

Kurzbeschreibung des F&E-Kooperationsprojektes (Entwurf 7. 7. 15)

Nano2FilamentBeton:

HPC optimiert mit CNTs und nano-strukturierten Zement, mit und ohne Faserverstärkung.

Kurzzusammenfassung der Projektbeschreibung für Zuwendungsantrag jedes Partners

Ziel ist die Entwicklung eines dichten Betons, um mit Kurzfilament-Verstärkung der Betonmatrix und auch lastaufnehmenden Endlosfaser-Verstärkungen (Matten, Stäbe) gewichts-, festigkeits-, bruchzähigkeits- und verschleiß-optimale höchstbeanspruchte Bauteile hoher Lebensdauer zu erzeugen. Dazu verhilft weiter, neben der Verwendung von speziell aktivierten CNTs, die Verwendung nanostrukturierter Zements infolge Verwendung von Hüttensand. Beim Projekt aktiviert Zoz den Hüttensand sowie trockendispergiert CNTs und erstellt die Betonmatrixformulierung zusammen mit Uni-A und KLB. KLB übernimmt die Mischung der Komponenten und die Herstellung der benötigten NormProbekörper. Uni-A erstellt, prüft und analysiert KleinProbekörper im Rahmen der Matrix-Labor-Optimierung. Kalchschmid legt den Demonstrator aus und fertigt ihn und erarbeitet die Matrix-Feld-Optimierung. Die TU-M ermittelt relevante Festbetoneigenschaften an Referenzproben, entwickelt Bemessungsansätze und verifiziert diese mit Probekörpern Bauteilversuchen. Assoziierte Partner unterstützen mit Know-how, Lieferung verschied. Faserprodukte, Zement und evtl. 3D-Tests.

Innovation: Quasi-isotroper einzelfaser-verstärkter Beton

Begriffe und Abkürzungen

CEM (EN 197): Normalzement, DIN 1164. Zementarten CEM I (Portlandzement), CEM II (Portlandhüttenzement etc.); 52.5 R : Druck-Festigkeitsklasse

CF, rCF: Carbon Fibre, recycled CF

CNT: Carbon Nano Tubes (Verwendung einschaliger CNTs im Projekt)

HPC: Hochleistungsbeton = High Performance Concrete. Für die Herstellung von HPC werden nach dem Stand der Technik zumeist Portlandzemente verwendet, die 95-100 % Klinker enthalten.

UHPC: Ultra High Performance Concrete mit $f_c > 150$ MPa

Bemessungsmodell: Berechnung und Berechnungskonzept für die Tragkonstruktion

Beton: Stein aus einem Gemisch aus einem Bindemittel und einer Gesteinskörnung, der nach entsprechender Wasserzugabe zum Abbinden und eventuell von Fließmitteln aus der ausgehärteten Betonmatrix entsteht

Bindemittel: üblicherweise Zement

Faser: unterschiedlich benutzter Begriff. Kann in der Textilherstellung auch Garn, Faden oder Roving sein

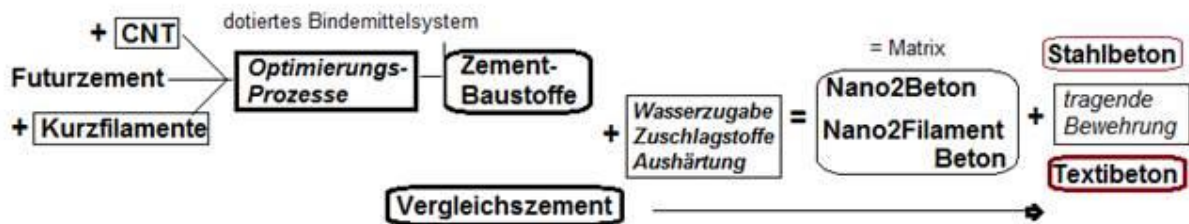
Faserbündel: In Anlehnung an die Bezeichnung von Garnen werden Bündel aus einzelnen Fasern, sogenannte Rovings, mit der Garnfeinheit tex benannt. Je größer die Tex-Zahl ist, desto höher ist das Längengewicht der Faserbündel. Ein Roving von 4800 tex wiegt zum Beispiel 4,8 g je Meter. Besonders bei Kohlenstofffasern hat sich die Bezeichnung nach der Anzahl der Filamenten durchgesetzt. Ein z. B. 48 k Roving im Bauwesen besteht dementsprechend aus 48000 Filamenten. Über die Dichte der Faser lässt sich die Tex-Zahl in die Anzahl der Filamente überführen

Faser-Rezyklat: Werkstoff mit einer Faserlängenverteilung, Abminderung der Eigenschaftswerte (viele Tausende t CF fallen jährlich an. Jährliche CF-Produktion entspricht 4 min Stahlproduktion!)

Faserschlichte: Schutzüberzug für die Verarbeitung von Fasern. Sie wird teilweise nach der Verarbeitung wieder entfernt. Die Schlichte kann auch als Haftvermittler zwischen Faser und Matrix dienen. Dazu muss jedoch die Schlichte auf das entsprechende Matrixsystem abgestimmt sein. Fasern mit einer Epoxydschlichte (Silanschlichte) sind nur eingeschränkt in Thermoplasten einsetzbar. Ein haftvermittelnder Auftrag kann die Faser-Matrix-Haftung erheblich steigern.

Roving, Garn, Faden: Bündel von Einzelfasern

Matte: hier Bewehrungsmatte (fiber-grid), analog zu Stahlstäben nun aus Roving-Stäben hergestellt
Nano2FilamentBeton: Die Ziffer 2 drückt aus, dass zwei nanoskalige Werkstoffe verwendet werden. Wort Filament kennzeichnet besser, dass dispergierte einzelne Fasern in der Mischung verteilt sind
Kurzfaser: < 10 mm (Spritzgusstechnik), **Langfaser:** < 50 mm (nicht in allen Bereich so abgegrenzt)
 Festigkeit des Betons: von Interesse sind Frühfestigkeit (auf Druck- und Zug) wegen möglichst früher Belastbarkeit und Endfestigkeit (28Tage), sowie Festigkeit nach Alterung
Filament: endlos lange Einzelfaser, auf Spulen
Matrix: Mehrphasensystem, dessen Rezeptur im Projekt bzgl. seiner Inhaltsstoffe optimiert wird
Recycling: erzeugtes nutzbares Produkt, das weiter verwertet werden kann.



Einleitung

Das übliche Einbringen von geschnittenen Rovings mit Zigtausenden von aneinander haftenden Einzelfasern im Bündel schafft Störstellen und verhindert dadurch eine wesentliche Verstärkung der Betonmatrix. Im Rahmen des Projektes Nano2FilamentBeton wird diesen Störstellen begegnet, indem man die kurzen Rovingschnittstücke mit speziellen Verfahren in der vorgesehenen Trockenrezeptur so dispergiert, dass nach dem Aushärten eine möglichst homogene räumliche Verteilung der Einzelfasern in der Betonmatrix gegeben ist. Hiermit wird – ohne dass bereits eine spezielle Bewehrung eingelegt werden muss – den immer im Bauteil auftretenden Spannungskonzentrationen eine höhere Zugfestigkeit gegenüber gestellt und damit die Mikroriss-Neigung aufgrund des inhärenten Spröbruchverhaltens verringert, sowie das Arbeitsvermögen gesteigert.

Dabei wird die hohe Druckfestigkeit eines hüttensandhaltigen Hochleistungsbetons mit der Bezeichnung ‘FuturBeton‘ (Matrixrezeptur der Fa. Zoz) genutzt, um diesen mit der hohen Zugfestigkeit von dispergierten kurzen Einzelfasern und Carbon Nanotubes zu kombinieren und weiter zu steigern.

Nach dem ‘Stand der Technik‘ setzt sich die ausgehärtete Betonmatrix von Hochleistungsbetonen aus Zement, Grobkorn in Form von Sand, Kies und Splitt, Feinkorn, meistens Mikrosilika und Flugasche, und Wasser mit Fließmittel zusammen (Abb 1).

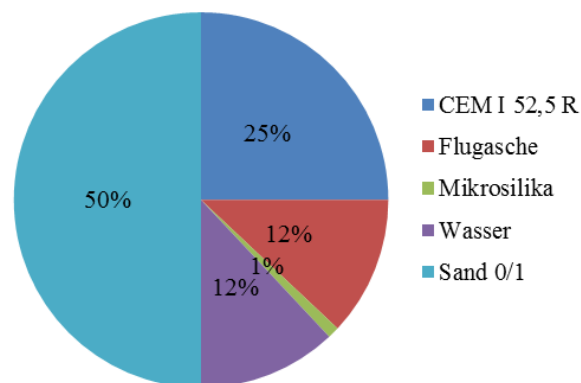


Abb. 1: Beispielhafte Zusammensetzung eines Hochleistungsbetons

Als Fasern werden die bekannten Hochleistungs-Carbon-Fasern (CF ca. 25 €/kg, rCF ca. 13 €/kg) eingesetzt und nach weiterer Klärung bzgl. der Alkaliresistenz (Zirkonoxid-Schutz

notwendig) eventuell auch die preiswerte Basalt-Faser (BF) (ca. 2 – 8 €/kg). Aktuell verfügbare Basalt-Fasern werden mittlerweile in qualitativ besseren Prozessen hergestellt und besitzen nunmehr eine für die Auslegung notwendige kleinere Streuung in den mechanischen Eigenschaften.

Für flächige und einachsige höchstbeanspruchte Bauteile werden lieferbare Faser-Grids und Faser-Stäbe eingesetzt. Die Herstelltechnik beim assoziierten Partner Fraas liegt für Carbonfasern vor. Für Basaltfasern fehlen allerdings noch Herstellungserfahrungen.

Die Verwendung von CNTs in Baustoffen bewirkt eine gewisse Mikrobewehrung und trägt somit zu höheren Festigkeiten und im weiteren Verlauf zu einer erhöhten Dauerhaftigkeit bei, bedingt durch die verringerte Rissbildung [Kow05]. Die Biegezugfestigkeit von CNT-bewehrten zementbasierten Baustoffen konnte teilweise um 20% und mehr gesteigert werden [Kow04]. Dabei wirken die CNTs im zementären System wie Template und Kristallisationskeime, auf denen die Hydratationsprodukte des Zements während der Hydratation entstehen [Wei12]. Dadurch wird ein Beschleunigungseffekt erzielt und die Dichte der zementbasierten Matrix nimmt zu. Dieses erhöht die Festigkeit. Es gibt verschiedene Arten von CNTs basierend auf ihrem strukturellen Aufbau. Von besonderem Interesse für bautechnische Anwendungen sind hierbei die **preiswerteren mehrwandigen** CNTs (MWCNTs ??). Diese liegen als Pulver in Agglomeraten vor und müssen vor der Anwendung in Baustoffen zunächst dispergiert werden. Dabei wird **nach dem Mahlen** zwischen Trocken- und Nassdispergierung unterschieden. Die Dispergiertechnologie ist für die Nutzbarmachung von CNTs für bautechnische Anwendungen von hoher Relevanz. **Die Kosten für 1kg SCNTs (einwandig) betragen ??? € und für MCNTs (mehrwandig) ???€**

Neben der Verwendung eines aktivierten nano-strukturierten hüttensandhaltigen Zements ermöglicht die Verwendung von CNT-Material eine optimierte, reine Hochleistungs-Betonmatrix mit hoher Frühfestigkeit. Eingebrachtes CNT-Material muss jedoch funktionalisiert werden. Dabei wird die Wirkung von CNT in Bezug auf Keimbildungsprozesse hydraulisch aktiver Zementphasen untersucht und die Grenzfläche von CNT iterativ chemisch modifiziert, um entsprechende Effekte zu erhalten. Eine optimierte Sieblinie erzeugt die gewünschte dichte Betonmatrix.

Ziel und Innovationsgehalt des Projektes

Ziel dieses Projekts ist die Entwicklung eines optimierten Hochleistungsbetons für höchste statische und dynamische Beanspruchungen wie z. B. bei Maschinenfundamenten, Beton-Fertigteilen wie gegossenen Stützen, Abwasserrohren, Fassadenplatten, Bahnschwellen und Trafohaus-Bauteilen, mit und ohne Kurz-Filament-Verstärkung oder auch Armierung mit Matten.

Als Festigkeitswerte werden angezielt:

Die Entwicklung eines neuen mineralischen Komposits mit deutlich höherer Lebensdauer als derzeitige stahlbewehrte Betone ist also das Hauptziel des Projekts. Dazu sollen verschiedene funktionalisierte Fasern und CNTs dispergiert und in eine Betonmatrix eingebunden werden, so dass der fertige Komposit eine signifikant erhöhte Leistungsfähigkeit aufweist. Durch eine optimierte Kombination der über Funktionalisierung angepassten Fasern und der Kohlenstoffnanoröhrchen sowie deren Dispergierung sollen die mechanischen Eigenschaften verbessert werden. Parallel dazu sollen verschiedene Kohlenstofffasern mit unterschiedlichen Schichten und geeigneten Zugfestigkeitskombinationen in den jeweiligen Systemen erprobt werden, um zu einer hinsichtlich statischer und dynamischer Festigkeit optimalen Zusammensetzung des Komposits zu gelangen. Unterstützt werden die Entwicklungen durch eine verbesserte Prüfmethodik mit begleitender Modellierung zur Bewertung des Verhaltens im fertigen Bauteil.

Faserverstärkung ist ferner eine Möglichkeit, die Lebensdauer der Bauwerke zu erhöhen und ferner die Instandhaltungskosten zu senken. Das von der Zug- oder der Biegezugfestigkeit abhängige Reißbildungsverhalten der reinen Betonmatrix kann weiter durch den gezielten Einsatz von funktionalisierten Fasern beeinflusst und dadurch vor allem Zug- und

Biegezugfestigkeit im Nach-(Rißbildungs-)bruchbereich im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit von Betonkonstruktionen entscheidend verbessert werden (vgl. DAfSTb Stahlfaserbeton (2012-11)Richtlinie).

Die Einbindung der Fasern in die Baustoffmatrix stellt sowohl bei Fasern als auch bei CNTs ein Problem dar. Ein Lösungsansatz für die Verbesserung der Faser-Matrix-Wechselwirkung ist die Verwendung von aktivierten Bindemittelkomponenten, wie sie im System FuturZement enthalten sind.

Ebenso ist die Frage der homogenen Dispergierung der Fasern essentiell für den erfolgreichen Verbund von Faser und Matrix. Hierbei muss bereits bei der Dispergierung im Labormaßstab berücksichtigt werden, dass nicht bei allen Dispergiermethoden ein Up-Scaling in den industriellen Maßstab möglich ist. Eine neuartige Mischtechnik mit modernsten Mixchern muss also ein Projekt-Schwerpunkt sein zur gezielten Dispergierung von Rovings, um für Bauteile mit Kerben einen quasi-isotropen Beton zu erhalten, der lokale Spannungsspitzen ohne Extra-Bewehrung erträgt, was die Lebensdauer stark erhöht. Bei den zu entwickelnden Kompositen soll der Faseranteil durch Eindispergieren von Schnittfasern unterschiedlicher Länge in die Betonmatrix realisiert werden, um eine bestmögliche Komplementarität (normalerweise sich ausschließende Sachverhalte) zur derzeit üblichen Mischtechnologie im Bauwesen zu gewährleisten.

Als Demonstrator für die Verifizierung der Prozesskette - von den einzelnen Baustoffen und deren Wirkprinzipien, über Herstellprozess bis Bauteilnachweis durch Auslegung und Versuch ist ein Transformatorhaus vorgesehen. In Transformatorhäusern wird die elektrische Spannung aus dem Mittelspannungsnetz auf die Niederspannungsnetze verteilt. Bei einer Fehlfunktion muss sichergestellt werden, dass es zu keiner Gefährdung für Personen, die sich vor der Ortsnetzstation befinden, kommen kann. Daher werden seitens des Gesetzgebers hohe Anforderungen an die mechanische Belastbarkeit der Wände, des Dachs und der Lasteintragsstellen des Transformatorhauses gestellt. Daneben ist das derzeitige hohe Gewicht zu reduzieren.

Hauptinnovation

Quasi-isotroper einzelfaserverstärkter Beton höchster Kurzzeit-Zugfestigkeit
Marktpotenzial, KMU-Produktabsatz, politische Vorgaben, Gesellschaftliche Belange erfüllen

Ökologische Bedeutung des Projekts

CO₂-Einsparung durch Vermeidung des energieaufwändigen Klinkerbrennens infolge Verwendung von Hüttsand

Dieser neuartige signifikant kerbfeste und dauerhafte Beton ermöglicht zudem eine erkennbare Reduktion von Kosten, Energie, Emissionen und Masseneinsparung (ökologisches Potenzial).

Durch die hohe Temperaturbeständigkeit der Faser ist beim Recyclingprozess eine Trennung der Faser von der Matrix durch thermische Aktivierung möglich.

Die Optimierung der Packungsdichte des Betons und die Anwendung von Fließmitteln ermöglicht eine Absenkung des Bindemittelgehalts bei verbesserten Eigenschaften des erhärteten Systems. Durch den verringerten Bindemittelanteil können signifikante Mengen an CO₂ eingespart werden. Dennoch ist die Anwendung dieser Betone noch nicht Standard.

Fasern in Baustoffen und Bindemittelsystemen sind von wirtschaftlich großer Bedeutung. Die mechanischen Kennwerte der Baustoffe werden aufgrund der Einbringung der Fasern in die Matrix signifikant verbessert. Dadurch können im Weiteren leichtere Bauteile erstellt werden, wodurch Kosten, bedingt durch Material und Instandhaltung verringert werden. Die Einsparung von CO₂-Emissionen ist ebenfalls eine Folge des Einsatzes von Hochleistungsbewehrung in Form von Fasern aus Carbon aber ferner auch aus Basalt.

Die Verknüpfung zweier sekundärer Rohstoffe, Hüttsand und rezyklierte Carbonfasern, in einem mineralischen Komposit besitzt hohes Innovationspotential. Die Erzeugung von Hochleistungsbeton auf einem energiereduziertem Prozessweg ist eine nachhaltige Aufgabe,

der sich das Projekt stellt, weil der energieaufwändige Weg über Klinkerbrennen und -mahlen (CO₂-Einsparung) durch Verwendung gemahlener Hüttenschlacke vermieden wird. Des Weiteren ist die Verwendung von sekundären Carbon-Fasern und von Carbon-Faser-Kunststoff-(CFK)-Rezyklatteilchen sowie Basaltfasern von hohem Interesse. Ein spezieller Nachhaltigkeitsaspekt ist, wie bereits vom Textilbeton bekannt, der Ersatz von korrosionsgefährdetem Betonstahl durch Carbon- oder Basaltfaser-Bewehrung (< 2%).

F&E-Beiträge der KMUs noch auszuarbeiten

Zoz: Mitwirkung bei der Ermittlung der labormäßig optimalen Rezeptur, Mischung der CNT-Beigaben.

KLB: Mitwirkung bei der Erstellung der labormäßig optimalen Rezeptur, Mischung aller Komponenten auf höherer Skala

Kalchschmid: Erste Feldanwendung – industrielle Skala - zur Ermittlung der praktisch optimalen Rezeptur. Das Wasser-Zement-Verhältnis ist anzupassen, Fließmittel eventuell anzuwenden

Produktkosten und Zulassung noch auszuarbeiten

Wesentlich in der Baubranche ist, ob sich die Anwendung eines neuen Betons lohnt. Hierzu dürfen nicht nur die reinen Materialkosten sondern müssen auch Multifunktionalitäten und auch die Ökologie mit Life-Cycle-Cost-Betrachtungen herangezogen werden.

Bewehrungsgrad Carbonfasern ($V_f < 1 \%$) in der quasi-isotropen Betonmatrix; Bewehrungsgrad CNTs (0, 0%)

Nutzen der Projektergebnisse, des Produkts für die Partner

Entscheidend für den Erfolg des Projekts ist die Zusammensetzung des Teams. Dieses wird gebildet aus Baupraktikern der KMUs, Physikern und Chemikern (KMUs und Unis) der Disziplinen Betonmatrix und Kunststoffmatrix, Bau-Verfahrenstechniker, Bau-Werkstoffwissenschaftler, Ingenieuren aus dem konstruktiven Ingenieurbau und der experimentellen Versuchstechnik mit einschlägigen Erfahrungen hinsichtlich Konstruktion, Bemessung, Ausführung sowie bauaufsichtlicher Zulassung im Bereich faserverstärkter Betone.

Die **Zoz GmbH** wird die Erkenntnisse des Projekts in der Produktserie der Hochenergiekugelmühlen (HEM) Simoloyer[®] nutzen. Es kann ein neues und komplettes Anlagensystem entstehen, das spezielle Anforderungen der Hüttensandaktivierung und Trockendispersierung erfüllt. Ermittlung der labormäßig optimalen Rezeptur

Die **KLB-Kötzallacke + Beschichtungen GmbH** entwickelt zusammen mit den Kooperationspartnern den einzelfasermatierten Beton. Nach erfolgreichem Up-Scaling wird das labormäßig entwickelte Produkt im Mischturm der KLB produziert. Die fertigen Produkte werden durch die KLB in Behältern oder Säcken als Trockenmaterial vermarktet.

Die **Kalchschmid GmbH & Co KG** bietet im Erfolgsfall eine neue Generation von Trafostationen an, die bedingt durch die Verwendung dieses Betons und einer Armierung aus Fasermatten und Faserstäben eine deutliche Materialeinsparung und Gewichtsreduzierung ermöglicht. Vor allem im Bereich der Alterungsbeständigkeit wird ein Durchbruch erwartet. Dies hätte auch für andere Bereiche des Einsatzes von witterungsbeaufschlagten Betonkonstruktionen deutliche Vorteile wie bei Brücken, Schwellen, Abwasserrohre etc.

Die **Universität Augsburg** baut durch das Projekt die enge Kooperation der Uni-A mit der Industrie weiter aus, was für eine erfolgreiche anwendungsbezogene Forschung entscheidend ist, wie sie im Bereich der Faserverbundwerkstoffe an der Uni A durchgeführt wird. Von wissenschaftlicher Seite erwartet sich die Uni A durch das Projekt einen Ausbau ihrer Expertise im Bereich mechanische und strukturelle Untersuchungen von Verbundwerkstoffen, sowie im Bereich der bedarfsspezifischen Oberflächenmodifikation der CF, um eine gute

Anbindung zwischen CF und Zementmatrix zu erreichen. Die erarbeiteten Analysemethoden gehen in die weitere wissenschaftliche Arbeit ein. Durch die Förderung werden an der Uni-A neue Doktorandenstellen geschaffen, mit diesen geht die Ausschreibung von Abschlussarbeiten (Bachelor- und Masterarbeiten) einher. Die Ergebnisse des Projekts werden zur Aktualität der Lehre beitragen und auf entsprechenden Fachtagungen präsentiert.

Der **Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München** geht davon aus, dass – infolge der nicht mehr vernachlässigbaren Zugfestigkeiten (bisher wird eine gerissene Zugzone im Beton angesetzt) - für diesen Werkstoff angepasste Bemessungsmodelle formuliert werden müssen, die an die Stelle der in den einschlägigen Normen enthaltenen, für ein breites Anwendungsspektrum formulierten Ansätze treten. Durch die im Zuge dieses Vorhabens gewonnen Erkenntnisse wächst das Verständnis für die komplexen Tragmechanismen in Betonbauteilen. Dies wird einerseits die Bestrebungen für die Anwendung von Beton für spezielle Anforderungen „taylor-made-concrete“ unterstützen und andererseits aber auch zur Weiterentwicklung der allgemeinen Normansätze (Modelle) beitragen. Da anzunehmen ist, dass Probekörperformen und Prüfverfahren weiterentwickelt werden müssen, wird auch die angeschlossene experimentelle Versuchseinrichtung LKI der TU-M einen Zugewinn an Know-how verzeichnen können, das wiederum bei anderen Projekten zur Verfügung stehen wird.

Assoziierter Partner BAuA

Einbezogen zur Überwachung von eventuell bei der Produktion entstehender nanohaltiger Stäube.

Budgetübersicht

		Anteil am Projekt	Förderquote	Fördermittel
KLB		380 T€	35 %	T€
Zoz		< 380 T€ ??	35 %	T€
Kalchschmid		< 380 T€	35 %	T€
Rudolph		< 380 T€	35 %	T€
Uni-A Physik		190 T€	100 %	T€
Uni-A Chemie		190 T€	100 %	T€
TU-M		190 T€	100 %	T€
Summe		1??? T€		

