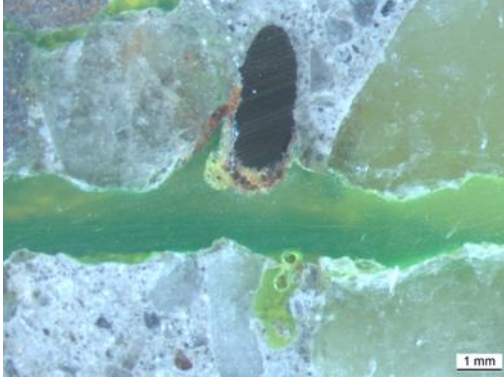
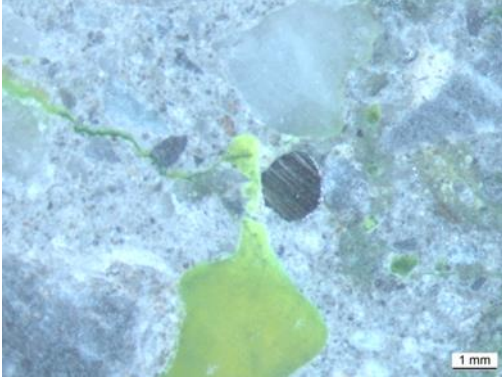


Abb.59 Aufnahme der Rissflächen von kunststofffaserverstärkten Spritzbetonplatten (A3) nach 1 Jahr der Beanspruchung (nach dem Quadratplattenversuch zur Ermittlung der residuellen Festigkeiten)

7.4 Mikroskopische Untersuchungen

Die makroskopischen Beobachtungen werden durch die mikroskopische Analyse an den vorgebrochenen Balken bestätigt. Während die Korrosionsspuren im Falle der Stahlfasern deutlich sichtbar sind (Abbildung 60), kann unter dem Mikroskop keine Beschädigung der Kunststofffasern nachgewiesen werden (Abbildung 61).

nat. Bewitterung, 2 mm Riss, 45 mm Distanz zur Oberfläche, beim Riss 	3% NaCl, 2 mm Riss, 70 mm Distanz zur Oberfläche, beim Riss 
3% NaCl, 2 mm Riss, 5 mm Distanz zur Oberfläche, im Beton 	3% NaCl, 2 mm Riss, 88 mm Distanz zur Oberfläche, beim Riss 
4 g/l Na₂SO₄, 2 mm Riss, 35 mm Distanz zur Oberfläche, beim Riss 	4 g/l Na₂SO₄, 2 mm Riss, 95 mm Distanz zur Oberfläche, beim Riss 
4 g/l Na₂SO₄, 2 mm Riss, 15 mm Distanz zur Oberfläche, im Beton	Schwefelsäure, 2 mm Riss, 60 mm Distanz zur Oberfläche, beim Riss

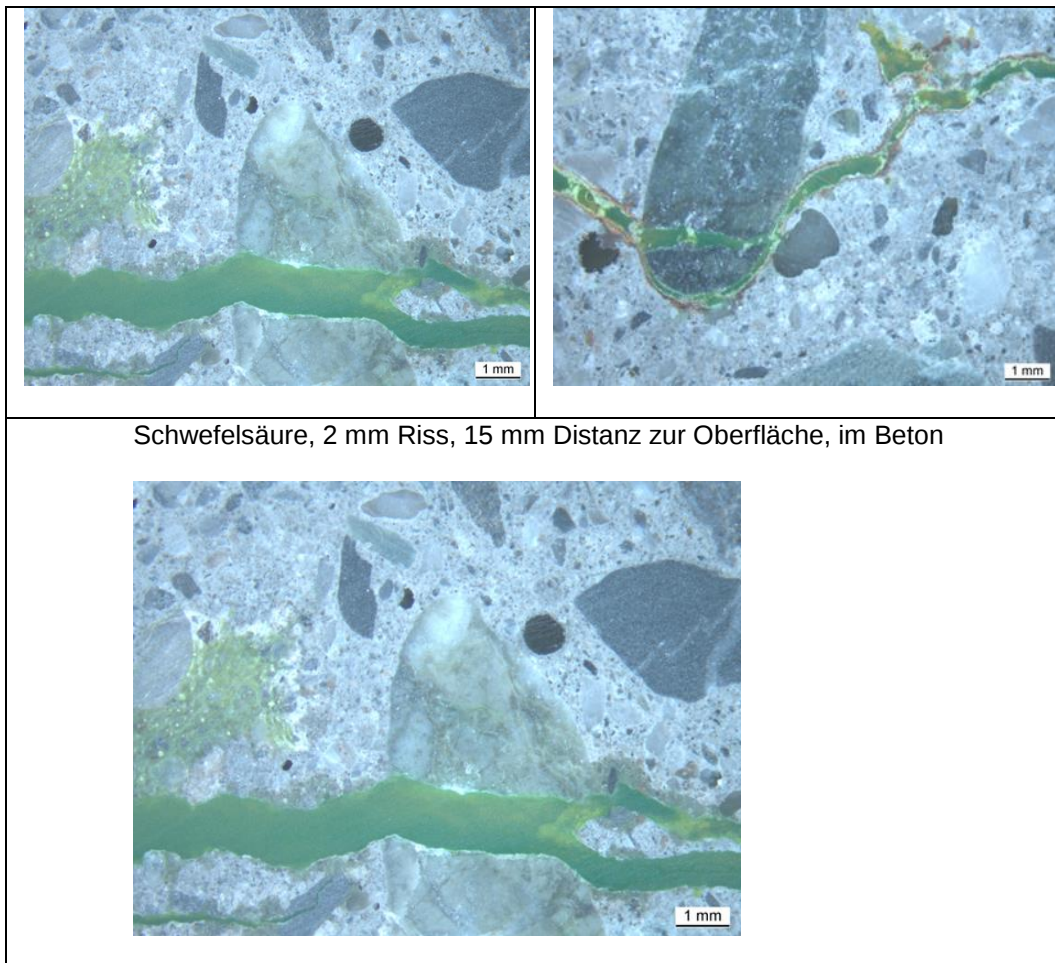


Abb.60 Mikroskopische Aufnahmen von Stahlfasern (A1) in der Nähe des Risses (Imprägnierung mit grünem Harz zwecks Konservierung) nach 1 Jahr der Belastung

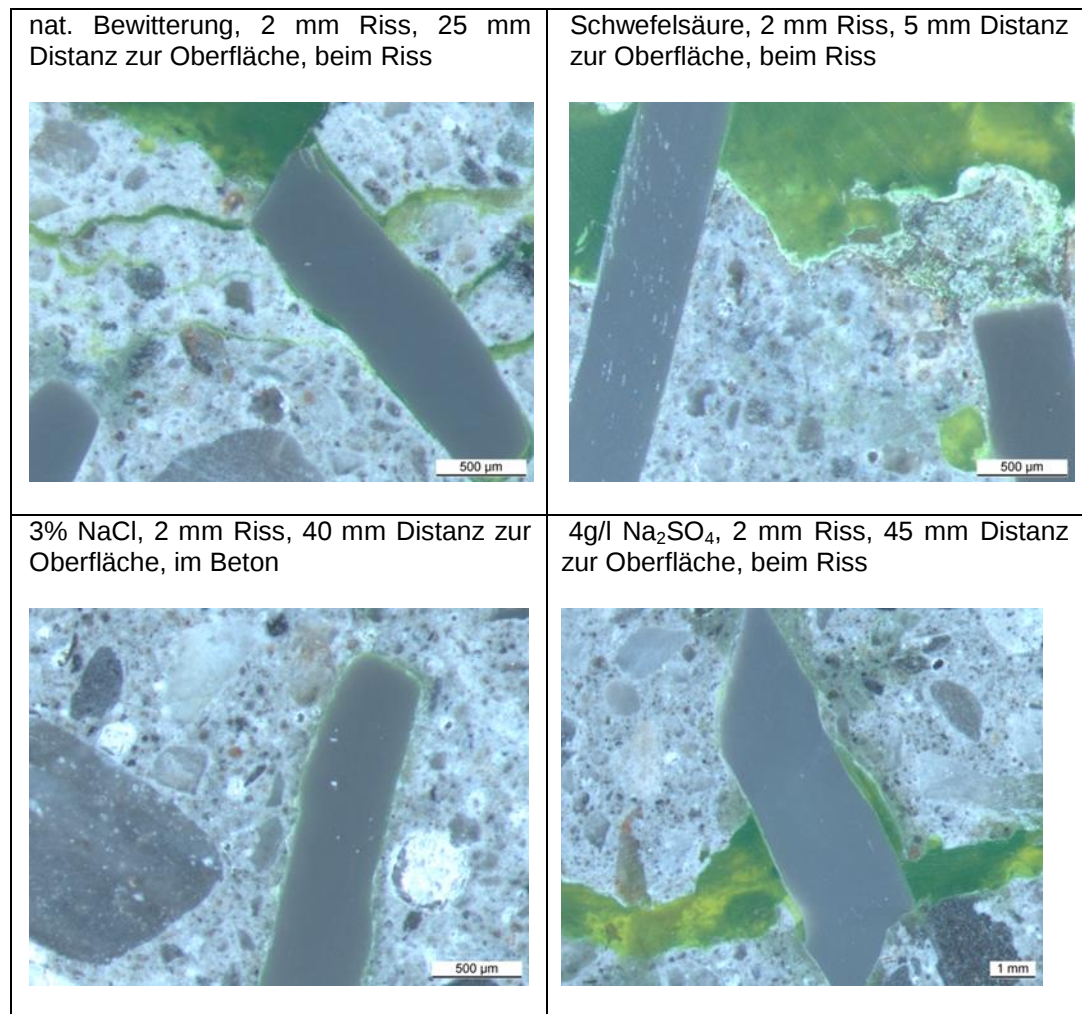


Abb.61 Mikroskopische Aufnahmen von Kunststofffasern (A2) in der Nähe des Risses (Imprägnierung mit grünem Harz zwecks Konservierung) nach 1 Jahr der Belastung

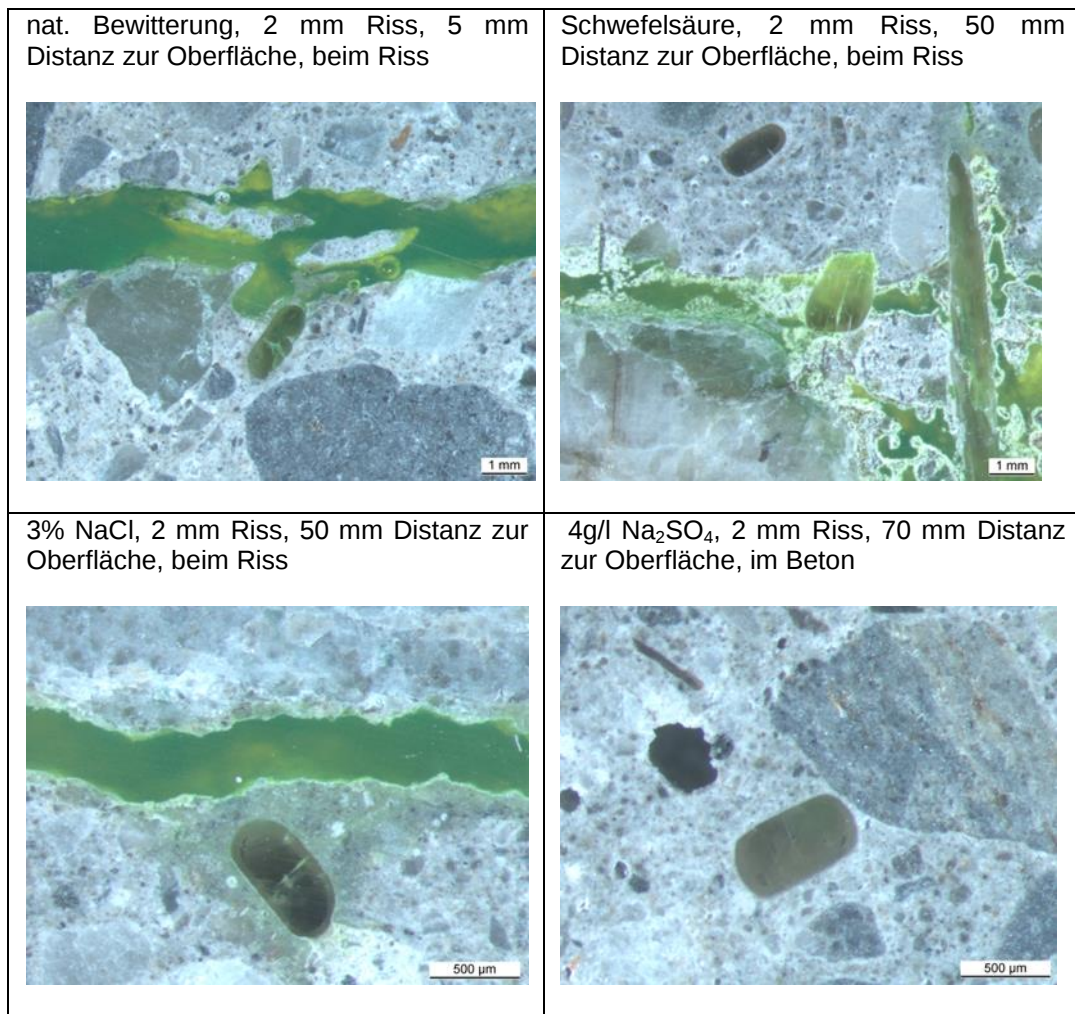


Abb.62 Mikroskopische Aufnahmen von Kunststofffasern (A3) in der Nähe des Risses (Imprägnierung mit grünem Harz zwecks Konservierung) nach 1 Jahr der Belastung.

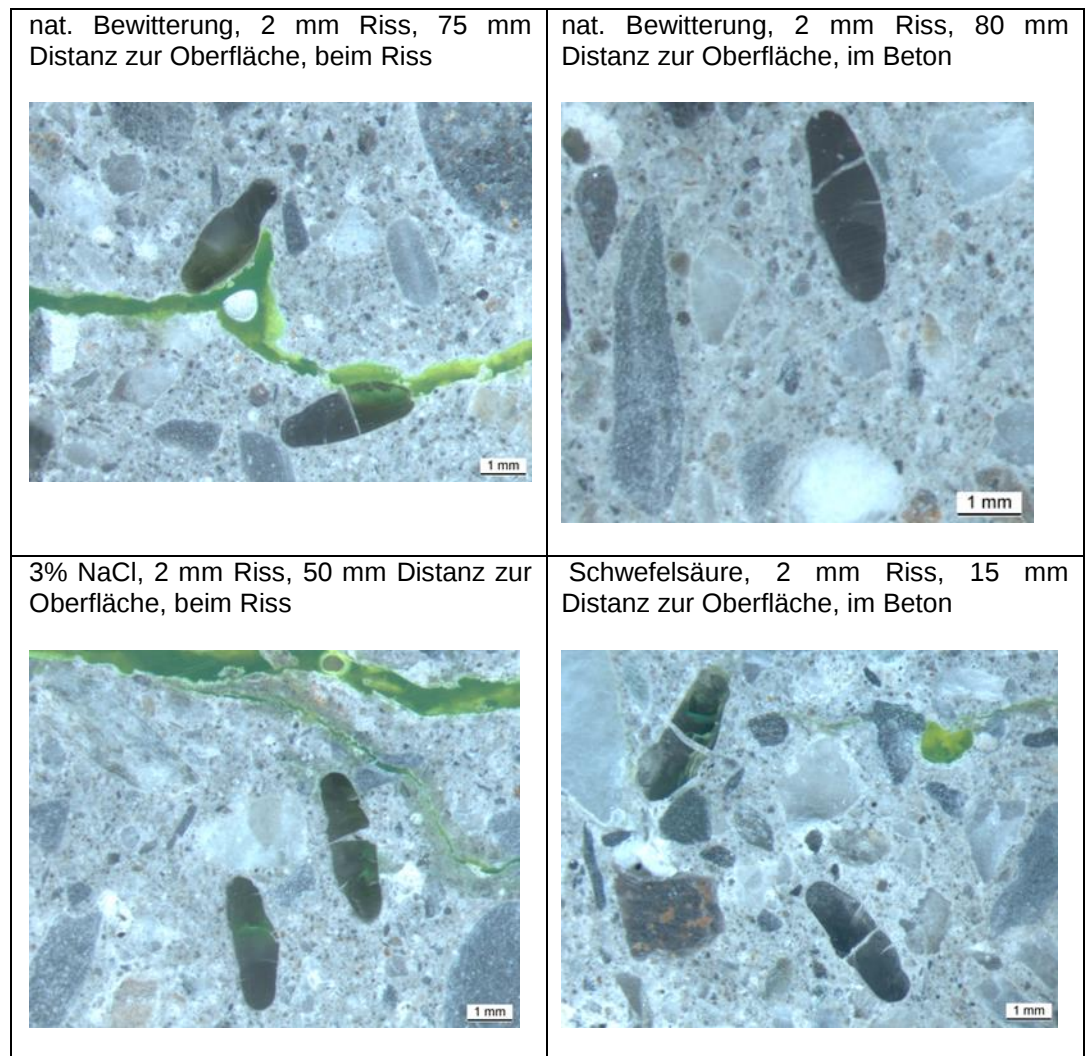


Abb.63 Mikroskopische Aufnahmen von Kunststofffasern (A4) in der Nähe des Risses (Imprägnierung mit grünem Harz zwecks Konservierung) nach 1 Jahr der Belastung

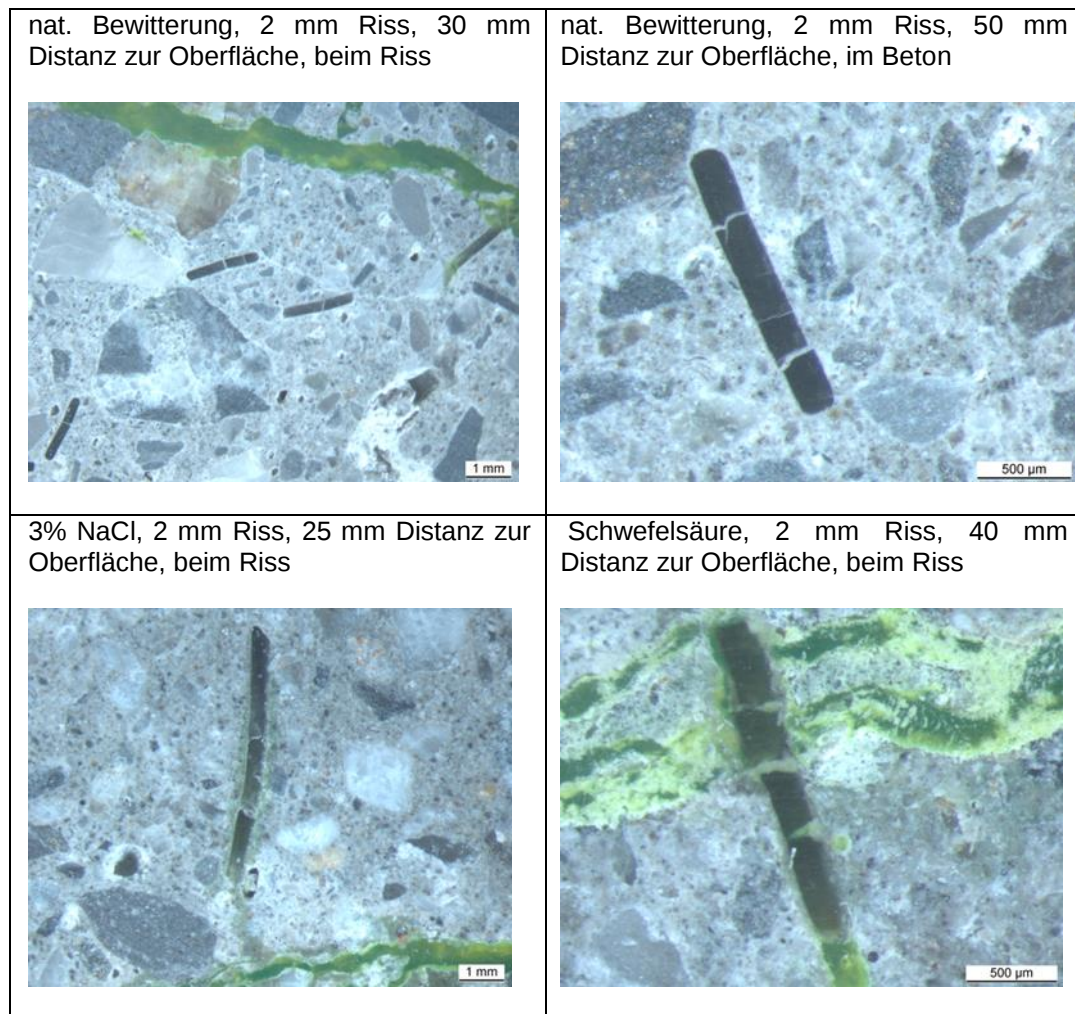


Abb.64 Mikroskopische Aufnahmen von Kunststofffasern (A5) in der Nähe des Risses (Imprägnierung mit grünem Harz zwecks Konservierung) nach 1 Jahr der Belastung.

Andererseits sind bei Stahlfasern in einem gewissen Abstand vom Riss (wenige Millimeter sind ausreichend) kaum Korrosionsspuren nachzuweisen. Eine dichte Spritzbetonschicht scheint die Fasern (vorerst) gegen Korrosion zu schützen. Dies führt zur Schlussfolgerung, dass ungerissener Stahlfaserbeton durchaus vor Korrosion geschützt ist. Andererseits ist Stahlkorrosion zeitabhängig zu betrachten und eine einjährige Beanspruchung ist als sehr kurz anzusehen. Zudem dürfte vollkommen rissfreier Stahlbeton in der Praxis kaum vorkommen.

Neben der Delamination in Rissnähe, welche von der mechanischen Beanspruchung der Fasern bei der Rissinduktion (für den chemischen Belastungstest) herrührt, zeigen Kunststofffasern teilweise Anrisse und Spuren von Beschädigung selbst im ungerissenen Spritzbeton. Diese Anrisse sind meist mit erhärtetem Zementstein gefüllt und daher vor der Rissinduktion entstanden. Hier könnten gewisse Fasertypen eine Schädigung infolge der hohen Belastungen (Scherkräfte) beim Mischen, Pumpen oder Spritzen erfahren haben. Die Abbildung 63 zeigt angerissene oder sogar längsseitig vollständig aufgespaltene Fasern fernab jeden Risses. Der beschädigte Teil ist mit Zementhydratationsprodukten gefüllt, woraus sich schliessen lässt, dass die Beschädigung nicht infolge einer mechanischen Überlastung (wie z.B. bei der Rissinduktion) des erhärteten Spritzbetons, sondern bereits vor der Erhärtung des Spritzbetons, also im frischen Zustand, entstanden sein muss. Derartige Faserschäden sind bei intaktem Faser-Matrixverbund aber an sich nicht kritisch, sie führen bestenfalls

von Anfang an zu einer geringeren mechanischen Performance.

Neben den beobachteten Schäden an Fasern liess sich insbesondere bei Säure- und Sulfatbeanspruchung auch eine Schädigung des Spritzbetons mikroskopisch nachweisen.

8 Diskussion der Untersuchungsergebnisse

Die vorgestellten und im Detail untersuchten Prüfungen des Dauerlastverhaltens von Kunststofffasern für Anwendungen im Untertagebau sind Prüfungen, die im Rahmen der Produktevaluation zur Anwendung kommen. Für die laufende Qualitätskontrolle auf der Baustelle sind die Prüfungen auf Grund ihrer langen Prüfdauer nicht geeignet.

Für die Dauerhaftigkeitsprüfungen wurden die Prüfkörper in jedem Fall vorgebrochen, um auch die Faserstruktur der äusseren Einwirkungen, sei es Belastung oder chemischer Angriff, zu exponieren. Eine Prüfung an ungestörten Proben würde primär das Betongefüge testen und keine - oder nur nach unverhältnismässig langen Zeiträumen - Aussagen zum Verhalten der Fasern erlauben.

Das Vorgehen der Prüfkörper erfolgte mit niedrigen Rissöffnungsweiten wie dies im Tunnel typischerweise der Fall sein wird. In anderen Zweigen der untertägigen Bauen, wie dem Bergbau, sind allenfalls grössere Rissöffnungsweiten angezeigt, da dort insgesamt grössere Deformationen zugelassen werden.

Eine gewisse Rissweite war erforderlich, um einen stabilen Bruchzustand zu erreichen, ab dem das Dauerverhalten der Kunststofffasern beurteilt werden kann. Deutlich wird dies bei den Biegeplatten, die einen multiplen Risszustand aufweisen, der sich erst mit einer gewissen Rissöffnung vollständig ausgebildet hat.

Die Untersuchung des Dauerlastverhaltens von kunststofffaserarmiertem Spritzbeton erfolgte an Balken und Platten, die aus Spritzkisten gewonnen wurden. Die Anteile der residuellen Lastanteile, die bei Platten und Balken zur Erreichung eines stabilen Tragverhaltens aufgebracht werden können, unterscheiden sich signifikant. Die Ursachen dafür sind nicht abschliessend bekannt, dürften aber in den unterschiedlichen statischen Belastungssituationen (statisch bestimmt bzw. unbestimmt) zu suchen sein. Das Dauertragverhalten lässt sich mit beiden Prüfmethoden bestimmen. Für die Beurteilung der Unterschiede zwischen Platten- und Balkenprüfung gelten die gleichen Überlegungen wie für die Kurzzeitbelastungsprüfungen.

- Bewerten der Prüfmethoden
 - Kriechprüfung an vorgebrochenen Platten mit durchgehender Auflagerung und zentrischer, statischer Belastung stellt eine geeignete Versuchsanordnung zur Prüfung des Kriechverhaltens von Faserspritzbeton dar.
 - Das Lastniveau von 50 % einer vordefinierten Deformation (2 mm oder 3 mm, projektspezifisch) erscheint als geeignete Belastung für die Prüfung der Kriechstabilität von Faserspritzbeton.
 - Höhere Belastungsniveaus führten meist zumeist zum Versagen.
 - Das Einbringen von Kreuznuten kann die Richtung und die Anzahl der Hauptrisse regulieren und die Schwindprüfung damit vereinheitlichen. Weitere Untersuchungen zur Richtung und Tiefe der Nuten sind nötig. Insbesondere für Faserbetone mit hohem Arbeitsvermögen traten trotz eingesägter Nuten Risse auch ausserhalb der Einkerbungen auf.
 - Vielleicht wäre auch eine statische Variante des Round Panel Test nach ASTM 1550 eine sinnvolle Versuchsanordnung, da hier ein regelmässiges Rissmuster entsteht.
- Bewerten der Fasern
 - Stahlfaserspritzbetone weisen gute Kriechstabilität auf und können hohe Belastungen auch über lange Zeit aufnehmen, solange die Deformationen nicht zu gross werden.
 - Polymerfaser 2 zeigte auf geringem Lastniveau gute Kriechstabilität, jedoch könnte das geringe Energieabsorptionsvermögen im Kurzzeitversuch den Einsatz in statisch beanspruchten Bauteilen im gebrochenen Zustand in Frage stellen.

- Polymerfaser 3 zeigte sehr gute Kriechstabilität bei hoher absoluter statischer Last und einem Lastniveau von 50 %.
- Polymerfaser 4 zeigte bei mittlerer absoluter Beanspruchung über den Zeitraum eines Jahres stetiges Kriechen mit recht grossen Deformationen, jedoch kam es bei einem Lastniveau von 50 % nicht zum vollständigen Versagen.
- Die Prüfkörper mit Polymerfaser 5 wurden aufgrund ihrer Vorbelastungscharakteristik mit vergleichsweise hohen Lasten beansprucht. Dies führte zu starken Verformungen und dem Versagen auf dem 50 % Lastniveau nach 20, 50 und 170 Tagen.

Bezüglich der chemischen Beständigkeit von Kunststofffaserspritzbeton ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

- Kunststofffasern erweisen sich selbst bei grossen Rissweiten gegenüber einem Angriff von Sulfaten, Chloriden und selbst Schwefelsäure als beständig. Allenfalls wurde eine Beschädigung der Betonmatrix beobachtet.
- Selbst ist nach einjähriger Beanspruchung kein Abfall der Tragfähigkeit zu beobachten. Teilweise konnte infolge einer gewissen Nachhydratation sogar ein verbessertes Tragverhalten beobachtet werden.
- Das Faser-Interface wurde sogar in der Nähe grosser Risse durch den chemischen Angriff nicht in verstärkter Weise geschädigt. Der Faserverbund blieb weitestgehend intakt. Bei starker chemischer Schädigung des Spritzbetons an sich dürfte jedoch auch diese Zone vermehrt beansprucht werden.
- Hinsichtlich des Dauertragverhaltens von Faserbeton ist somit die chemische Beständigkeit des Spritzbetons und nicht diejenigen der Kunststofffasern entscheidend.

9 Brandgasemissionen

9.1 Randbedingungen

In diesem Kapitel werden mögliche Auswirkungen von Macro-Kunststoffasern im Brandfall in einem Strassentunnel betrachtet. Konkret geht es um allfällige für den Menschen toxische Emissionen der Kunststoffasern wenn diese bis zur Zersetzungstemperatur oder darüber hinaus erhitzt werden.

Bei einem Feuer in einem Strassentunnel ist mit Temperaturen bis 1350 °C (Rijkswaterstaat-Tunnelbrandkurve) im Falle eines LKW-Brandes zu rechnen. Die Branddauer beträgt nach der Rijkswaterstaat-Tunnelbrandkurve 120 min, wobei die Temperaturspitze nach 60 min durchlaufen wird.

9.1.1 Fasertyp / Fasergehalt

Zur Herstellung von Macro-Kunststoffasern für die Verstärkung von Betonen kommen primär die Kunststoffe Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP), seltener der Kunststoff Polyethylenterephthalat (PET) zum Einsatz.

Polyethylen (PE / HDPE)

Halbstrukturformel:	$[-CH_2-CH_2-]_n$
Monomere:	Ethen ($CH_2=CH_2$)
CAS-Nummer:	9002-88-4
Schmelztemperatur:	130 – 145 °C
Zersetzungstemperatur:	340 – 440 °C [VdS 2516: 2000-12 (01)]
Entzündungstemperatur:	350 °C [VdS 2516: 2000-12 (01)]

Polypropylen (PP)

Halbstrukturformel:	$[-CH(CH_3)-CH_2-]_n$
Monomere:	Propen ($CH_2=CH-CH_3$)
CAS-Nummer:	9003-07-0
Schmelztemperatur:	160 – 165 °C
Zersetzungstemperatur:	330 – 410 °C [VdS 2516: 2000-12 (01)]
Entzündungstemperatur:	390 – 410 °C [VdS 2516: 2000-12 (01)]

Polyethylenterephthalat (PET)

Halbstrukturformel:	$[-COO-C_6H_4-COO-CH_2-CH_2-]_n$
Monomere:	Ethylenglykol ($OH-CH_2-CH_2-OH$) Terephthalsäure ($COOH-C_6H_4-COOH$)
CAS-Nummer:	25038-59-9
Schmelztemperatur:	250 – 260 °C
Zersetzungstemperatur:	285 – 305 °C [VdS 2516: 2000-12 (01)]
Entzündungstemperatur:	480 °C [VdS 2516: 2000-12 (01)]

Halbstrukturformel: Wiederholereinheit des Polymers / Monomere: Ausgangsprodukte des Polymers / CAS-Nummer: Chemical Abstract Service (eindeutige Stoffcharakterisierung) / Schmelztemperatur: Temperaturbereich Aggregatzustandsänderung fest → flüssig / Zersetzungstemperatur: Temperaturbereich Zersetzung (chemische Veränderung des Materials ohne chemischen Angriff von aussen) / Entzündungstemperatur: Temperaturbereich Selbstentzündung in Anwesenheit von Luft (O_2).

In der Praxis werden die Fasern mit minimal 3 kg/m^3 , maximal mit bis zu 8 kg/m^3 dem Beton zugegeben.

Zusatzstoffe wie Stabilisatoren werden in diese Betrachtung nicht miteinbezogen, da diese Stoffe normalerweise nur in geringer Konzentration (maximal wenige %) in den Fasern enthalten sind und deren Zersetzungsprodukte im Vergleich zu den Hauptkomponenten nur eine untergeordnete Rolle spielen können

9.1.2 Brandlasten

Bei Vorliegen eines PW-Brandes (Kleinbrand / 3 – 10 MW während 10 – 30 min / 0.5 – 5 MW)) in einem Tunnel ist, bedingt durch eine effektiv arbeitende Brandfalllüftung, nicht damit zu rechnen, dass sich die Betonoberfläche der Tunnelwandung deutlich über den Schmelzpunkt von Macro-Kunststofffasern erhitzt und diese nachfolgend zersetzt werden. Somit sollten bei einem Kleinbrand keine oder nur sehr geringe Mengen an Schadstoffen, bedingt durch die Zersetzung von Macro-Kunststofffasern, in die Tunnelatmosphäre emittiert werden.

Gerät ein grösseres Fahrzeug, namentlich ein LKW, in Brand (30 – 150 MW während 1 – 4 h / 30 – 600 MW) können sehr viel höhere Temperaturen an der Tunnelwandung auftreten. Die thermische Belastung ist hier ebenfalls während einer deutlich längeren Zeitdauer vorhanden, so dass eine signifikante Temperaturerhöhung auch im Inneren der Betonschicht zu erwarten ist.

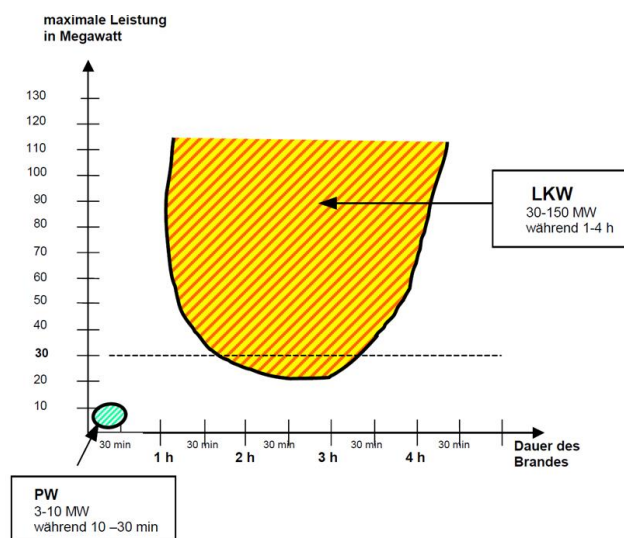


Abb.65 Gegenüberstellung Brandlasten PW und LKW [62]

Brandkurven

Bei einem Feuer in einem Strassentunnel ist mit Temperaturen bis 1350°C (RWS - Rijkswaterstaat-Tunnelbrandkurve) im Falle eines LKW-Brandes zu rechnen. Die Branddauer beträgt nach der Rijkswaterstaat-Tunnelbrandkurve 120 min, wobei die Temperaturspitze nach 60 min durchlaufen wird.

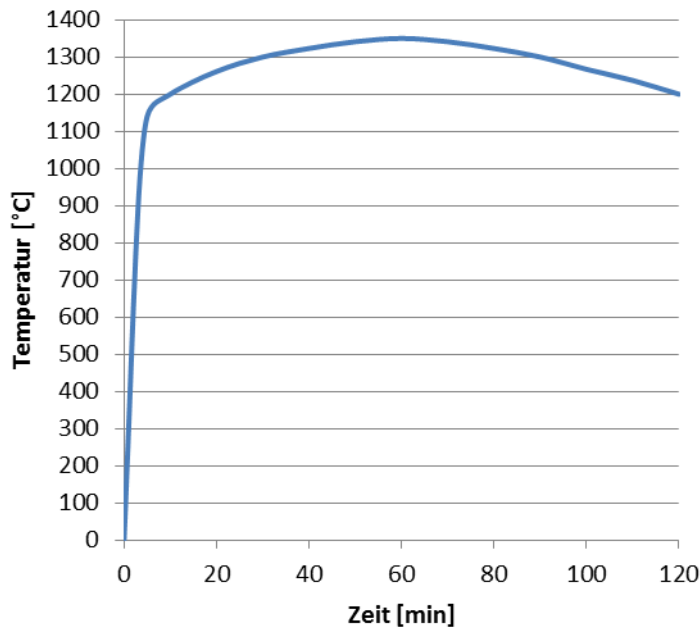


Abb.66 Temperatur -Zeit-Kurve Rijkswaterstaat-Tunnelbrandkurve (RWS)

9.2 Brandgase / Pyrolysegase

9.2.1 Brandgase von Fahrzeugbränden

In einem Personenwagen moderner Bauart (ab 2010) werden heute durchschnittlich über 100 kg reine Kunststoffe (ohne Kunststoffverbundwerkstoffe) eingesetzt [57]. Der Gewichtsanteil an Kunststoffen nimmt in den letzten Jahren kontinuierlich zu und verdrängt metallische Werkstoffe immer mehr. Die Massenanteile der verschiedenen Kunststoffe teilen sich in etwa folgendermaßen auf [57]:

37 % Polypropylen (PP)

20 % Polyurethan (PU)

12 % Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS)

8 % Polyamide (PA)

5 % Polycarbonat (PC)

18 % andere Kunststoffe

Für einen LKW ist nach Abb. XYZ eine mindestens 60-fache Brandlast gegenüber einem PW anzunehmen (Vergleich minimaler PW-Brand (0.5 MW) mit minimalem LKW-Brand (30 MW)). Verfügt ein LKW (inkl. Ladung) über eine ähnliche stoffliche Zusammensetzung wie ein PW, ist die dem LKW entsprechende, verbaute wie auch geladene Kunststoffmasse als 6000 kg anzunehmen.

Wie bei allen organischen Stoffen wird bei der Zersetzung / Verbrennung von Polymeren Kohlenstoffdioxid (CO₂), Kohlenstoffmonoxid (CO), Russ (C) und Wasser (H₂O) frei. Ist die Verbrennung nur unvollständig (z.B. durch Sauerstoffmangel oder vergleichsweise geringe Temperatur) entsteht vermehrt CO sowie als Pyrolyseprodukte auch komplexere Kohlenwasserstoffe als auch die Monomere der Polymere. Enthält das Polymer Stickstoff, entsteht bei der Verbrennung zusätzlich der hochtoxische Cyanwasserstoff (Blausäure (HCN)). Sind Halogenide Fluor (F) oder Chlor (Cl) in den Kunststoffen enthalten, entstehen die ebenfalls sehr problematischen (toxisch / korrosiv) entsprechenden Halogenwasserstoffe HF und HCl unter Umständen in sehr grossen Mengen. Dies ist vor allem bei PVC, PTFE und Chlorkautschuk der Fall. In Spuren werden je nach Kunststoff und Reaktionsbedingungen eine Vielzahl von weiteren Substanzen gebildet, wie z.B. polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), polychlorierte Dibenzodioxine (PCDD) oder polychlorierte Dibenzofurane (PCDF) die ebenfalls toxisch sind.

In der untenstehenden Tabelle ist eine Zusammenstellung von relevanten Zersetzungsprodukten von Kunststoffsorten. Die Daten von VDS unterscheiden nach 6 Schadstoffemissionskategorien (CO / CO₂; HCl / HF; HCN; PAK; PCDD / PCDF; stark russend), IBA veröffentlichte eine Aufstellung möglicher Leitsubstanzen der Pyrolyseprodukte von Kunststoffen.

Polymer:	Zersetzungsprodukte (nicht abschliessend):
Polypropylen (PP)	CO ₂ , CO [58] ungesättigte und gesättigte aliphatische Kohlenwasserstoffe [59]
Polyurethan (PU)	CO ₂ , CO, HCN (!), PAK (!) [58] Ether, Glykolether, Diisocyanate MAK = 0.02 mg/m ³ , aromatische Amine, Flammenschutzmittel, Treibmittel (bei Schäumen) [59]
Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS)	CO ₂ , CO, HCN (!), stark russend [58] Styrol MAK = 85 mg/m ³ , 1,3-Butadien MAK = 11 mg/m ³ , Acrylnitril MAK = 4.5 mg/m ³ [59]
Polyamide (PA)	CO ₂ , CO, HCN (!) [58] ε-Caprolactam MAK = 5 mg/m ³ , Cyclopentanon [59]
Polycarbonat (PC)	CO ₂ , CO [58] Phenol MAK = 19 mg/m ³ [59]

Cyanwasserstoff (HCN)

Eine besondere Gefährdung geht von stickstoffhaltigen Polymeren (PU / ABS / PA) aus. Diese bilden bei der Zersetzung neben anderen stickstoffhaltigen Schadgasen auch den hochgradig toxischen Cyanwasserstoff (HCN). Der Masseanteil an stickstoffhaltigen

Kunststoffen unter den Kunststoffen in einem modernen PW beträgt ca. 40 %. Der MAK-Wert dieses Schadgases beträgt 2.1 mg/m^3 .

Halogenwasserstoffe (HCl / HF)

Halogenhaltige Polymere, die bei der Zersetzung ebenfalls sehr problematische Stoffe wie Chlorwasserstoff (HCl) oder Fluorwasserstoff (HF) bilden, werden in Fahrzeugen wenig verbaut könnten aber in den 18% "andere Kunststoffe" durchaus auch vertreten sein. Die Halogenwasserstoffe sind stark toxisch und zusammen mit Wasser sehr korrosiv. HF hat einen MAK-Wert von 0.83 mg/m^3 , HCl einen MAK-Wert von 3 mg/m^3 .

9.2.2 Brand- / Pyrolysegase von Kunststofffasern

Brand- oder Pyrolysegase von Kunststoff-Macrosfasern entstehen nur, wenn sich deren Temperatur auf mindestens 280°C für PET, 330°C für PP und 340°C für PE (Zersetzungstemperatur) erhöht. Dies ist in einem schlecht wärmeleitenden Baustoff wie Beton nur in einer begrenzten Schichtdicke, nach einer deutlichen thermischen Belastung gegeben. Die Ausdehnung der Schicht ($> 280^\circ\text{C}$) ist vor allem von der Einwirkdauer des Brandes und dessen Temperatur abhängig. Weiter spielt die Wärmeleitfähigkeit des vorhandenen Betons und die Leistungsfähigkeit der Lüftung eine Rolle.

Ist genügend Sauerstoff (O_2) in der Umgebung vorhanden und die Temperatur genügend hoch, verbrennen die Kunststoff-Macrosfasern (PE / PP / PET) vorwiegend zu Kohlenstoffdioxid (CO_2), Kohlenstoffmonoxid (CO), Russ (C) und Wasser (H_2O). In tieferen Betonschichten (mit wenig / ohne O_2) werden die Polymere pyrolysiert (thermisch zersetzt). Dabei entstehen die Monomere der Polymere und andere Kohlenwasserstoffe. Diese treten als Dampf aus den Faserporen des Betons aus und werden nachfolgend allenfalls in einer sauerstoffreichen Zone weiter zu CO_2 , CO und H_2O oxidiert.

Polymer:	Zersetzungsprodukte (nicht abschliessend):
Polyethylen (PE)	CO_2 , CO [58] ungesättigte aliphatische Kohlenwasserstoffe, aliphatische Aldehyde [59]
Polypropylen (PP)	CO_2 , CO [58] ungesättigte und gesättigte aliphatische Kohlenwasserstoffe [59]
Polyethylenterephthalat (PET)	CO_2 , CO [58] 1,3-Butadien MAK = 1.3 mg/m^3 , Benzol MAK = 1.6 mg/m^3 [59]

Beim Brand eines PW's befindet sich das Feuer eher nahe an der Fahrbahnoberfläche und nicht direkt unter der Tunneldecke. Zwischen Fahrzeugdach und Tunneldecke ist ein beträchtlicher Abstand vorhanden und die Flammen beschlagen die Betonoberfläche nicht direkt. Heisse Brandgase steigen aber dennoch auf und erhitzen die Tunneldecke. Wird die Brandfall-Lüftung zugeschaltet (bis ca. 6 m/s), werden die heissen Brandgase des vergleichsweise kleinen Brandes effizient von der gefährdeten Betonfläche

wegbefördert und mit frischer kühler Luft vermischt. Die Tunneldecke heizt sich nicht mehr weiter auf respektive wird wiederum auf nahezu Umgebungstemperatur abgekühlt. Des Weiteren ist die Branddauer eines PW's auf ca. 30 min begrenzt. Somit besteht keine Gefahr, dass Kunststoff-Macrofasern bis auf die Zersetzungstemperatur erhitzt werden und Brand- oder Pyrolysegase in die Umgebungsluft abgegeben werden.

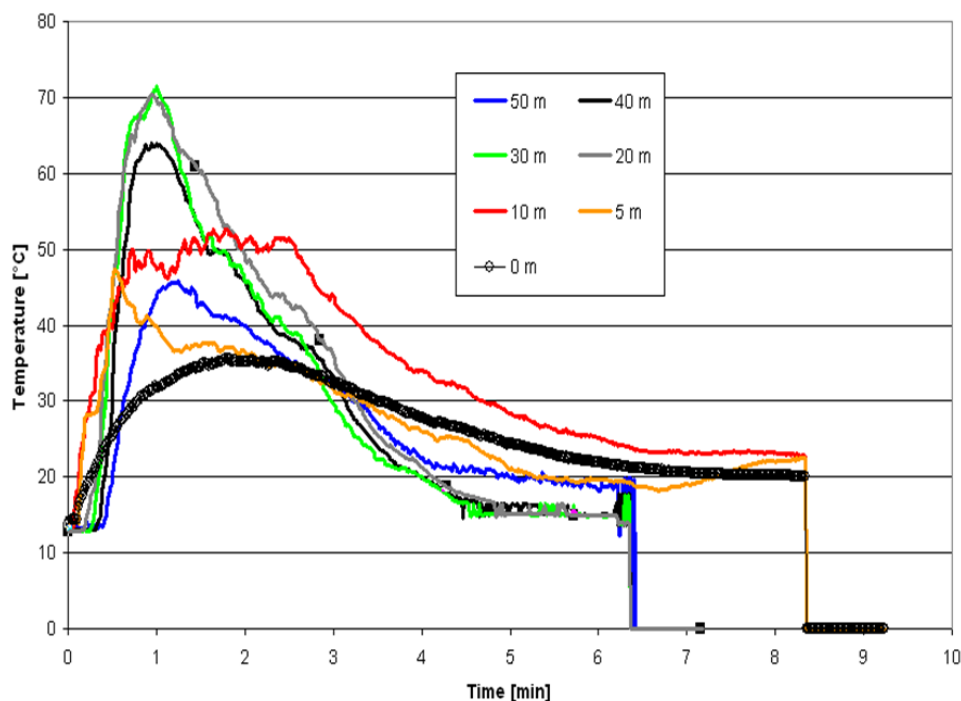


Abb.67 Temperatur -Zeit-Verlauf Brand von 4 m² Heptan / 0.5 m unterhalb der Tunneldecke gemessen bei 2 m/s Lüftungsgeschwindigkeit [61]

Für einen LKW-Brand wird die direkt von den Flammen betroffene Betonoberfläche der Tunneldecke als 3 mal die Grundfläche eines LKW's (Annahme 40 m²) angenommen und beträgt für die Betrachtung somit 120 m². Innerhalb der deutlich ausgedehnten maximalen Branddauer von bis zu 240 min und der Fahrzeughöhe bis 4 m, ist davon auszugehen, dass die Betonstruktur signifikant erhitzt wird. Frühere interne VSH-Untersuchungen von Brandeinwirkungen (RWS) auf Betonschichten zeigen die Temperaturerhöhung in Abhängigkeit der Schichttiefe und der Zeit:

Tab. 13 Schichtdicke Beton und maximal erreichte Temperatur bei Brandprüfung Beton XYZ nach RWS für 120 min [60]

Thermoelement	T mittel max [°C]
30 mm Überdeckung (30 mm Mittel)	382
60 mm Überdeckung (60 mm Mittel)	318
90 mm Überdeckung (90 mm Mittel)	184

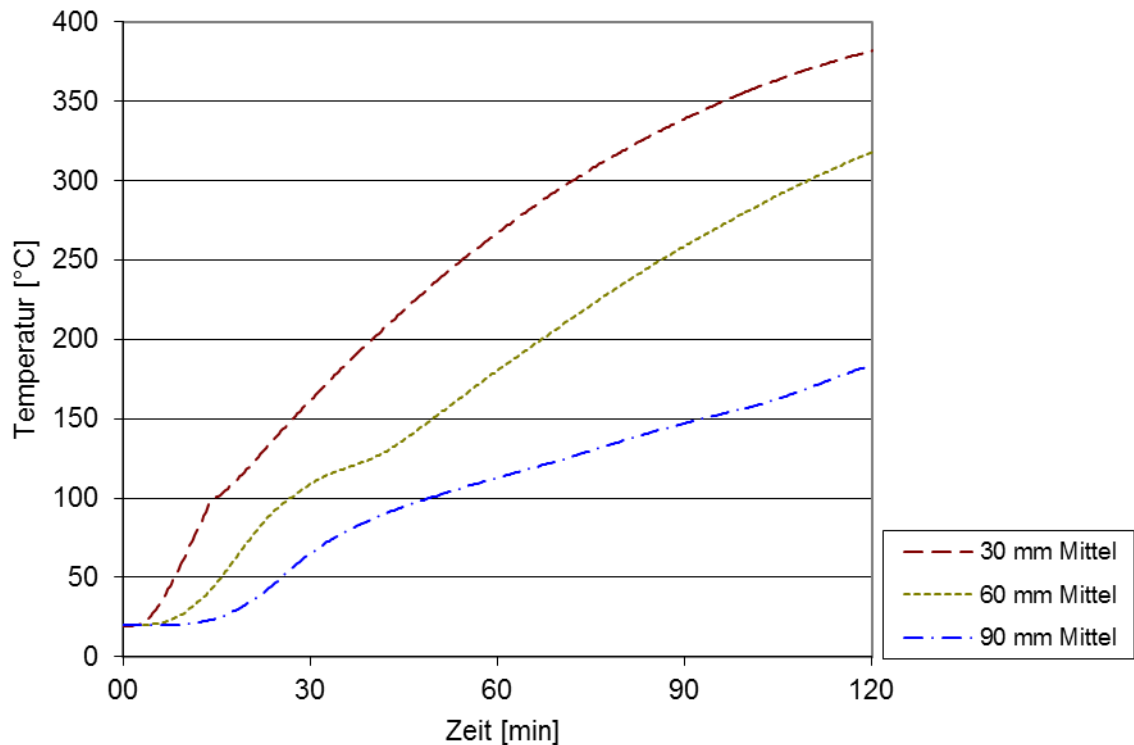


Abb. 68 Schichtdicke Beton / Temperatur in Abhängigkeit der Zeit bei Brandprüfung Beton nach RWS für 120 min [60]

Aus diesen Resultaten kann geschlossen werden, dass nach 120 min die Zersetzungstemperatur von Kunststoff-Macrosfasern in einer Schichttiefe von 6 cm als erreicht anzunehmen ist. Würde die gleiche thermische Belastung noch für weitere 120 min auf den Beton einwirken, würde sich diese Grenztemperaturschicht weiter nach innen verschieben. In einer Schichttiefe von 9 cm wird während 120 min Brandeinwirkung eine Temperaturdifferenz von 164 °C erreicht. Linearisiert (Verlauf ist in Wirklichkeit Sättigungskurve) ergibt das eine extrapolierte Temperaturerhöhung von 328 °C auf 348 °C innert 240 min. Zur Abschätzung welche Kunststoff-Macrosfaser-Menge von einem LKW-Brand innert 240 min betroffen sein kann, wird davon ausgehend eine maximale, bis zur Zersetzungstemperatur von Kunststoff-Macrosfasern erhitze, Betonschichtstärke von 10 cm angenommen. Dies würde einem extremen Brandereignis über 240 min entsprechen und sollte in der Realität nur in Ausnahmefällen auftreten. Somit ergibt sich mit der vom LKW-Brand betroffenen Tunneldeckenoberfläche (Annahme 120 m²), ein Betonvolumen von 12 m³. Bei einer maximalen Kunststoff-Macrosfaser-Dosierung von 8 kg/m³ ergibt das eine maximale zersetzte Menge Kunststoff-Macrosfasern von 96 kg.

9.2.3 Vergleich Schadgase Fahrzeugbrand und Kunststoff-Macrosfasern

Bei einem PW-Brand in einem Strassentunnel muss laut den obigen Überlegungen nicht davon ausgegangen werden, dass Kunststoff-Macrosfasern zusätzlich zum Fahrzeugbrand zersetzt werden. Es sind nur die Verbrennungsprodukte des Fahrzeugbrandes in der Tunnelatmosphäre vorhanden und stellen eine Gefährdung für ungeschützte Personen dar.

Bei einem LKW-Brand kann sich die Tunneldecke mit enthaltenen Kunststoff-Macrosfasern durchaus so stark erhitzen dass diese ebenfalls verbrennen. Im Berechnungsbeispiel für ein extremes Ereignis können bis zu 96 kg Kunststoff-Macrosfasern zusätzlich zum Fahrzeugbrand zersetzt werden. Die daraus resultierenden Zersetzungsprodukte (CO₂, CO, H₂O, C, Kohlenwasserstoffe) finden sich als Gase in der Tunnelatmosphäre wieder, sind aber als vergleichsweise unproblematische Brandgase zu betrachten. Dem gegenüber stehen mehrere Tonnen Kunststoff des LKW's

(Abschätzung ca. 6000 kg) die im gleichen Zeitraum verbrennen. Die Verbrennungsprodukte aus dem Fahrzeugbrand sind zusätzlich als vergleichsweise problematische Zersetzungsprodukte von Kunststoffen anzusehen. Beispielsweise beträgt der Anteil an stickstoffhaltiger Kunststoffe, die Blausäure (HCN) bilden können, bei Personenwagen ca. 40 %.

Ausgehend von diesen Betrachtungen kann ausgesagt werden, dass bei einem Fahrzeugbrand in einem Strassentunnel die emittierten Schadgase zu über 98 % vom Fahrzeugbrand selber und nur ein vernachlässigbarer Teil von bis 2 % von allenfalls zersetzten Kunststoff-Macromasern her stammt. Weiter ist zu bemerken, dass die Zersetzungsprodukte der Kunststoff-Macromasern als weniger gefährlich als durchschnittliche Zersetzungsprodukte aus Fahrzeugen einzustufen sind.

9.2.4 Tunnelventilation

Die Tunnelventilation ist bei modernen Tunneln ausreichend dimensioniert, um im Brandfall die heissen Verbrennungsgase eines PWs an der Tunneldecke zu verdünnen und abzukühlen. Bei einem LKW-Brand ist auch eine höhere Leistung hierfür nicht ausreichend und es kommt nach einiger Zeit zum Zersetzen von im Beton enthaltenen Kunststoff-Macromasern. Die daraus resultierenden Verbrennungsprodukte stellen von den Gesamtemissionen des Ereignisses, unabhängig von der Lüftungsleistung, nur einen unerheblich kleinen Teil dar.

10 Schlussfolgerungen/Empfehlungen

Die Einflussgrößen auf Rückprall und Faserrückprall stehen in vielfältigen Wechselwirkungen zueinander und können auch nicht in jedem Fall (z. B. Mischprozess an der Spritzdüse) gesteuert werden. Einflussfaktoren wie Düsenführung, Luftverbrauch, Förderleistung aber auch Beschleunigerdosierung sind wesentlich.

Bezüglich der Verwendungen von Kunststofffasern sind keine grundsätzlichen Unterschiede bei im Vergleich zur Referenz erkennbar bzw. belegbar. Kunststofffasern können bei den bisher üblichen Kurzzeitbelastungsprüfungen Energiabsorptionswerte erreichen, wie sie auf Baustellen heute vielfach gefordert sind. Die erreichbaren Werte sind vom Fasergehalt im Spritzbeton abhängig. Die Werte lassen sich nicht beliebig steigern, da sich mit zunehmendem Fasergehalt die Verarbeitbarkeit erschwert.

Die Prüfungen zum Langzeitverhalten unter Dauerlast erfolgten durch Beurteilung des Kriechverhaltens im Nachbruchzustand. Kunststofffaserspritzbetone unterscheiden sich in Abhängigkeit vom Fasertyp deutlich im Kriechverhalten. Je nach Anforderungen an den Baustoff Spritzbeton ist das Kriechverhalten vom Verbund Beton Fasern ein Parameter, der bei der Faserauswahl berücksichtigt werden sollte. Die entwickelten Prüfungen sollten im Rahmen von Eignungsprüfungen zur Anwendung kommen. Entsprechende Hinweise Verweise sollten in den nationalen Elementen zu den Normen für Polymerfasern (SN EN 14'889-2) angebracht werden.

Chemische Angriffe beeinträchtigen das Tragverhalten von Kunststofffaserspritzbeton nicht unmittelbar, teilweise werden Schädigungen der Betonmatrix festgestellt.

Rauchgasemissionen aus der thermischen Zersetzung von Kunststofffasern aus dem Beton stellen keinen relevanten Einfluss auf die Personensicherheit in Tunnelanlagen dar.

Für die Entscheidung welcher Fasertyp für eine bestimmte Anwendung gewählt werden soll, sind die Randbedingungen (Last, erwartete Deformation, chemische Einwirkungen) zur berücksichtigen.

Die Beurteilung der jeweiligen Prüfergebnisse sollte vor dem Hintergrund der gestellten Anforderungen erfolgen. Spritzbeton als erste Felssicherung soll teilweise Deformationen erlauben um einen Spannungsabbau im Gebirge zu erlauben. Aus diesem Blickwinkel können Kriechvorgängen allenfalls einen gewünschten Effekt darstellen.

Bezüglich der Korrosionsbeurteilung ist die Expositionszeit der offenen Risse gegenüber den angreifenden Medien zu beurteilen. Im Tunnelbau wird nach dem Abklingen von ersten Deformationen bald eine weitere Lage Spritzbeton aufgebracht. Bei der zweischaligen Bauweise wird der Tunnel nach dem Erstellen der Spritzbetonschalen abgedichtet und mit einem Innengewölbe versehen.

Demgegenüber sind einschalige Bauweisen mit einer reinen Spritzbetonschalen oder z.B. Böschungssicherungen in Spritzbetonbauweise mit Fasern anders zu beurteilen.

11 Ausblick

Die ausgeführten Untersuchungen erfolgten an Prüfkörpern wie sie üblicherweise für die Prüfung von Spritzbeton hergestellt werden. Dies impliziert auch eine Reduktion der Spritzleistung bei Herstellung der Spritzkiste gegenüber der Applikation auf der Fläche, die mit bis zu dreifach höheren Spritzleistungen erfolgt. Es ist zu vermuten, dass das Verhalten des Spritzbetons über Kopf ein anderes ist als an der vertikalen Wand in der die Spritzkisten hergestellt werden.

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 der Untersuchung wurde verschiedentlich die Frage der Übertragbarkeit der Resultate aus den vorliegenden Untersuchungen mit Spritzvorgängen mit hoher Leistung bzw. über Kopf-Applikation gestellt. Diesbezügliche Untersuchungen sind in der Literatur dokumentiert und auch den verschiedenen Fachgremien, die im Rahmen von den Untersuchungen kontaktiert wurden nicht bekannt.

Literaturverzeichnis

-
- [1] Wesche, K.: Baustoffe für tragende Bauteile. Band 1: Grundlagen, Band 2: Beton, Mauerwerk; 1996
-
- [2] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik: Richtlinie Faserbeton;
-
- [3] EFNARC, Guidelines to the Sprayed Concrete Specifications, 2000
-
- [4] SIA162/6, Stahlfaserbeton, 1999
-
- [5] R. Weyert, Korrosion von Stahlfasern in gerissenem und ungerissenem Stahlfaserbeton, Bauforschung, 1998
-
- [6] J.-L. Granju, S. U. Balouch, Corrosion of steel fibre reinforced concrete from the cracks, 2004
-
- [7] B. Maidl, Handbuch für Spritzbeton, Berlin 1992
-
- [8] B. Maidl, Stahlfaserbeton, Berlin 1991
-
- [9] G. Nitsiotas, Kriechen und Schwinden bei statisch unbestimmten Betonkonstruktionen aus mit Tragteilen aus Stahl, Berlin 2005
-
- [10] ITA- WG-12 (Spritzbeton) Meeting Notes, Budapest, 2009
-
- [11] E. Nordström "Durability of Sprayed Concrete", doctoral thesis. Llea university of technology, 2005:02/ISSN: 1402-1544
-
- [12] M. Clements, E. Bernard "The use of macro-synthetic fiber reinforced shotcrete in Australia", shotcrete, pp.20-22 (2004)
-
- [13] S. Austin, P. Robinson "Material and fiber losses with fiber reinforced prayed concrete", construction and building materials, Vol.11, pp.291-298 (1997)
-
- [14] N. Banthia, V. Bindiganavile "Process dependence of fiber reinforced shotcrete", RILEM Proceedings-36 (Spring Meeting) Advances in Concrete through Science & Engineering, Evanston, IL Mar 21-26, pp. 31-42 (2004).
-
- [15] H. Armelin, N. Banthia "Mechanics of aggregate rebound in shotcrete", Materials and structures, Vol.31, pp. 91-98 (1998)
-
- [16] H. Armelin, Steel fibre reinforced dry-mix shotcrete: Fibre orientation and its effect on mechanical properties. Proc. 4th Int. Symp. on Fibre reinforced Cement and Concrete, Sheffield UK, p. 266-276, 1992
-
- [17] V. Bindiganavile, N. Banthia "Effect of particle density on its rebound in dry-mix shotcrete", J. of materials in civil eng. 21, pp.58-64 (2009)
-
- [18] N. Banthia, J.-F. Trottier "Influence of fiber geometry in steel fiber reinforced wet-mix shotcrete", Concrete international, 16(6), pp.27-32 (1994)
-
- [19] N. Banthia, Trottier J.-F., Beaupré D. Steel fiber reinforced shotcrete: Comparisons with cast concrete. J. Mater. Civ. Eng.; 6(3): 430–437, 1994
-
- [20] E. Bernard "Creep of cracked fiber reinforced shotcrete panels", Shotcrete: More Engineering Developments, Taylor and Francis, London, pp. 47-57 (2004)
-
- [21] E. Bernard "Durability of cracked fibre reinforced shotcrete", Shotcrete: More Engineering Developments, Taylor and Francis, London, pp. 59-66 (2004)
-
- [22] E. Bernard "Embrittlement of fibre reinforced shotcrete. Shotcrete", Vol. 10, No 3, p. 16-21 (2008)
-
- [23] V. Bindiganavile, N. Banthia "Effect of particle density on its rebound in dry-mix shotcrete", J. of materials in civil eng. 21, pp.58-64 (2009)
-
- [24] V. Bindiganavile, N. Banthia "Fiber reinforced dry-mix Shotcrete with metakaolin". Cement and Concrete Composites, 23, p.503-514 (2001)
-
- [25] O. Cengiz, L. Turanli "Comparative evaluation of steel mesh, steel fibre and high performance polypropylene fibre reinforced shotcrete in Panel test". Cem Concr Res 2004;34:1357–64
-
- [26] B.B. Chaudhuri, G.P. Samanta "Elliptic fit of objects in two and three dimensions by moment of inertia optimization". Pattern Recog Lett 1991;12:1–7
-
- [27] M. Clements, E. Bernard "The use of macro-synthetic fiber reinforced shotcrete in Australia". In Shotcrete: More Engineering Developments, Taylor and Francis, London, Bernard, E.S. (ed), p.20–22 (2004).
-
- [28] J. Dufour, J. Trottier, D. Forgeron "Behaviour and performance of monofilament macro-
-

-
- synthetic fibres in dry-mix shotcrete". Proc. Shotcrete for Underground Support X, p.194-205 (2006)
-
- [29] U. Gossila, K.-A. Rieder "Zeitabhängiges Verhalten von Makrokunststofffaserbeton und dessen Einfluss auf die Bemessung von Industriefussböden" Beton- und Stahlbetonbau Heft2 S.76-87 (2009)
-
- [30] J.-L. Granju, S. U. Balouch "Corrosion of steel fibre reinforced concrete from the cracks" (2004)
-
- [31] P. Gupta, N. Banthia, C. Yan "Fiber reinforced wet-mix shotcrete under impact". J Mater Civ Eng ;12:81–90 (2000)
-
- [32] D. Hannant "Durability of polypropylene fibers in Portland cement-based composites:Eighteen years of data", Cement and concrete research, Vol. 28,No12, pp.1809-1817 (1998)
-
- [33] J. Kaufmann, M. Manser "Durability performance of bi-component polymer fibres under creep and in aggressive environments". Ground Support 2013, Potvin,Y. ; Brady, B. (eds), Australian Centre for Geomechanics, Perth, p.585-596 (2013)
-
- [34] J. Kaufmann, J. Lübben, E. Schwitter "Mechanical reinforcement of concrete with bi-component fibers", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 38, p.1975–1984 (2007)
-
- [35] J. Kaufmann, K. Frech, Ph. Schuetz, B. Münch „Rebound and orientation of fibers in wet sprayed concrete applications", Construction and Building Materials, 49, p.15–22 (2013)
-
- [36] D. Kim, H. Jung, K. Park, S. Kim "Long-term characteristics of shotcrete lining in test tunnel", geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation - Proceedings of the 2nd International Conference GEDMAR08 2008, pp. 853-859 (2008)
-
- [37] S. Lee, D. Kim, J. Ryu, S. Lee, J. Kim, H. Kim, M. Chi "An experimental study on the durability of hgh performance shotcrete for permanent tunnel support", Tunneling and underground space technology, volume 21, Issue 3-4, (2006)
-
- [38] G. Nitsiotas, Kriechen und Schwinden bei statisch unbestimmten Betonkonstruktionen aus mit Tragteilen aus Stahl, Berlin 2005
-
- [39] E. Nordström "Durability of Sprayed Concrete", doctoral thesis. Lleu university of technology, 2005:02/ISSN: 1402-1544 (2005)
-
- [40] E. Nordström "Experiences from 10-year field exposure of cracked steel fibre reinforced shotcrete", Spritzbetontagung Alpbach 2009
-
- [41] M.R. Teague "Image analysis via the general theory of moments". J Opt Soc Am ;70(8):920–30 (1980)
-
- [42] R. Weyert, Korrosion von Stahlfasern in gerissenem und ungerissenem Stahlfaserbeton, Bauforschung, 1998
-
- [43] S. Kurtz and Balaguru, P. Postcrack creep of polymeric fiber-reinforced concrete in flexure. Cement and Concrete Research.; Vol. 30 (2), p.183–190 (2000)
-
- [44] B. Tieke, Makromolekulare Chemie: Eine Einführung, VCH(1997)
-
- [45] U. Gossila, K.-A. Rieder "Zeitabhängiges Verhalten von Makrokunststofffaserbeton und dessen Einfluss auf die Bemessung von Industriefussböden" Beton- und Stahlbetonbau Heft2 S.76-87 (2009)
-
- [46] S. Lee, Kim D., Ryu J., Lee S., Kim J., Kim H., Chi M. An experimental study on the durability of high performance shotcrete for permanent tunnel support, tunneling and underground space technology, volume 21, Issue 3-4,(2006)
-
- [47] D. Kim, Jung H., Park K., Kim S. Long-term characteristics of shotcrete lining in test tunnel, geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation - Proceedings of the 2nd International Conference GEDMAR08 2008, pp. 853-859, (2008)
-
- [48] N. Banthia, Mindess S. Bringing science to an art: A decade of shotcrete research at the University of British Columbia, Shotcrete for Underground Support X - Proceedings of the Tenth International Conference on Shotcrete for Underground Support 215, pp. 30-45 (2006)
-
- [49] V.Bindiganavile, N.Banthia "Effect of particle density on its rebound in dry-mix shotcrete", J. of materials in civil eng. 21, pp.58-64 (2009)
-
- [50] M. Romer, Lienemann P. (1998) Versalzung und Korrosion von Spritzbeton (Sicherheitsstollen des Gotthard-Strassentunnels). Chimia 52: 197-201
-
- [51] C. Paglia, Wombacher F., Böhni H., Sommer M. An evaluation of the sulfate resistance of cementitious material accelerated with alkali-free and alkaline admixtures Laboratory vs. field. Cem. and Concr. Res. 32: 665-671,(2002)
-
- [52] R. Weyer, Korrosion von Stahlfasern in gerissenem und ungerissenem Stahlfaserbeton,
-

-
- Bauforschung, 1998
-
- [53] J.-L. Granju, Balouch S. U., Corrosion of steel fibre reinforced concrete from the cracks, 2004
-
- [54] E. Nordström, Durability of Sprayed Concrete, doctoral thesis. Llea university of technology, 2005:02/ISSN: 1402-1544, (2005)
-
- [55] D. Hannant, Durability of polypropylene fibers in Portland cement-based composites: Eighteen years of data. Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 12, p.1809–1817 (1998)
-
- [56] M. Clements and Bernard, E. The use of macro-synthetic fiber reinforced shotcrete in Australia. In Shotcrete: More Engineering Developments, Taylor and Francis, London, Bernard, E.S. (ed), p.20–22 (2004)
-
- [57] Grafiken von Frost & Sullivan auf www.chemanager-online.com (07.10.2015)
-
- [58] VdS 2516: 2000-12 (01), Kunststoffe: Eigenschaften, Brandverhalten, Brandgefahren (2000)
-
- [59] Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit – IBA, IBA-Info 3-99,
-
- [60] Prüfung Brandverhalten - VSH
-
- [61] STUVA – Institut für Strassenwesen Aachen: Vergleichende Untersuchung herkömmlicher Störfall- und Brandmeldesysteme mit neuen digitalen Auswertesystemen auf ihre Eignung zur schnelleren und sicheren Detektion von Stör- und Brandfällen in Strassentunneln; FE 03.344/2002/FRB, Zwischenbericht November 2003
-
- [62] Bundesamt für Strassen: Tunnel Task Force ; Schlussbericht 23. Mai 2000
-

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: 06.11.2015

Grunddaten

Projekt-Nr.: FGU 2010/005

Projekttitel: Langzeitverhalten von Kunststofffaserspritzbeton im Untertagebau

Enddatum:

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Ausgehend von Untersuchungen zum Applikationsverhalten von makrosynthetischen Kunststofffasern wurden im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen Prüfungen zur Beurteilung der mechanischen und chemischen Beständigkeit von Spritzbeton mit Kunststofffasern entwickelt und evaluiert. Diese Prüfmethode stehen in Relation zu den Eigenschaften welche die verwendeten Kunststoffe charakterisieren.

Zur Beurteilung des Spritzverhaltens hinsichtlich des Rückprall und der Faserorientierung wurden Applikationsversuche auf künstlichen Felsplatten durchgeführt. Mit den künstlichen Felsplatten wurden reproduzierbare Untergrundbedingungen geschaffen, die der Applikation auf dem unregelmässigen Felsuntergrund entsprechen. Es wurden unterschiedliche Kunststofffaserapplikationen und eine Referenzapplikation mit Stahlfasern verglichen.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass bei der Anwendung von makro-synthetischen Kunststofffasern prinzipiell keine anderen Aspekte als bei Stahlfasern zu berücksichtigen sind. Optimale Spritzrandbedingungen wirken sich primär auf den (Faser-)Rückprall und damit auf das Arbeitsvermögen des Spritzbetons aus. Die niedrigere Dichte der Kunststofffasern im Vergleich zu den anderen Komponenten des Spritzbetons kann allenfalls die Flugeigenschaften der Fasern bei der Applikation und damit die Orientierung im Spritzbeton beeinflussen. Die Faserorientierung wurde mittels eines röntgentomographischen Verfahrens an Bohrkernen aus gespritzten Platten einerseits in unmittelbarer Nähe zum Untergrund und andererseits in der Spritzbetonmasse untersucht. Erwartungsgemäss lässt sich eine Orientierung senkrecht zur Spritzrichtung feststellen, welche in der Regel auch gewünscht ist. Die Prüfung der statischen Kurzzeitfestigkeit (Energieabsorptionsvermögen) zeigt, dass mit geeigneter Dosierung der Kunststofffasern das angestrebte Arbeitsvermögen erreicht werden kann.

Die Dauerhaftigkeit von Kunststofffaser-Spritzbeton wurde an gebrochenen Prüfkörpern bezüglich chemischer Einwirkungen und Dauerlasteinwirkungen untersucht. Nur an gebrochenen (angerissenen) Prüfkörpern sind die Fasern den Umgebungsbedingungen ausgesetzt bzw. nehmen residuelle Lasten. Beim nicht gebrochenen Prüfkörper ist nur der Beton den äusseren Einwirkungen ausgesetzt und das Verhalten der Fasern kann so nicht geprüft werden.

Zur Beurteilung der chemischen Beständigkeit der Faserarmierung wurden die Prüfkörper im Freien einer natürlichen Bewitterung, einer Sulfatbeanspruchung, einer Säurebeanspruchung und einer Tausalzbeanspruchung ausgesetzt. Nach einem Jahr wurde die Resttragfähigkeit der Prüfkörper beurteilt. Hinsichtlich aller untersuchten Kunststofffasertypen ergaben sich, im Gegensatz zu Stahlfasern, keine Hinweise auf eine chemische Beschädigung der Fasern.

Die Kriechversuche zeigen signifikante Unterschiede bei den verschiedenen untersuchten Fasern, die aus den statischen Kurzzeitbelastungsprüfungen nicht erkennbar sind. Die statischen Dauerlasteigenschaften wurden in Kriechversuchen an Biegeprismen und Biegeplatten untersucht. Die Biegeprismen wurden vorbelastet und anschliessend mit bis zu 90% der residuellen Last beansprucht. Bei den Biegeplatten erwies sich eine Belastung von 50% der residuellen Last als angemessen für die Beurteilung. Die unterschiedlichen Belastungsniveaus begründen sich aus den unterschiedlichen statischen Tragsystemen.

Die Dauerhaftigkeitsprüfungen sind in jedem Fall in Relation zu den jeweiligen Anwendungsrandbedingungen wie Rissweiten und Exposition zu bewerten.

Im Brandfall werden die Kunststofffasern durch die Temperatureinwirkung zersetzt. Das Ausmass der Zersetzung ist von der Einwirktiefe des Brandes in die Betonstruktur abhängig. Die durch die Zersetzung der Kunststofffasern freigesetzten Schadgase betragen bei konservativer Betrachtung maximal 2% der Schadgase, welche alleine durch den Initialbrand, der zur Zersetzung der Kunststofffasern führt, freigesetzt werden. Die Zusammensetzung der Schadgase aus den Kunststofffasern ist weniger kritisch als ein typisches Brandgasgemisch, das sich aus Verbrennungsprodukten von unterschiedlichsten Materialien zusammensetzt.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Zielerreichung:

Mit der Entwicklung und Anwendung von Prüfungen zur Untersuchung des Dauerverhaltens von Kunststofffasern unter chemischer Einwirkung und Dauerlasteinwirkung wurden die primären Ziele des Forschungsprojektes erreicht.
Es wird gezeigt mit welchen Methoden Kunststofffasern für den Einsatz im Spritzbeton im Untertagebau - speziell bezüglich der Dauerhaftigkeitseigenschaften - beurteilt werden können.
Bezüglich der Applikation wurde durch Röntgenuntersuchungen gezeigt, dass sich die Fasern erwartungsgemäss senkrecht zur Spritzrichtung orientieren.
Bezüglich der Einflussparameter auf Gesamt- und Faserrückprall ist festzuhalten, dass keine Faktoren erkennbar sind, die im Hinblick auf die Anwendung mit Kunststofffasern speziell zu berücksichtigen sind. Der Faserrückprall steht in Relation zum Gesamtrückprall. Die Beeinflussung erfolgt für beide Parameter gleichermassen.
Mit der Umsetzung der primären Ziele ist der Weg geebnet, die sekundären Ziele wie vermehrten Einsatz von Kunststofffasern zur Reduktion von Emissionen zu ermöglichen.

Folgerungen und Empfehlungen:

Die entwickelten und erprobten Prüfungen zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Kunststofffasern sollten im Rahmen von Eignungsprüfungen bzw. Produktzulassungen angewendet werden. Entsprechende Hinweise sollten in den Nationalen Elemente zu den Normen für Kunststofffasern (z. B. EN 14'889-2 Fasern für Beton, Teil 2 Polymer-Fasern) angebracht werden.
Alle durchgeführten Prüfungen erfolgten unter den heute für Spritzbeton üblichen Randbedingungen, d. h. mit geringer Förderleistung und Applikation des Spritzbetons an vertikale Flächen. Es gibt verschiedene Indikatoren, die darauf schliessen lassen, dass eine Applikation mit hoher Förderleistung und/oder auf horizontale Flächen über Kopf zu anderen Resultaten führen. Die Relation der "Standardresultate" zu den Anwendungen mit anderen Randbedingungen sollten ermittelt werden, dass Prüfergebnisse richtig beurteilt werden können.

Publikationen:

Bisherige Publikationen beschränken sich auf Teilbereiche, bei denen erste Erkenntnisse aus dem Projekt mit der Tunnelfachwelt an Konferenzen der ITA und deren Arbeitsgruppen diskutiert wurden.

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Wetzig

Vorname: Volker

Amt, Firma, Institut: VersuchsStollen Hagerbach, CH 8893 Flums

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:

Trotz der Komplexität der untersuchten Problematik, die durch die Wechselwirkung von zahlreichen Einflussparameter bedingt ist, konnten wertvolle Ergebnisse erhalten werden. Die Begleitkommission teilt die Beurteilung der Versuchsergebnisse durch die Forschungsstelle sowie ihre Schlussfolgerungen bzügl. Zielerreichung.

Umsetzung:

Die Forschungsergebnisse können und sollen in künftigen Eignungsprüfungen von Kunststofffasern berücksichtigt werden.

weitergehender Forschungsbedarf:

Die Begleitkommission teilt die diesbezüglichen Aussagen der Forschungsstelle. Durch weiterführende Untersuchungen sollte die Aussagekraft der Prüfmethode für abweichende Applikationsbedingungen überprüft werden.

Einfluss auf Normenwerk:

Die Begleitkommission teilt die Empfehlung der Forschungsstelle, die im Rahmen des Forschungsprojekts entwickelten oder evaluierten Prüfmethode bei den Normen für die Kunststofffasern zu berücksichtigen.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Prof Anagnostou

Vorname: Georg

Amt, Firma, Institut: ETH Zürich, Professur für Untertagebau

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Das Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen kann unter www.astra.admin.ch /Dienstleistungen/Forschung im Strassenwesen/Downloads/Formulare heruntergeladen werden.