
DER EINSATZ VON KUNSTSTOFFMAKROFASERBETON IM TUNNELBAU UND SEINE TECHNISCHE UND WIRTSCHAFTLICHEN VORTEILE

TECHNICAL AND ECONOMICAL ADVANTAGES USING MACROFIBRE- CONCRETE IN TUNNELLING

Mathias **Schranz**, SKAVA Consulting ZT GmbH, Innsbruck, Österreich
Thomas **Marcher**, SKAVA Consulting ZT GmbH, Innsbruck, Österreich
Rudolf **Ramsauer**, BRUGG CONTEC, St. Gallen, Schweiz
Erich **Saurer**, SKAVA Consulting ZT GmbH, Salzburg, Österreich

Wurde zu Beginn der Faserbetontechnologie vermehrt die Stahlfaser im Untertage- und Tunnelbau für die Aufnahme von Zugspannungen eingesetzt, hat sich in den letzten Jahren bedingt durch neue Technologien und Herstellungsmöglichkeiten von Kunststofffasern in Kombination mit Beton / Spritzbeton vermehrt auch deren Einsatz als Ersatz der konventionellen Bewehrung durchgesetzt. Der vorliegende Artikel befasst sich mit dem Einsatz von Makrofaserbeton / Makrofaserspritzbeton im Tunnelbau. Dabei wird zum einen der Stand der Technik, die aktuelle Normenlage, die Nachweisführung der Kunststoffmakrofaserspritzbetonschalen, und zum anderen der Vergleich der Gleichwertigkeit von Kunststoffmakrofaser gegenüber einer klassisch bewehrten Spritzbetonschale betrachtet. Ebenfalls berücksichtigt werden in diesem Zusammenhang die wirtschaftlichen Aspekte.

For structural use, fibre reinforced concrete has commonly been associated with the use of steel fibres. Only in recent years, the use of plastic fibres as a structural member in shotcrete for tunnelling has increased. This fact is mainly caused by the use of novel fibre technologies and new technologies for fibre production. The paper presents the field of application of macro plastic fibres in shotcrete for tunnelling. After presenting the current state of practice followed by a short overview of the applicable codes and standards, the principles for the verification on macro fibre reinforced shotcrete lining are provided. Furthermore, a comparison with standard reinforcement is made. The paper ends with economic aspects regarding the use of fibre-concrete in tunnelling.

1. Faserbeton bzw. Faserspritzbeton im Tunnelbau

1.1 Einleitung

Die statisch verbessernde Eigenschaft von faserbewehrten Baustoffen wurde schon vor langer Zeit erkannt. Eine der größten, bekannten und noch bestehenden altertümlichen Anwendungen findet man etwa beim Minarett von Agadez im Niger (Afrika), welches gemäß mündlichen Überlieferungen zu Beginn des 16. Jahrhunderts erbaut worden sein soll. Der spitz zusammenlaufende rund 27 m hohe Turm mit herausragenden Stockbalken ist eines der berühmtesten Wahrzeichen im Niger, hergestellt aus einer Vermengung von Lehm, Mist, Stroh und Holz ([1] und [2]).

Eine Faser-Beton Kombination als Baustoff wurde u.a. gegen Ende des 19. Jahrhunderts in den USA verwendet, in dem Beton mit kleinen Stahlstücken und Stahlfasern verstärkt wurde.

Im deutschsprachigen Raum wurde der Einsatz der Stahlfaser gegen Ende der siebziger Jahre intensiviert.

Eine der ersten größeren Anwendungen, in welchen die Tragfähigkeit des Stahlfaserbetons im konstruktiven Ingenieurbau berücksichtigt wurde, stellen die rückverankerten Unterwasserbetonsohlen am Potsdamer Platz in Berlin vor rund 40 Jahren dar. Ziel war es, sowohl das Trag- und Verformungsverhalten, als auch das Rissverhalten des unbewehrten Betons zu verbessern. Die Stahlfaser diente hier als zusätzliche Sicherheit und floss nicht in die Bemessung ein (siehe [3] und [4]).



Bild 1: links: Minarett von Agadez (Quelle: <http://www.reisefahrten.de/reisebericht/afrika/>; © Peter Engelhardt) rechts: Unterwasserbeton mit Stahlfaserzugabe am Potsdamer Platz [1][3]

Die vermehrten Anwendungen von Stahlfasern führten gem. [5] dazu, dass sich der Absatz der Stahlfaser binnen zehn Jahren verzehnfacht hat und somit Einzug in den konstruktiven Ingenieurbau fand. Nachfolgendes Bild 2 zeigt die Anwendungsbereiche der Stahlfaser.

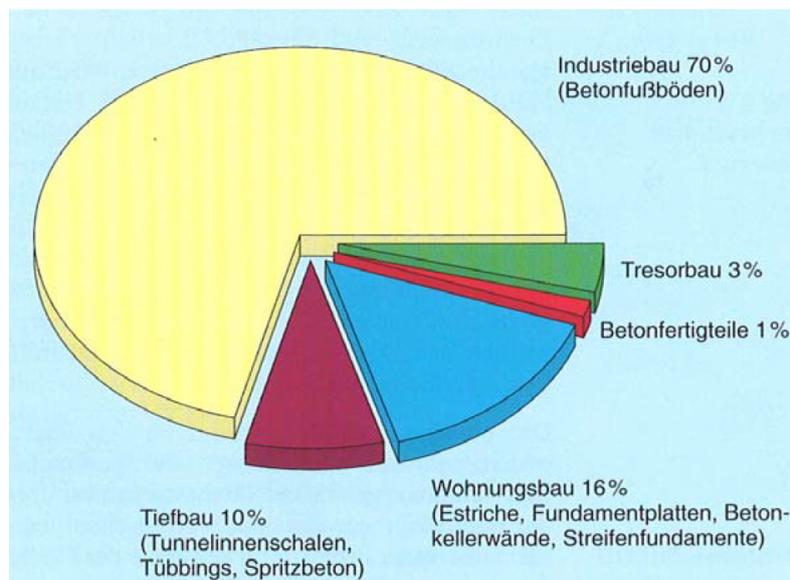


Bild 2: Anwendungsgebiete der Stahlfaser (in Deutschland gem. [5])

Wie aus dieser Abbildung hervorgeht, spielt der Einsatz von Fasern im Tunnelbau mit rund 10% noch eher eine untergeordnete Rolle. Bedingt durch neue Technologien, der mittlerweile vorherrschenden Akzeptanz und einer besser geregelten Normenlage dieses Verbundbaustoffes (und eben auch dem Einsatz von Kunststofffasern), finden sich mittlerweile jedoch auch hier vermehrte Anwendungen.

Betrachtet man die internationalen Entwicklungen, gehört z.B. in den USA (z.B. [6] und [7]) die Makrofaser-Spritzbetontechnologie zu den Standardlösungen für Tunnelaußenschalen und in Norwegen (z.B. [8] und [9]) werden bereits rund 80% der Spritzbetonschalen aus PP-Makrofasern hergestellt. Auch im internationalen Bergbau werden etwa in Australien und in Chile fast ausschließlich nur noch Makrokunststofffasern eingesetzt (siehe z.B. [10]). Durch den Einsatz von Fasern können speziell im Tunnelbau beschleunigte und optimierte Arbeitsabläufe erzielt werden, es wird eine frühzeitigere Aktivierung der Erstsicherung des Gebirges sichergestellt und die Gleichwertigkeit zu klassischen Stahlbetonlösungen wird entsprechend umsetzbar.

1.2 Begrifflichkeiten, mechanisches Verhalten und Einsatz im Tunnelbau

Aus Bild 3 kann eine generelle Übersicht über unterschiedliche Faserarten und deren Eigenschaften entnommen werden. Die Wirksamkeit bei Faserverstärkung hängt generell aber immer von mehreren wichtigen Parametern, wie Faserlänge, Oberflächenbeschaffenheit, Querschnittsform, E-Modul, Faserorientierung und Zugfestigkeit in der Faser-Matrix-Verbundfestigkeit (Verankerung im Beton) ab.

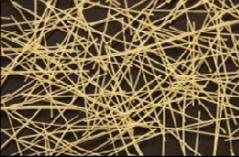
| Typ | Mikrofasern | | Makrofasern | Stahlfasern |
|---|---|---|--|---|
| |  |  |  |  |
| Art | <i>monofile Mikrofaser</i> | <i>fibrierte Mikrofaser</i> | <i>strukturierte Makrofaser</i> | <i>glatt, gewellt, genoppt und / oder mit Endhaken</i> |
| Zugfestigkeit [N/mm ²] | > 300 | 400 | 600 - 625 (best value in class) | > 700 |
| E-Modul [N/mm ²] | 4'000 | 4'900 | 11'000 (best value in class) | 210'000 |
| Gängige Dosierung [kg/m ³] | 0.9 | 1.0 | 2.5 | 25 |
| <i>Anmerkung: Die aufgelisteten Daten geben gebräuchliche Eigenschaftsangaben wieder. Je nach Produkt und Hersteller können diese jedoch abweichend von den aufgelisteten sein.</i> | | | | |

Bild 3: Faserarten und ihre Eigenschaften

Durch Faserbeimengungen wird das Verhalten des Betons verändert, das spröde Materialverhalten wird in ein duktileres Bruchdehnungsverhalten überführt. Dies geschieht zum einen durch die Lastübertragung von der Matrix auf die Fasern (s.g. pre-cracking) und zum anderen durch die Überbrückung entstehender Matrixrisse mit Fasern (s.g. post-cracking). Letzterer Effekt tritt vorrangig im fortgeschrittenen Belastungsstadium auf.

Die Eigenschaften des Betons werden dabei unter Druckbeanspruchung gering verändert / verbessert, die Steifigkeit und die Druckfestigkeit bleiben nahezu unverändert, jedoch ergibt sich im Nachbruchbereich ein erhöhtes Arbeitsvermögen.

Bei Zugbeanspruchungen wird speziell zwischen dem Zustand vor der Rissbildung bzw. der Erstrisszugfestigkeit und der Nachrisszugfestigkeit unterschieden. Generell ist dabei zwischen der Kurzzeitstandfestigkeit und der Langzeitstandfestigkeit zu unterscheiden.

Durch entsprechende Faserarten und Dosierungsmengen kann ein nachweislich erhöhtes Arbeitsvermögen des Betons erzielt werden, besonderes Augenmerk dabei muss jedoch auf das entsprechende Langzeitverhalten / Kriechverhalten gelegt werden.

Der Schwerpunkt des vorliegenden Beitrages liegt in der Beschreibung und Anwendung von Kunststofffasern im Tunnelbau. Somit werden nachfolgend deren Eigenschaften behandelt. Hinsichtlich der Kunststofffasern ist zwischen den Mikrofasern und den Makrofasern zu unterscheiden.



Bild 4: Vergleich Mikrofaser (links) zu Makrofaser (rechts)

Durch den speziellen Aufbau der hier beschriebenen Makrofasern (Bi-Komponenten Makrofaser mit unterschiedlichem Kern und Mantel; [11]) können diese das mechanische Verhalten des Betons maßgeblich verbessern. Es können Zug- und Biegezugkräfte aufgenommen werden und das Langzeitverhalten / Kriechverhalten wird gegenüber einer Mikrofaser maßgeblich verbessert. Speziell das Nachrissverhalten ist bei einer Polymer Makrofaser vorrangig, da die Faser auch nach dem ersten Bruch (Erstriss) eine lasttragende Wirkung erzielt und auch generell das Langzeitverhalten / Kriechverhalten verbessert. Dabei dürfen aber Polymer Makrofasern bei der Bemessung von tragenden, permanenten Bauteilen nach ÖVBB Richtlinie „Faserbeton“ [11] nur mit entsprechenden Nachweisen zur Langzeitfestigkeit (erfolgreicher Kriechtest mind. 1,5 Jahre) eingesetzt werden.

Bedingt durch den „einfachen“ Aufbau der Kunststoff-Mikrofasern werden diese (auch speziell im Tunnelbau) zu einem großen Teil zur Verbesserung des Brandwiderstandsverhaltens eingesetzt. Durch ihre Zusammensetzung und Wirkungsweise mit dem Beton werden speziell die Abplatzungen reduziert und es wird eine thermische Isolierung für die Bewehrung wirksam (siehe z.B. [12]). Für einen dauerhaften Einsatz (Langzeitverhalten) ist diese Faser jedoch eher nur beschränkt geeignet (Kriterien nach EN 14889-2 [21] für statische Zwecke können nur begrenzt erfüllt werden).

In Österreich ist die Anwendung von Faserbeton generell in der Richtlinie Faserbeton [13] (bzw. auch der Richtlinie für Spritzbeton [14]) geregelt. Tragende Bauteile können bei entsprechenden Voraussetzungen und Nachweisen der Tragsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit eingesetzt werden. Je nach Mischungsverhältnissen können im Kurzzeitversuch T- und G-Klassen, gemäß Richtlinie Faserbeton [13], erreicht und überschritten werden. Eine

Beurteilung des Langzeitverhaltens im Zustand II für einzelne Fasertypen (im besten Falle über einen Langzeitversuch) ist hierzu erforderlich, die Gleichwertigkeit mit Stahlfasern muss gegeben sein.

Eine Bemessung tragender Bauteile im Zustand II mit Kunststofffasern ist in dieser jedoch noch nicht verankert, da zum Erscheinungszeitpunkt der Richtlinie 2008 noch nicht die weiter entwickelten Technologien (sowohl in der Spritzbeton- als auch Fasertechnologie) vorhanden waren.

Derzeit wird diese Richtlinie überarbeitet, wobei eine entsprechende Bemessung von Faserbeton auf Grundlage internationaler Standards ausgearbeitet werden soll. Mit vorliegendem Beitrag wird eine mögliche Vorgehensweise für die Bemessung von Spritzbetonschalen mit Kunststoffmakrofasern erläutert.

2. Technische Vorteile von Kunststoffmakrofasern im Tunnelbau

2.1 Technische Vorteile samt Anwendungsgrenzen allgemein

Die technischen Vorteile von Kunststoffmakrofaserbeton im Tunnelbau können sehr vielfältig sein, beginnend bei verschiedenen Optimierungsmöglichkeiten für den Vortrieb wie z.B. die Optimierung von Spritzbetonstärken samt Ankerraster, oder die Erhöhung der Vortriebsleistungen bis hin zu sicherheitstechnischen Vorteilen wie z.B. einer schnelleren Tragfähigkeitsleistung oder ein erhöhtes Brandwiderstandsverhalten. Gegenüber anderen Faserarten, welche auch ähnliche Optimierungsmöglichkeiten aufweisen können, ist speziell gegenüber diesen die einfache Verarbeitung und Anwendung (keine besonderen Anforderungen an die Baumaschinen wie z.B. den Spritzmanipulatoren, besser bekannt als „Spritzbüffel“) hervorzuheben.

Der Einsatz von Kunststoffmakrofasern unterliegt jedoch diverser Anwendungsgrenzen, welche projektspezifisch festzulegen sind. Z.B. wird bei einem temporären Ausbau die Kurzstandfestigkeit betrachtet und Umwelteinflüsse und Brandeinwirkung spielen nur eine untergeordnete Rolle. Bei einem permanenten Ausbau hingegen muss entsprechend die Dauerhaftigkeit nachgewiesen werden.

Wichtige Faktoren dabei sind z.B.:

- (Spritz-) Beton- und Faser- Güte und Qualität
- Faserdosierung und Arbeitsvermögen
- Leistungs- und EG-Konformitätsbestimmungen
- Mindestschalendicken
- Umwelt- und Brandeinflüsse
- Wasserbeständigkeit und Wasser-Aggressivität

2.2 Normensituation im Tunnelbau

Nach einer expliziten Vorgabe, wie eine Spritzbetonschale im Tunnelbau nachgewiesen werden muss, sucht man in den Normenunterlagen vergeblich. Der EC7 [15] enthält z.B. keine inhaltlichen Angaben bzgl. einer möglichen Bemessung im Tunnelbau. Auch im EC2 [16] kommt kein Kontext mit dem Begriff „Tunnel / Tunnelbau“ vor. Durch die von Projekt zu Projekt, wenn nicht schon innerhalb einer Tunneltrasse, wechselnden geologischen und geomechanischen Randbedingungen, sowie weiteren unterschiedlichen Rahmenbedingungen wird eine „einheitliche“ Regelung / Vorgehensweise stark eingeschränkt.

Gleiches trifft auch auf den Faserbeton bzw. speziell den Kunststofffaserbeton in Bezug auf Tunnelbau zu. Jedoch kann hier eine Anwendung für überwiegend auf Druck belastete Bauteile in der Richtlinie [13] festgelegt werden. Es ist jedoch in dieser kein Be-

messungsvorgang der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit für den Zustand II für Makrofaserbeton geregelt. In der Richtlinie Faserbeton [13] sind Anhaltswerte / Grenzwerte der Erstriss- und Nachrissfestigkeiten enthalten, welche für die Bemessung maßgeblich sind. Diese sind jedoch auf der konservativen Seite angegeben. Genauere Annahmen und Angaben dieser Bemessungswerte sind in Abstimmung mit den Erfahrungen der Hersteller, basierend auf Testreihen, meist deutlich höher.

In Österreich sind für den Tunnelbau folgende Normen von großer Relevanz:

- ÖNORM EN 1990 [17] und [18]
- ÖNORM EN 1991 [19]
- ÖNORM EN 2 [16]
- ÖNORM EN 7 [15]
- ÖNORM EN 206 [20]
- ÖNORM EN 14889-2 [21]
- ÖBV-Richtlinie Spritzbeton [14] und Faserbeton [13]

International gesehen sind in Bezug auf Faserbeton folgende Richtlinien von großer Bedeutung:

- EFNARC Richtlinie [22]
- ACI Report on Fiber Reinforced Concrete [23]
- fib Model Code [23][24]
- ITA TECH 342 [25]
- RILEM TC 162 [26]

2.3 Ein mögliches Nachweiskonzept von Kunststoffmakrofaserbeton im Tunnelbau

2.3.1 Unterteilung der Anwendungsbereiche bei zyklischen Vortrieben

Generell wird im konventionellen Tunnelbau bei der Nachweisführung der Standsicherheit der Tunnelschale zwischen einem temporären Ausbau, welcher i.d.R. mittels Spritzbeton und weiteren Stützelementen wie z.B. Anker und Spieße erfolgt, und einem permanenten Ausbau unterschieden.

Bei einem temporären Ausbau ist i.d.R. neben der Standsicherheitsanforderung keine erhöhten Gebrauchstauglichkeits- und Dauerstandfestigkeitsanforderungen notwendig (wie z.B. Rissbreitenbeschränkungen). Auch Umwelteinflüsse und Brandeinwirkungen spielen lediglich eine untergeordnete Rolle.

Ein permanenter Ausbau wird i.d.R. mittels einer klassischen Ortbetoninnenschale, welche nachträglich nach dem temporären Ausbau hergestellt wird (diese wird in den folgenden Abschnitten jedoch nicht betrachtet) umgesetzt.

Eine weitere Möglichkeit bietet auch die einschalige Bauweise. Diese werden als permanente Tunnelschalen i.d.R. auch mittels Spritzbeton mit erhöhten Anforderungen realisiert. Dabei muss die Dauerstandfestigkeit unter Berücksichtigung aller für den Endzustand möglichen Lastfallkombinationen (Brand, Verkehrs- / Anpralllasten, etc.) nachgewiesen werden, sowie das langfristige Verformungsverhalten betrachtet werden.

2.3.2 Methodik für die Nachweisführung

Die Kunststoffmakrofaser-Tunnelschalenbemessung wird in Anlehnung an die Bemessungsansätze einer unbewehrten Innenschale gemäß [27] und folgender Methodik / Vorgehensweise angewendet:

- a) *Numerische Analyse (FEM-Berechnung) zur Ermittlung / Ableitung der Gebirgslast am Tunnelprofil und zum Nachweis der Gleichwertigkeit (siehe hierzu auch Punkt d).*
- b) *Verwendung der abgeleiteten Gebirgslast zur Nachweisführung des Gesamtsystems für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) und den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) mittels eines gebetteten Stabwerkzuges im Zustand II für den Faserspritzbeton.*
- c) *Detailnachweis am Betonquerschnitt für die maßgeblichen Normalkraft-Biegemoment-Kombinationen nach [13].*
- d) *Nachweis der Gleichwertigkeit des Makrofaserbetons bezüglich einer konventionell bewehrten Tunnelschale.*

Zu Punkt a): Die FEM-Berechnung dient zur Nachweisführung für den Einsatz von Makrofaserspritzbeton. Mittels den FEM-Analysen werden die vorherrschenden Gebirgslasten auf die Spritzbetonschale ermittelt und abgeleitet, welche dann bei den folgenden Stabwerksberechnungen (siehe Punkt b) zum Nachweis des Faserbetons erforderlich sind. Je nach Komplexität können hierzu 2D oder 3D Finite-Elemente Berechnungsmodelle mit entsprechend geeigneten Stoffgesetzen zum Einsatz kommen.

Die Gebirgs-, Ausbruchs- und Ausbaumodellierung sollte so gewählt werden, dass die Interaktion zwischen dem Gebirge mit der Tunnelschale möglichst realistisch abgebildet werden kann. Weiter dienen die Ergebnisse der FEM-Berechnungen auch zur Darstellung der Gleichwertigkeit (siehe Punkt d).

Zu Punkt b): Für die Stabwerksberechnung im Zustand II soll ein in radialer und tangentialer Richtung gebetteter, ebener Stabzug eingesetzt werden. Die radiale Bettung soll dabei nur bei einer Verschiebung hin zum Gebirge / Boden aktiviert werden (ausfallende Zugbettung), mit der tangentialen Bettung soll eine realistische Schubkraftübertragung zwischen Gebirge und Spritzbetonschale abgebildet werden. Die radiale Bettung K_R der Schale ermittelt sich unter Berücksichtigung des Steifemoduls E_S und der Querdehnzahl des Gebirges/Bodens sowie der Systemlinie mit dem entsprechenden Radius ($K_R = E_S / R$). Als tangentialer Bettung K_T wird ein Drittel der radialen Bettung angesetzt.

Die Lasten und Einwirkungen/Widerstände samt Sicherheitsbeiwerten sind entsprechend den Projektrandbedingungen auf das System aufzubringen und zu analysieren. Die Bemessung des Gesamtsystems für die faserbewehrte Schale erfolgt in Anlehnung an Saurer [27], wobei für die Berechnung direkt die Arbeitslinien des faserbewehrten Spritzbetons berücksichtigt werden müssen.

Für das Erstrissverhalten ist die charakteristische Biegezugfestigkeit entscheidend, welche gem. [13] mittels entsprechenden Biegezugfestigkeitsklassen geregelt ist. Das Nachrissverhalten für die Faserbetonklassen T und G wird anhand charakteristischer äquivalenten Biegezugfestigkeiten unter Einhaltung der vorgegebenen Faserdosierung bestimmt (iterativer Vorgang!). Für die Nachweisführungen ist die äquivalente Biegezugfestigkeit in eine charakteristische Restzugfestigkeit (Nachrissverhalten) umzurechnen bzw. sind entsprechende Bemessungswerte („Anhaltswerte“ auf der konservativen Seite) für die „T-Klassen“ und für die G-Klassen angegeben. Diese sind entscheidend für die Bemessung der Tunnelschale und müssen (im besten Fall) basierend auf vorliegenden Materialversuchsergebnissen bzw. gemäß den Mindestvorgaben aus der Richtlinie [13] eingegeben werden. Dabei sind die T- und G-Klassen iterativ zu untersuchen bis die Nachweise erbracht werden können (weitere Details hierzu siehe auch [27]). Die in der Richtlinie [13] beispielhaft dargestellt Arbeitslinie gibt eine Kombination der Festigkeitswerte für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) und der Gebrauchstauglichkeit (GZG) wieder. Für die nichtlinearen

Nachweise am Gesamtsystem wird die Arbeitslinien im vorliegenden Fall für Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit gesondert festgelegt. Aus den durchgeführten Berechnungen werden (getrennt für GZT und GZG) die maximalen Zugdehnungen und Zugspannungen (für die jeweiligen Lastfallkombinationen) in ein Nachweisdiagramm in Anlehnung an Saurer [27] aufgetragen und daraus die Faserbetonklassen entsprechend der Richtlinie [13] gewählt / überprüft und somit die Anwendung des Faserbetons für das Gesamtsystem nachgewiesen (iterative Vorgehensweise).

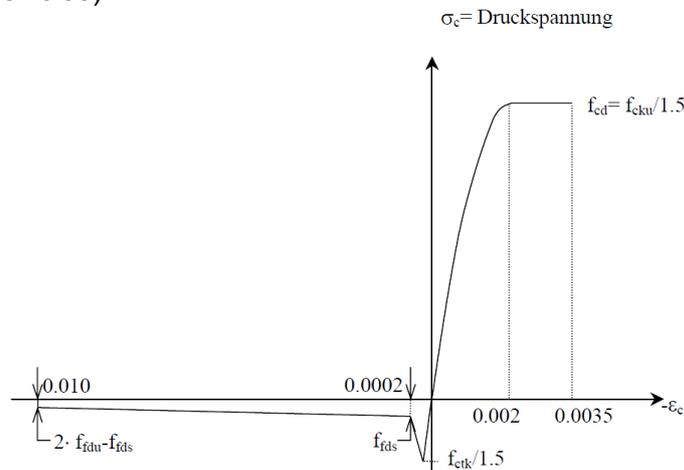


Bild 5: Spannungs-Dehnungslinie für Faserbeton für nichtlineare Berechnungen gem. [13]

Zu Punkt c): Die Nachweisführung am (einzelnen) Betonquerschnitt erfolgt mittels der ermittelten Schnittkräfte aus der Berechnung vom Gesamtsystem und dem Momenten-Normalkraft Interaktions-Diagrammes gemäß Richtlinie [13]. Liegen die zusammengehörigen Schnittkraft-Kombinationen innerhalb der entsprechenden Umhüllungslinien des Interaktionsdiagrammes, ist der Nachweis für den Einzelquerschnitt erbracht.

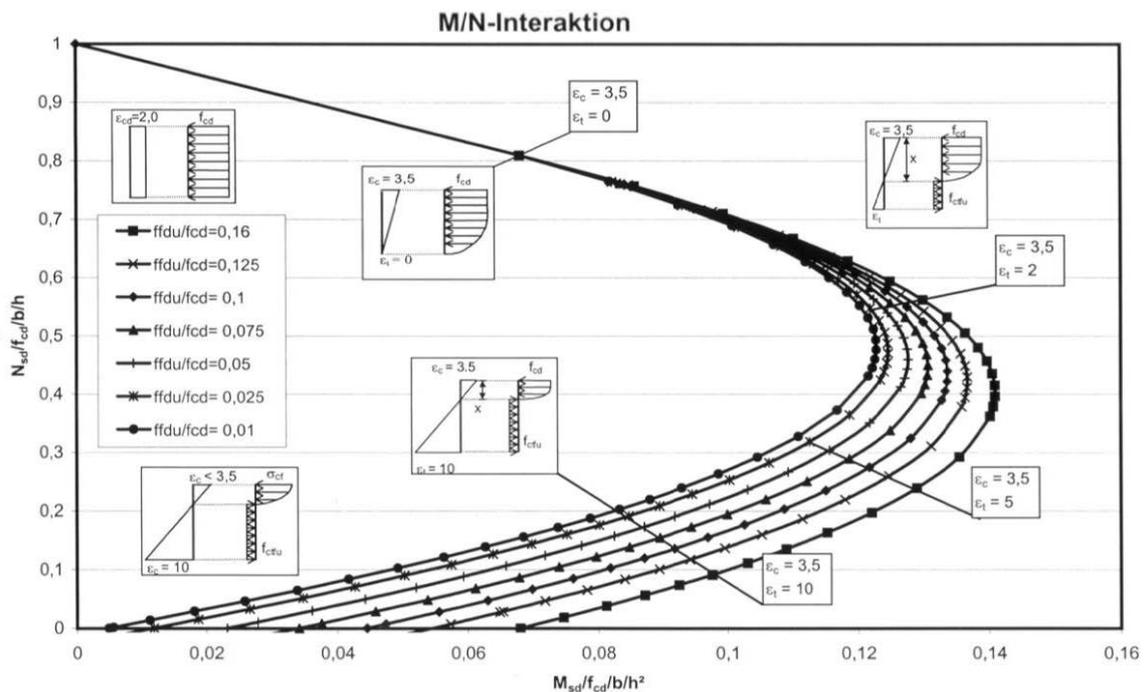


Bild 6: Spannungs-Dehnungslinie für Faserbeton für nichtlineare Berechnungen gem. [13]

Zu Punkt d): Um eine gewisse Gleichwertigkeit der Faserspritzbetonbemessung gegenüber einer herkömmlichen Betonbemessung zu bekommen, sollen die Tunnelschalenschnittkräfte aus Punkt a) mit einer „Standardbemessung“ gemäß EC2 [16] betrachtet werden (Nachweis über ein entsprechendes M-N Interaktionsdiagramm). Die erforderliche konventionelle Bewehrungsmenge wird mit der ermittelten Fasermenge verglichen und bewertet.

Auch sollen die auftretenden Normalkräfte der Tunnelschale aus der FE-Berechnung und der Stabwerksberechnung verglichen und bewertet werden.

2.4 Beispiel für eine temporäre Spritzbetonschale im Tunnelbau

2.4.1 Randbedingungen

Die Geometrie des untersuchten Regelquerschnittes und die Gebirgsparameter samt Randbedingungen für das FE-Rechenmodell können aus nachfolgender Grafik (Bild 7) entnommen werden. Für den betrachteten Abschnitt wurde anhand des Gebirgs- und Systemverhaltens eine 20 cm starke Spritzbetoninnenschale (C25/30) mit 4 m langen SN-Mörtelankern (rd. 8 Stück über den Querschnitt verteilt) als temporärer Ausbau abgeschätzt. Das Profil, welches in Kalotte und Strosse unterteilt wird, hat eine offene Sohle und der Kalottenausbruch wird mit einer Abschlagslänge von rund. 1,3 bis 1,7 m angenommen.

Dabei wird die Software Plaxis 2D [28] mit 15 knotigen Kontinuums-Elementen verwendet, das Gebirge wird mittels dem Versagenskriterium nach Mohr-Coulomb (drainiert) modelliert, zwischen Tunnelschale und Gebirge wird ein Interfaceelement für die entsprechende Interaktion eingefügt. Die Kalotte wird mit rund 75% und die folgende Strosse mit rund 30% vorentspannt. Der Ausbruch wird sequenziell im Rechenmodell abgebildet.

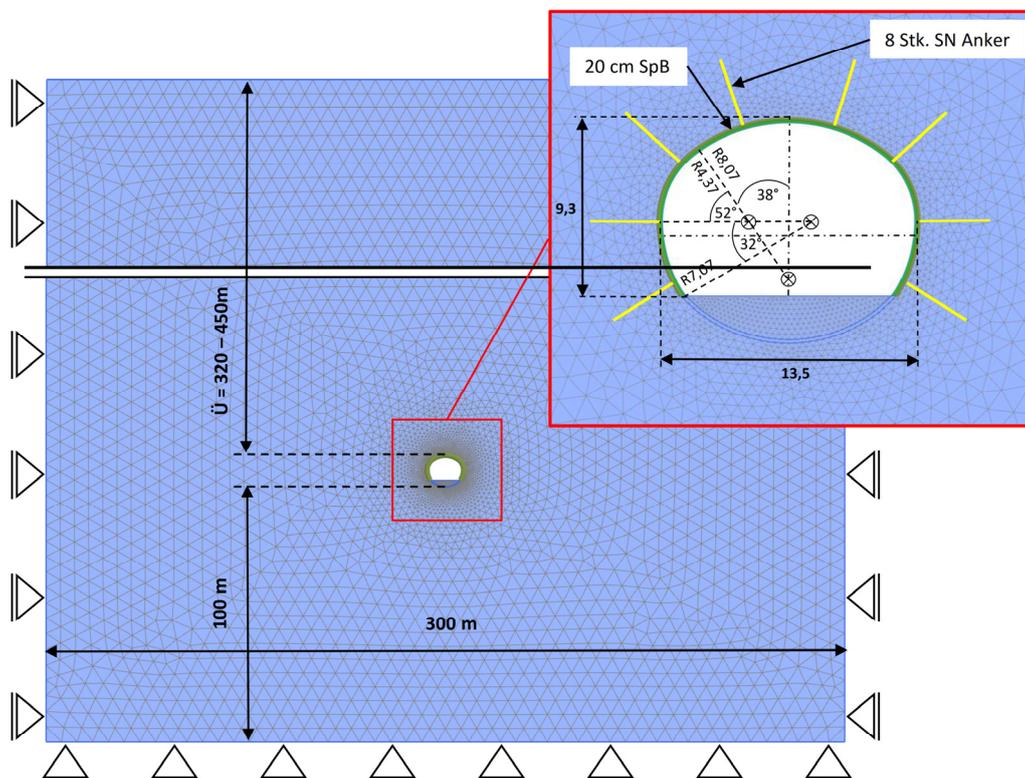


Bild 7: Geometrie Regelquerschnitt und Gebirgsparameter für Untersuchungsbeispiel

2.4.2 Abgeleitete Gebirgslast und Nachweis am Gesamtsystem

Aus der oben beschriebenen FE-Berechnung wird die anzusetzende Gebirgslast ermittelt, welche bei der Stabwerksberechnung entsprechend als Lastfall (LF2) angesetzt wird - vergleiche hierzu nachfolgendes Bild 8.

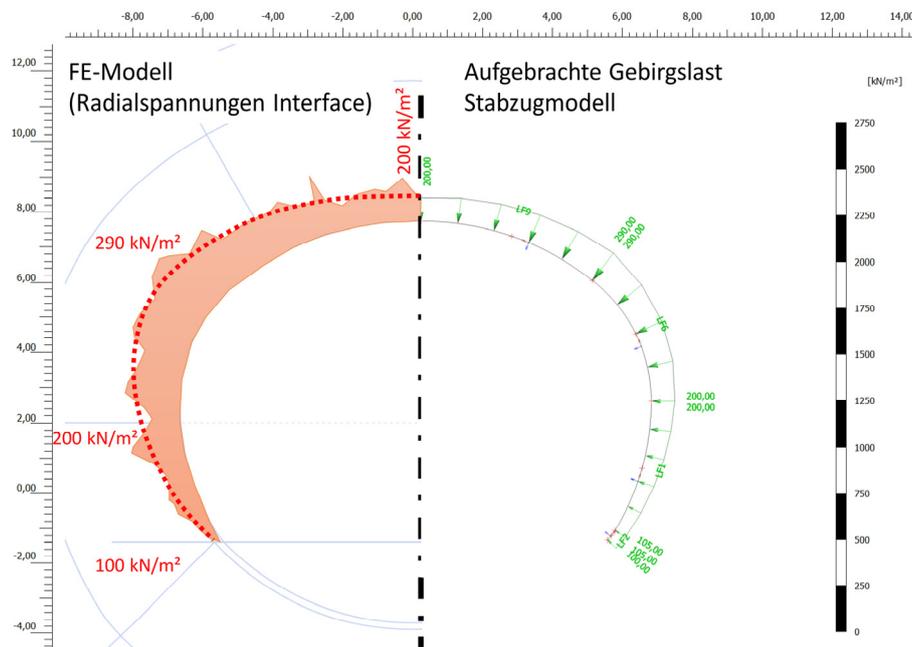


Bild 8: Abgeleitete Gebirgslast - links: abgeleitete Gebirgslast aus FE-Berechnung – und rechts: angesetzte Gebirgslast im Stabwerksprogramm

Weiter werden für das Beispiel des temporären Ausbaus noch die Lastfälle Eigengewicht (LF1; mit einer spezifischen Wichte von 25 kN/m^3) und Kriechen / Schwinden (LF3; in Form einer Temperaturabkühlung von rund $-9,6^\circ\text{K}$ berücksichtigt) des Betons angesetzt. Aus den Lastfällen ergeben sich für den temporären Ausbau dann in Summe 2 betrachtete Lastfallkombinationen (LFK) – LFK1 mit Berücksichtigung von LF 1 und 2 und LFK2 mit Berücksichtigung aller drei Lastfälle (LF1, LF2 und LF3).

Die Bettungsmoduli liegen je nach Radius in radialer Richtung mit ausfallender Zugbettung zwischen $750\text{--}2225 \text{ MN/m}^2$ und in tangentialer Richtung zwischen $250\text{--}740 \text{ MN/m}^2$. Es wird eine Betonfestigkeitsklasse C25/30 mit einer charakteristischen Biegezugfestigkeit (BZ) von $4,5 \text{ N/mm}^2$ für das Erstrissverhalten mit $f_{\text{tk,fl}} = 3,2 \text{ N/mm}^2$ angesetzt. Das Nachrissverhalten für die Faserbetonklassen T und G wird anhand charakteristischen äquivalenten Biegezugfestigkeiten unter Einhaltung der vorgegebenen Faserdosierung bestimmt. Für das Beispiel wird eine Nachrisszugfestigkeit für die T5 Klasse von $f_{\text{rd,u}} = 0,52 \text{ N/mm}^2$ und für die G5 Klasse mit $f_{\text{rd,s}} = 1,14 \text{ N/mm}^2$ angesetzt. In den Arbeitslinien auf Bemessungsniveau (GZT) werden die Betondruckfestigkeiten f_{cd} , sowie die Biegezugfestigkeit $f_{\text{tk,fl}}$ mit einem Teilsicherheitsfaktor von $\gamma_c = 1,5$ abgemindert, und das Nachrissverhalten unter Berücksichtigung der T-Klassen angesetzt.

Für die Berechnungen auf Gebrauchstauglichkeitsniveau (GZG) wird die nichtlineare Arbeitslinie nach ÖNORM EN 1992-1-1, Bild 3.2 [16] mit der mittleren Betondruckfestigkeit als Maximalwert und die Biegezugfestigkeiten gemäß der Richtlinie Faserbeton ohne Abminderung berücksichtigt. In dieser Berechnung wird die Nachrisszugfestigkeit gemäß der

entsprechenden G-Klasse angesetzt. Diese Arbeitslinien können Bild 9 entnommen werden. Die Stabwerkberechnungen werden mit der Software SCIA ENGINEER [29] durchgeführt.

Da die erforderlichen Sicherheiten in den nichtlinearen Berechnungen berücksichtigt werden, gelten die Nachweise als erfüllt, insofern in den Berechnungen in allen Lastfallkombinationen ein zulässiger Spannungs- und Verformungszustand erreicht wird und die Berechnung im Zustand II konvergiert. Die Ergebnisse für den Grenzzustand der Tragfähigkeit können aus Bild 9 entnommen werden.

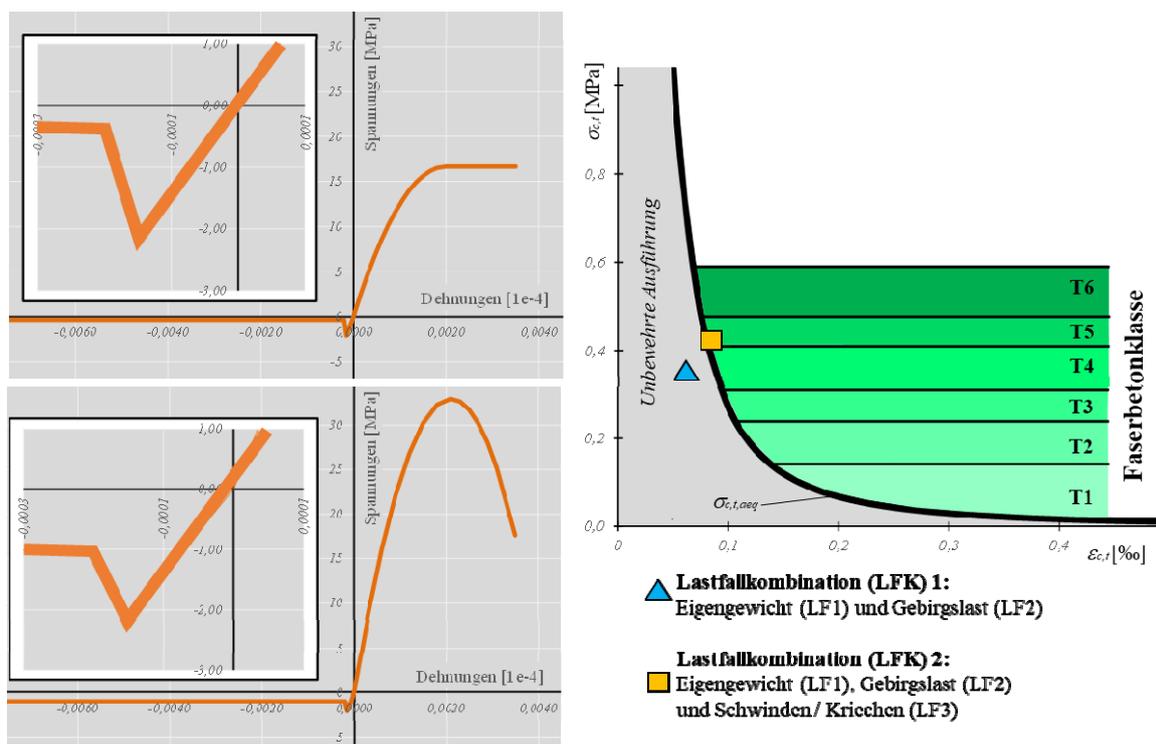


Bild 9: Angesetzte Arbeitslinien Beton (links) und Nachweis am Gesamtsystem GZT (rechts)

Bei den Untersuchungen für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit werden ergänzend noch die Verformungen / Verdrehungen betrachtet, diese sind mit rund 12 mm bzw. 4 mrad in einem üblichen Bereich und verträglich für den Ausbau.

2.4.3 Nachweis am Betonquerschnitt und Bestätigung der Gleichwertigkeit

Wie unter Punkt 2.3.2 c) beschrieben, kommt für den Nachweis am Betonquerschnitt das Interaktionsdiagramm aus der Richtlinie Faserbeton [13] zum Einsatz, auch wenn die Nachweisführung vorher schon unter Einhaltung der zulässigen Grenzdehnungen erfüllt ist (Nachweis / Überprüfung der Gleichwertigkeit).

Dieses ist in nachfolgendem Bild 10 dargestellt. Ihm ist zum Vergleich der Gleichwertigkeit der eingesetzten Fasern auch ein klassisches Interaktionsdiagramm gem. EC2 [16] mit den Schnittkräften aus der FE-Berechnung für eine klassisch bewehrte Spritzbetonschale gegenübergestellt. Wie nun ersichtlich wird, befinden sich die Schnittkraftkombinationen innerhalb der Umhüllungslinien und womit einerseits der Nachweis für den Einsatz der Faser am Betonquerschnitt erbracht ist, als auch eine entsprechend gleichwertige Auslastung beider Systeme (Faserspritzbeton und eine klassische Variante) gegeben ist.

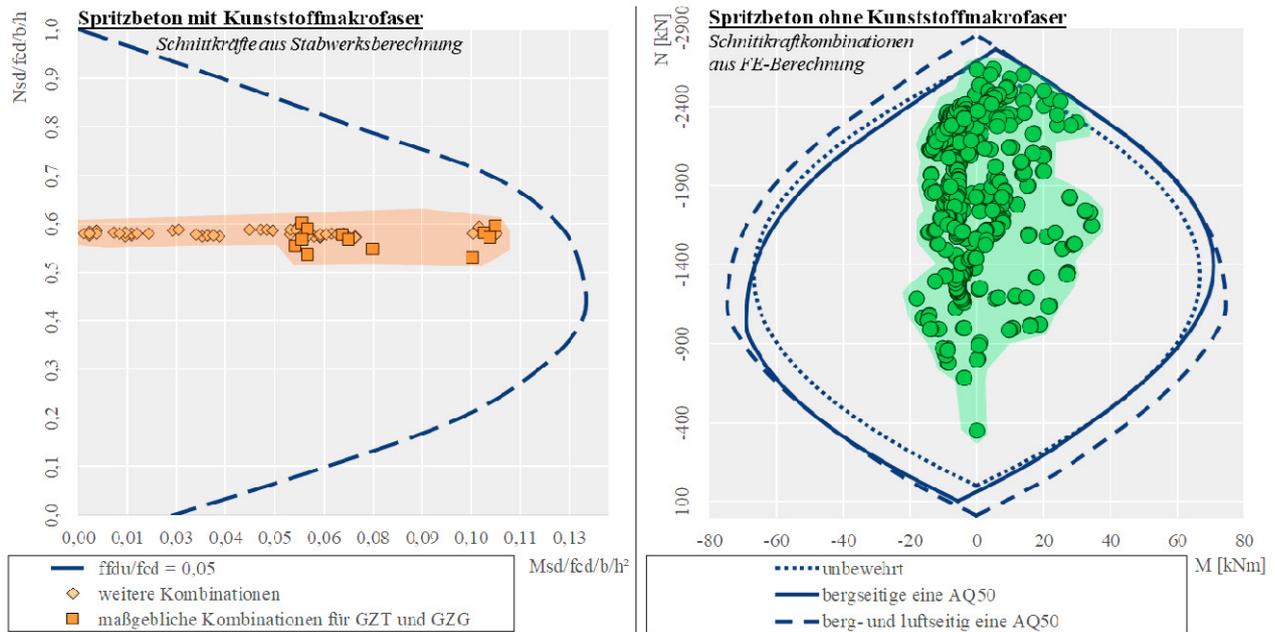


Bild 10: Nachweis am Betonquerschnitt (links) und Nachweisdiagramm mit klassischer Bewehrung (rechts)

2.4.4 Zusammenfassung

Wie anhand des Beispiels aufgezeigt wird, können durch den Einsatz von Makrofaserspritzbeton bei gleicher Stärke höhere Traglastreserven zu einer konventionellen Bewehrung erzielt werden. Durch entsprechende Faserdosierungen kann auch ein deutlich höheres Arbeitsvermögen bzw. Energieabsorptionsvermögen als mit „klassischem“ Spritzbeton erzielt werden. Je nach Faserart und Dosierung sowie Spritzbetonrezeptur können diese bis zu ≥ 800 Joule ($\sim T5/G5$ Klasse) reichen.

Die Vorteile sind also vielfältig, sie müssen nur entsprechend genutzt und planerisch umgesetzt werden.

3. Wirtschaftliche Vorteile von Kunststoffmakrofaser im Tunnelbau

3.1 Wirtschaftliche Vorteile allgemein

Durch den Einsatz von Makrokunststofffasern können allgemein wirtschaftliche Vorteile in Hinblick auf die Logistik (wie z.B. die Transportkosten von Fasern auf die Baustelle, welche wesentlich geringer sind als für eine klassische Stahlbewehrung), auf die Anwendung und Umsetzung (wie z.B. die einfache Faseranwendung gegenüber aufwendigen Stahlbindearbeiten; die Faser wird direkt in den Beton / Spritzbeton gemischt und es ist kein separater Arbeitsschritt für die Eisenverlegung erforderlich), auf vereinfachte / verbesserte Arbeitsabläufe und schnellere Traglastmobilisierung sowie auch auf umwelttechnische Aspekte resultieren.

3.2 Wirtschaftliche Vorteile im Tunnelbau

Speziell für den Tunnelbau können große wirtschaftliche Vorteile erzielt werden. Nachfolgend werden mögliche Einsparungspotentiale beim Vergleich einer klassisch bewehrten zu einer faserbewehrten Spritzbetonschale für in der Praxis übliche Spritzbetonschalendicken und -bewehrungsgraden aufgezeigt.

Die Daten aus Tabelle 1 beziehen sich auf eine Vielzahl von Informationen und Vergleichswerten von Bauunternehmungen aus diversen Projekten und sollen eine näherungsweise Gegenüberstellung illustrieren sowie den Einsatz von Faserspritzbeton auch aus der wirtschaftlichen Seite hervorheben.

Tab. 1: Vergleich Spritzbetonkosten mit konventioneller Bewehrung und Faserbewehrung

| Spritzbeton-schalendicke | Zyklischer Sprengvortrieb | | Makrofaserspritzbeton | Einsparungspotential Faserspritzbeton zu konventioneller Ausführung in [%] |
|--------------------------|---|-----------------------------------|---|--|
| | Bewehrung [cm ² /m] | Kosten (x) [€/m ²] | Fasermenge (xx) [kg/m ²] | |
| 10 | AQ50 (einlagig; 1,96 cm ² /m) | rd. 10 – 13 | rd. 0,46 – 0,50 | rd. 30 - 45 |
| 15 | AQ50 (einlagig; 1,96 cm ² /m) | rd. 12 – 14 | rd. 0,70 – 0,74 | rd. 30 - 40 |
| 20 | AQ60 (zweilagig; 5,66 cm ² /m) | rd. 16 – 18 | rd. 0,90 – 0,98 | rd. 38 - 43 |
| 25 | AQ60 (zweilagig; 5,66 cm ² /m) | rd. 18 - 20 | rd. 1,14 – 1,24 | rd. 33 - 38 |

Anmerkungen: (x) ... inkl. Gerätekosteneinsatz, Arbeitskosten (Verlegung der Bewehrung), und Materialkosten (Spritzbeton und Bewehrung), jedoch ohne Transportkosten auf Baustelle
(xx) ... Bei 4,5 kg/m³ Faserzugabe inkl. 6 % Rückprall Spritzbeton

4. Weitere Anwendungsmöglichkeiten von Makrofaserbeton im Tunnelbau

Neben den beschriebenen Beispielen für einen klassischen Sprengvortrieb im Tunnelbau kommt Faserbeton im Tunnelbau für viele weitere Anwendungen zum Einsatz. So können z.B. diverse Hilfsbauwerke wie z.B. Auflagersockel für TBM-Vortriebe bis hin zu Tübbing für kontinuierliche Tunnelvortriebe hergestellt werden.

Für den Einsatz dieser faserbewehrten Bauwerke bedarf es jedenfalls einer gewissen Offenheit und Faszination für „neue“ Technologien bei allen Projektbeteiligten, vom Auftraggeber, über das Bauunternehmen, bis hin zu den Planern und Behörden.

5. Zusammenfassung

Vorliegende Veröffentlichung zeigt die technischen und wirtschaftlichen Vorteile der kunststoffmakrofaserbewehrten Bauwerke im Tunnelbau auf. Hiermit liegt eine neue und interessante Alternative zu herkömmlichen Ausführungsmethoden vor.

Wie bereits in vielen Ländern weltweit wird auch in den deutschsprachigen Ländern diese Technologie für den Tunnelbau Einzug halten.

6. Literatur

- [1] Nagel, I.:
Das nigrische Tor zur Wüste, Zeit Online, Link: <http://www.zeit.de/1987/10/das-nigrische-tor-zur-wueste/komplettansicht?print>, Zeit Nr. 10/1987, aktualisiert 21.11.2012.
- [2] Wikipedia:
Artikel „Agadez“, Link: <https://de.wikipedia.org/wiki/Agadez>

- [3] Kalleja, H.:
Spannweite der Gedanken, Festschrift zum 60. Geburtstag von Professor Dr.-Ing. Manfred Specht. ISBN 978-3-642-71963-9, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1998.
- [4] Falkner, H.; Henke, V.:
Stahlfaserbeton: konstruktive Anwendungen. In: Beton- und Stahlbetonbau 95(2000), Heft 10, S.597-607.
- [5] Thienel, K.-Ch.; Kustermann, A.:
Sonderbetone – Faserbeton, Skriptum der Bundeswehr Universität München, 2010.
- [6] Carlson, J.E.; Wotring, D.C.; Auber, R.J.; Vitale, M.G.:
Synthetic-Fiber Reinforcement for the Cast-in-Place Final Tunnel Liner at the Euclid Creek Tunnel Project. In: Proceedings: Rapid Excavation and Tunneling Conference, June 7-10, 2015, New Orleans, LA, pp. 882-889.
- [7] Ireland, T.J.; Stephenson, S.:
Design and Construction of a Permanent Shotcrete Lining – The A3 Hinhead Project. Shotcrete: More Engineering Developments. In: Bernard, E.S. (ed.), CRC Press, Boca Raton, FL, 2010, pp. 143-152.
- [8] Barton, N.; Grimstad, E.:
The Q-System Following Thirty Years of Development and Application in Tunneling Projects. Rock Engineering – Theory and Practice. In: Proceedings of the ISRM Regional Symposium EUROCK 2004, Salzburg, Austria, 2004, pp. 15-18.
- [9] Winterberg, R.; Nitschke, G.:
In-Service Performance of Macrosynthetic Fiber-Reinforced Tunnel Linings, Goin' Underground. Shotcrete, 2015, pp. 48-53.
- [10] Gonzalez, M.; Kitson, M.; Mares, D.; Muir, N.; Nye, E.; Schroeter, T.:
The North Strathfield Rail Underpass – Driven Tunnel Design and Construction. In: 15th Australian Tunneling Conference 2014, Sydney, Australia, Sept. 17-19, 2014, pp. 369-374.
- [11] Brugg Contec AG:
Datenblatt und Leistungserklärung Makrofaser Concris (<http://www.bruggcontec.com/>)
- [12] Glatzl, J.; Nischer, P.; Steigenberger, J.; Wagner, O.:
PP-Faserbeton für erhöhte Brandbeständigkeit, Untersuchungen zu dessen Wirksamkeit und Ermittlung des Polypropylen-Fasergehalts am Faserbeton. Zement+Beton, 3/2004, pp. 24-31.
- [13] ÖVBB – Richtlinie Faserbeton:
Wien, Ausgabe Juli 2008.
- [14] ÖVVB – Richtlinie Spritzbeton:
Wien, Ausgabe Dezember 2009.
- [15] Eurocode 7 (EC7): OENORM EN 1997-1:2009 und OENORM B 1997-1-1:2010:
Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik, Teil 1: Allgemeine Regeln samt nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen.
- [16] Eurocode 2 (EC2): OENORM EN 1992-1-1:2011 und OENORM B 1992-1-1:2011:
Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau samt nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen.
- [17] OENORM EN 1990: 2006:
Grundlagen der Tragwerksplanung.
- [18] OENORM B 1990-2:2017:
Grundlagen der Tragwerksplanung – Brückenbau.
- [19] OENORM EN 1991:2007:
Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 7, Außergewöhnliche Einwirkungen.
- [20] ÖNORM EN 206 und 206/A1:
Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, Ausgabe Dezember 2014 und Änderung Oktober 2010.
- [21] ÖNORM EN 14889-2
Fasern für Beton Teil 2: Polymerfasern – Begriffe, Festlegungen und Konformität, Ausgabe Oktober 2006.
- [22] EFNARC:
Europäische Richtlinie für Spritzbeton, 1997.
- [23] ACI:
Report on Fiber Reinforced Concrete: Reported by ACI Committee 544.

- [24] Fib Model Code:
Model Code for Concrete Structures, 2010.
- [25] ITA:
ITA Tech 342 FRCPS Guideline Version 11
- [26] RILEM TC 162-TDF:
Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. Materials and Structures, Vol. 36, October 2003, pp. 560-567.
- [27] Saurer, E. et al.:
Ein Bemessungskonzept für unbewehrte und faserbewehrte Tunnelinnenschalen. Beton- und Stahlbetonbau 106, Heft 6, 371-376, 2011.
- [28] PLAXIS 2D 2016:
FE-Software (www.plaxis.nl)
- [29] SCIA ENGINEER:
Stabwerks- und Finite Elemente Software (www.scia-software.de)

Zu den Autoren

Dipl.-Ing. (FH), Ing. Mathias Schranz

Spezialist auf boden- und felsmechanische sowie tragwerktechnische Fragestellungen mit über 12 Jahre Erfahrung bei nationalen und internationalen Projekten im Bereich Geotechnik, Untertage- / Tunnelbau, Damm- / Erdbau und konstruktivem Ingenieurbau.

ms@skava.at

Ing. Rudolf Ramsauer

War über 20 Jahre in einem größeren Bauunternehmen als Bau- und Niederlassungsleiter im Bereich Brücken- und Straßenbau tätig. Seit den 90iger Jahren ist er für die Schweizer Gruppe Brugg im Bereich der Betonfasertechnologie tätig.

Rudolf.Ramsauer@bruggcontec.com

Dr.-Ing. Thomas Marcher

Über 20 Jahre nationale und internationale Erfahrung in der Projektabwicklung in allen Planungsphasen und Ausführung von komplexen Projekten, mit Schwerpunkt von geotechnischen / tragwerksplanerischen und numerischen Fragestellungen.

tm@skava.at

Dipl. Bau-Ing. Dr. sc. ETH Erich Saurer

Verfügt über einen großen Erfahrungsschatz bei nationalen und internationalen Projektabwicklungen. Arbeitet hauptsächlich in den Fachgebieten Geotechnik, Tunnel- und Spezialtiefbau, speziell auch bzgl. der Nachweisführung von unbewehrten und faserbewehrten Bauteilen.

es@skava.at