

# beton

DIE FACHZEITSCHRIFT FÜR BAU+TECHNIK

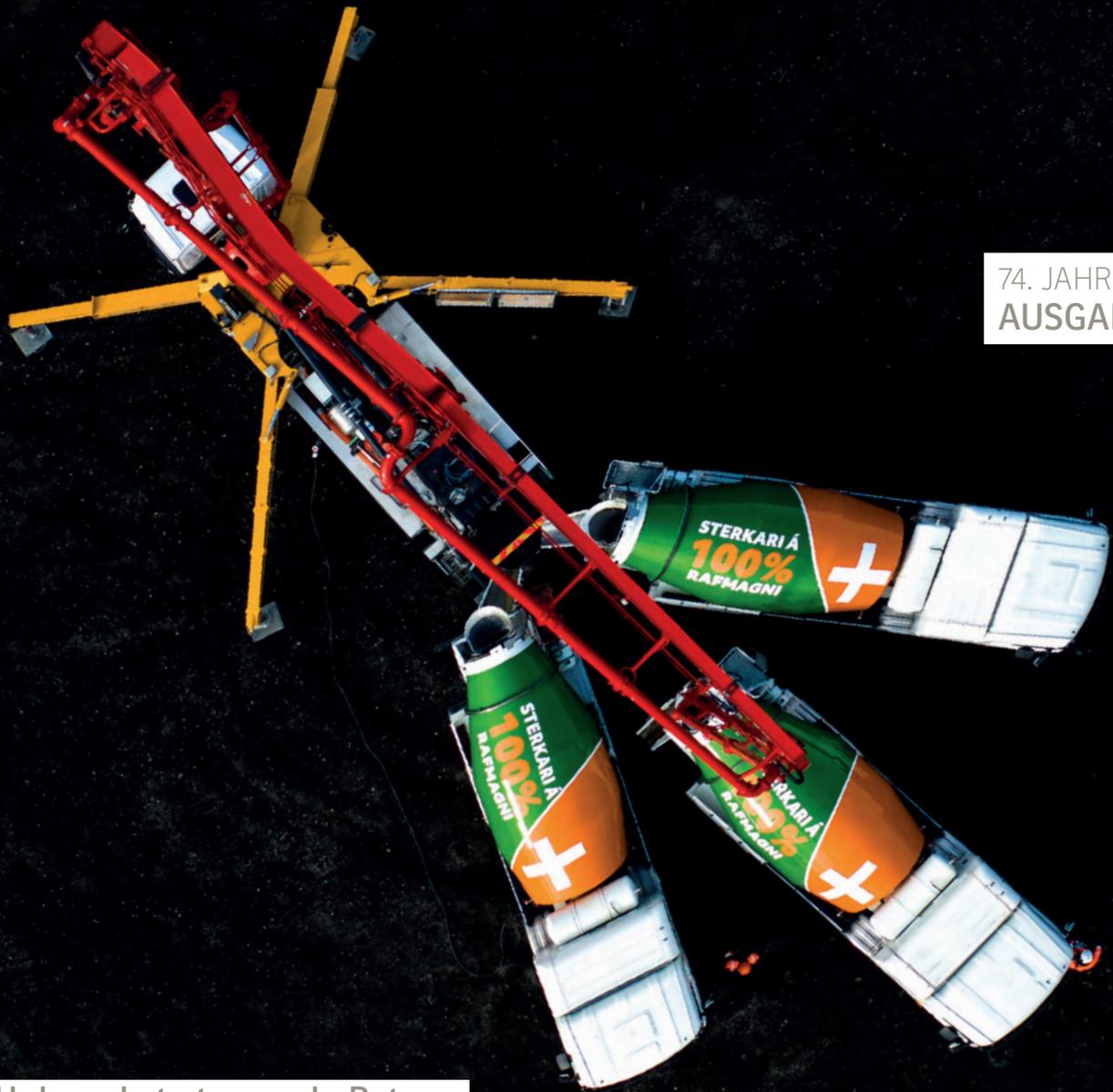
74. JAHRGANG · 1739  
AUSGABE 6 | 2024

Unbewehrte tragende Beton-  
und Leichtbetonwände nach EC2

Bauvorhaben Cityringen Kopenhagen,  
Tübbings aus Stahlfaserbeton

Marktübersicht Transportbeton-Fahrmischer 2024

Zementmerkblatt B14 Infraleichtbeton



## Tübbings aus Stahlfaserbeton

# Bauvorhaben Cityringen Abzweig Sydhavnen in Kopenhagen\*)

Wilhelm Nell, Hamm, Marc Steinfeld, München

Das Gesamtprojekt Cityringen bedeutet für die Stadt Kopenhagen einen immensen Fortschritt im Ausbau des öffentlichen Verkehrs. Die Abzweigung nach Sydhavnen ist dabei ein wichtiger Bestandteil des U-Bahn-Konzepts. Mit dieser Erweiterung wird der südliche Bezirk mit dem bestehenden U-Bahn-System von Kopenhagen verbunden, was das Projekt auch zu ein Schlüsselement für die weitere städtebauliche Entwicklung macht. Der Tunnel für den Abzweig Sydhavnen besteht aus zwei rd. 4 500 m langen Röhren mit einem Innendurchmesser von jeweils 4,90 m, mit einem Querschlag. Zusätzlich sind fünf Bahnhöfe und zwei Schächte entstanden. Aufgeföhren wurde die Strecke mit zwei Erddruck-Tunnelbohrmaschinen. Für die Herstellung der Tübbings im System 5+1 mit 30 cm Dicke wurde bereits in der Planung die Verwendung von Stahlfasern (Anteil der Stahlfaser-Tübbings rd. 85 %) als Bewehrung vorgesehen. Die Bemessung für den Stahlfaserbeton erfolgte nach DBV-Merkblatt.

## 1 Projektübersicht

### 1.1 Allgemeines

Der Auftraggeber Metroselskabet (im Besitz der Gemeinden Kopenhagen und Frederiksberg sowie des dänischen Verkehrsministeriums) hat TUNN3L JV I/S, ein Joint Venture der Bauunternehmen HOCHTIEF Infrastructure GmbH und VINCI Grand Projets, mit dem Projekt beauftragt. Metroselskabet führt es in Zusammenarbeit mit den Stadtverwaltungen von Kopenhagen und Frederiksberg durch.

Die Gesamtausführungsdauer des Projekts ist vorgesehen für einen Zeitraum von 2018 bis zur Eröffnung der Strecke und der Stationen im Jahr 2024. Die Erweiterung soll den Transportbedürfnissen der wachsenden Bevölkerung der Stadt gerecht werden. Mit der neuen Linie werden Passagierbewegungen von ungefähr 43 000 pro Tag geschätzt, während der jährliche Passagierverkehr auf 15,5 Millionen geschätzt wird.

### 1.2 Details der U-Bahn-Linie Sydhavn

Die U-Bahn-Linie Sydhavn wurde im Februar 2015 vom dänischen Parlament im Rahmen der Strategie der Kopenhagener Gemeinde zur Entwicklung des Gebiets Sydhavn genehmigt. Die Linie ist in den bereits bestehenden Cityringen eingebunden und wird fünf neue Stationen rund um den ehemaligen Hafen von Kopenhagen und die Nachbarschaft von Sydhavnen haben (Bild 1). Es ist eine Erweiterung der Linie 4 (M4) der Kopenhagener U-Bahn.

Das Joint Venture von Vinci Construction Grands Projets und HOCHTIEF Infrastructure GmbH erhielt im Februar 2018 den Planungs- und Bauauftrag für das Projekt der U-Bahn-Linie Sydhavn in Höhe von 460 Mio. €. Hochtief fungiert dabei als technischer Leiter des Joint Ventures.

Gottlieb Paludan Architects entwarfen die fünf neuen U-Bahn-Stationen der Sydhavn-Linie. Das Architekturbüro arbeitet mit COWI, Systra und Arkitema Architects zusammen, um das Design bereitzustellen.

Das Projekt umfasst den Bau von 4,5 km langen Doppeltunneln mit einem Innendurchmesser von 4,90 m und einem Außendurchmesser von 5,50 m. Die Tunnel wurden mit zwei Erddruck-Tunnelbohrmaschinen (TBM) vorgetrieben.

Der Zeitplan für die TBM war angesetzt von Q1/2020 bis Q2/2021 mit insgesamt zwölf Anfahrten und zwölf Ausfahrten und 4x2 Durschleppvorgängen in den zu bauenden Stationen. Zusätzlich wurden beide Tunnelbohrmaschinen nach dem Auffahren von rd. 3,5 km Tunnel abgebaut, an den initialen Startschacht (Bild 2) zurücktransportiert, dort wiederaufgebaut und die verbleibende Tunnelstrecke von ca. 1 km in die entgegengesetzte Richtung wird aufgeföhren.

Die Produktion der Tübbings fand im Zeitraum von Mitte 2019 bis Anfang 2021 statt. Bei dem maschinellen Vortrieb wurden Tagesspitzenleistungen von bis zu 45,4 m erreicht.

## 2 Tübbings mit Stahlfaserbeton

### 2.1 Allgemeines

Die positive Wirkung von Stahlfasern auf verschiedene Eigenschaften des Betons ist hinreichend bekannt, untersucht und dokumentiert. Beispielhaft werden hier nur einige positive Aspekte aufgeföhrt: ausgezeichnete Dauerhaftigkeit, weniger Schäden durch Handhabung, Lagerung und Trans-

### Die Autoren:

**Marc Steinfeld** absolvierte 2016 an der Universität Innsbruck das Studium Bauingenieurwesen, danach war er bis 2021 Tunnel Manager bei HOCHTIEF Infrastructure GmbH. Seit 2021 ist er für die DB InfraGO AG (ehemals DB Netz AG) als Senior Project Engineer Tunnel tätig und betreut dort das Großprojekt 2. S-Bahn Stammstrecke München. Er ist seit 2021 gewähltes Mitglied des Steering Committee der deutschen ITA Young Member Vereinigung, STUVA-YEP

**Wilhelm Nell** studierte an der Gesamthochschule-Universität Essen Bauingenieurwesen und ist seit 2000 in der Faserbranche tätig. Ab 2012 war er für internationale Infrastrukturprojekte mit Schwerpunkt Tunnelbau und Bergbau verantwortlich. Seit 2018 ist er Prokurist bei KrampeHarex und verantwortlich für die Produkt- und Geschäftsentwicklung mit technischem Schwerpunkt auf internationalen Tunnel- und Bergbauprojekten. Anfang 2022 hat er die Gesamtverantwortung für den gesamten Faserbereich bei KrampeHarex übernommen und ist Mitglied der Geschäftsleitung. Er ist ehrenamtlicher 1. Vorsitzender im AST (Association Steel Fibre Technology e.V.)

\*) Überarbeitete Fassung eines Beitrags, der in Beton- und Stahlbetonbau 116 (2021) H. 4 erschienen ist.



Bild 1: Verlauf der U-Bahn-Linie und Lage der Stationen

Foto: TUNN3L JV I

port (Vermeidung von Kantenabbrüchen), niedrigere Herstellungskosten als bei herkömmlichem Stahlbeton, Einsparung von Kosten und Platzbedarf zum Lagern der Bewehrungskörbe, weniger Abfall und Ausschuss, geringerer CO<sub>2</sub>-Fußabdruck.

Ein sehr wichtiger und entscheidender Punkt ist der enorme wirtschaftliche Vorteil, der sich aus der Herstellung der Fertigteile aus Stahlfaserbeton ergibt. Die Segmente können deutlich einfacher, schneller und mit weniger Aufwand hergestellt werden. Zahlreiche Tunnelprojekte weltweit sind bereits mit Tübbings aus Stahlfaserbeton erfolgreich hergestellt worden. Beispielhaft sei hier das benachbarte Projekt „Metro Cityringen Kopenhagen – Branch off to Nordhavn“ genannt [1].

## 2.2 Anforderungen an den Stahlfaserbeton

Für dieses Projekt sind u.A. folgende Anforderungen an den Stahlfaserbeton festgelegt worden:

- Faserbetonklasse F1,6/1,0 nach DBV Merkblatt, siehe [2]
- Faserdosierung: vom Hersteller zu bestimmen, um die geforderte Faserbetonklasse von F1,6/1,0 zu erreichen
- Konsistenz: S2
- Mindest-Druckfestigkeitsklasse: C50/60
- Verhältnis Wasser zu effektivem Bindemittelgehalt: maximal 0,4
- Charakteristischer Wert der Biegezugfestigkeit:  $f_{f_{ctk,fl}} \geq 4,7 \text{ N/mm}^2$
- Charakteristische äquivalente Zugfestigkeit im Verformungsbereich I  $f_{eq,ctk,I}: 1,6 \text{ N/mm}^2$  (L1)
- Charakteristische äquivalente Zugfestigkeit im Verformungsbereich II  $f_{eq,ctk,II}: 1,0 \text{ N/mm}^2$  (L2)

Ebenso wichtig bei der Planung ist es, die richtige Art der Stahlfaser zu berücksich-

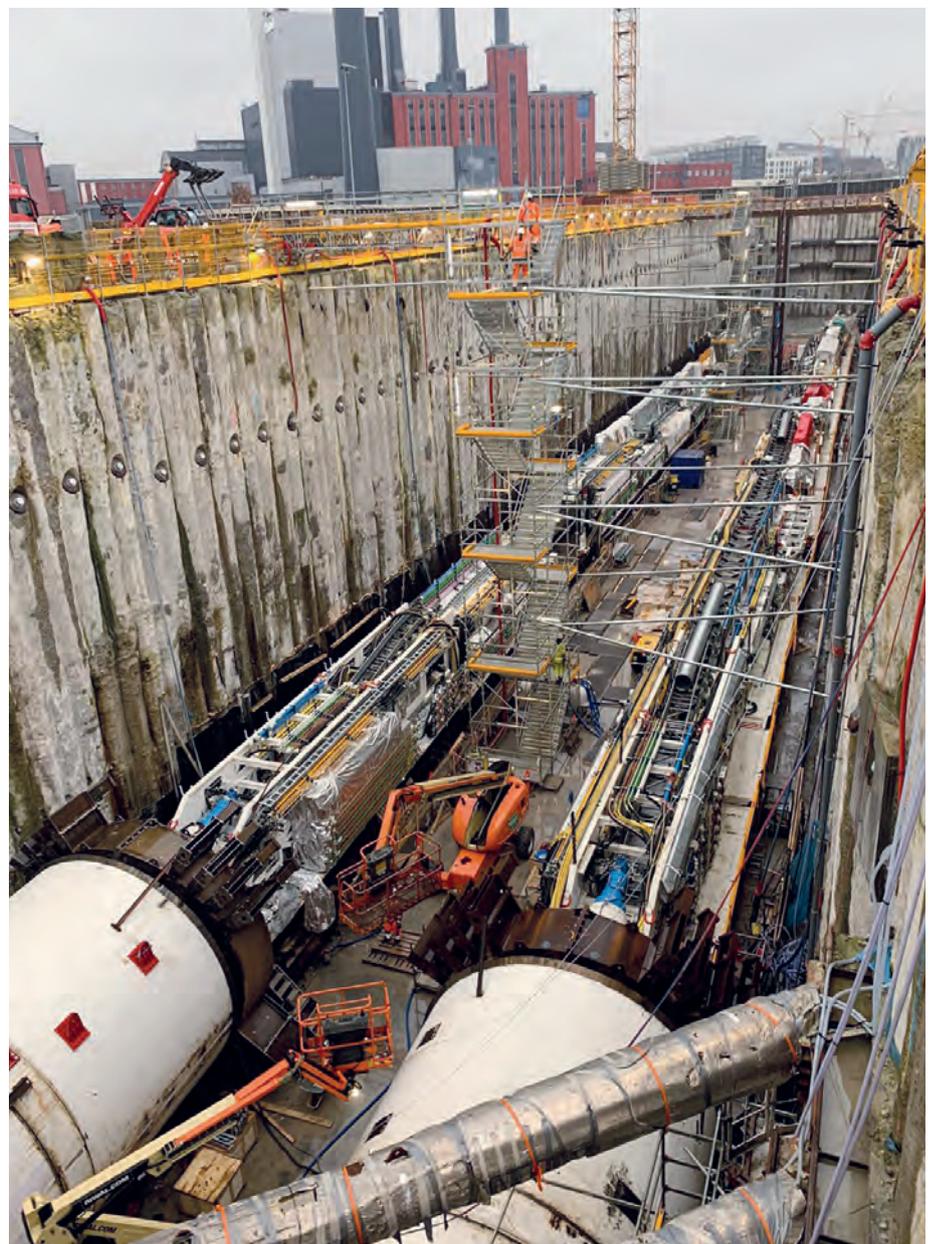


Bild 2: TBM „Inge“ und „Olivia“ im Startschacht Enghave Brygge (EBR)

Foto: Marc Steinfeld/Hochtief



Bild 3: Big Bag mit 500 kg Stahlfasern zum einfachen Nachfüllen der Dosiereinheit  
Foto: KrampeHarex GmbH & Co. KG

tigen oder zumindest einige entscheidende Parameter zu definieren, um die festgelegten Eigenschaften zu erreichen.

### 2.3 Anforderungen Stahlfasern

Für dieses Projekt wurden Stahlfasern mit folgenden Anforderungen gesucht:

- Herstellung aus niedriggekohlten und kalt gezogenem Draht nach DS/EN 14889-1: Group 1, siehe [3]
- Form: runder Querschnitt und Haken an den Enden
- Zugfestigkeit des Drahts  $f_{rt} \geq 1100 \text{ N/mm}^2$
- Nominale Länge  $l_f \leq 60 \text{ mm}$
- Schlankheit  $\lambda = l_{f/df}$  (Verhältnis Länge zu Durchmesser der Faser): zwischen 50 und 75

Weiterhin gab es Vorgaben für die Art der Faserzugabe und -dosierung. Diese mussten mit einer automatischen Dosier- und Wiegeanlage erfolgen. Damit sollen Ungenauigkeiten und Schwankungen der Dosierung im kontinuierlichen Prozess ausgeschlossen werden. Für die Befüllung der automatischen Dosieranlage werden die Stahlfasern in safety big bags mit je 500 kg bereitgestellt (Bild 3).

### 2.4 Herstellung der Tübbings

Für die Herstellung der Tübbings aus Stahlfaserbeton wurde hier die KrampeHarex-Drahtfaser DE 60/0,8 M gewählt (siehe [4]). Eine kaltgezogene Stahldrahtfaser mit 60 mm Länge, 0,8 mm Durchmesser, einer Schlankheit von 67 und einer Zugfestigkeit von  $1550 \text{ N/mm}^2$ . Aufgrund von Erfahrungen aus anderen Projekten und aus Forschungen im KrampeHarex Betonlabor, war dies die am besten geeignete Faser für einen geplanten Stahlfaserbeton der Klasse C50/60-F1,6/1,0.

Die hohe Leistung, die Qualität und Zugfestigkeit in Kombination mit einem sehr guten Verhältnis von Länge und Durchmesser passen perfekt zu der zu erbringenden Faserbetonklasse F 1,6/1,0 und gewährleisten kontinuierlich gute Testergebnisse während der gesamten Produktionszeit. Die erforderliche Dosiermenge wurde in Vorversuchen ermittelt. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die sehr gute Verarbeitbarkeit. Trotz der Einzelfaserzugabe statt der Zugabe von mit Klebstoff verbundenen Faserbündeln, bilden die Fasern keine „Igel“ (zusammenhängende Faserbündel die während des Herstellens aufgrund unzureichender Faservereinzelung entstehen können). Negative Auswirkungen des Klebstoffs auf die Betoneigenschaften werden somit vermieden. So können die Fasern über eine automatische Dosiereinrichtung in der vorgegebenen Menge direkt dem Betonmischer zugeführt werden. Die losen und verteilt eingemischten Fasern verteilen sich sehr gleichmäßig im Beton und bilden eine homogene und isotrope Bewehrung.

Im Vergleich zur herkömmlichen Bewehrung (nur Stabstahl) kann die Verwendung von Stahlfasern in Fertigteil-Segmenten viele Vorteile bieten: erhöhte Dauerhaftigkeit, schneller und einfachere Produktionsprozesse, weniger Risse und Beschädigungen an den Segmenten, erhöhte Lebensdauer durch weniger erforderliche Wartung und eine insgesamt Zeit- und Kostenersparnis.

Die Tübbings wurden in Deutschland hergestellt und dann per Bahn nach Dänemark in ein Zwischenlager transportiert. Von diesem Zwischenlager wurden die Segmente dann in Paaren von zwei Ringen pro LKW auf die Baustelle transportiert (Bild 4). Das hat sich als problemlose und wirtschaftliche Lösung bereits beim Bau der Linie Nordhavnen bewährt.

Insgesamt wurden für den Tunnel Sydhavnen rd. 5 700 Ringe produziert. Das entspricht 34 200 einzelnen Tübbings. Da die Segmente mit dem Zug von Deutschland nach Dänemark transportiert wurden, konnten über 6 Mio. Straßenkilometer eingespart

werden. Trotz der logistischen Herausforderung und der teilweise parallel arbeitenden Tunnelbohrmaschinen kam es zu keinerlei Verzögerungen im Bauablauf, die auf ein Problem in der Lieferkette zurückzuführen waren.

### 3 Betonprüfungen

Zu den üblichen, erforderlichen Betonprüfungen nach EN 206 [5] und DS 2426 [6] werden für den Stahlfaserbeton noch weitere, zusätzliche Prüfungen erforderlich. Der Stahlfasergehalt ist nach EN 14721 (Methode B) [7] zu bestimmen. Der Stahlfasergehalt für eine einzelne Probe muss dabei 80 % des angegebenen Mindestwerts überschreiten und der durchschnittliche Stahlfasergehalt von drei Betonproben muss min. 85 % des Mindestwerts erreichen. Zur Ermittlung des Stahlfasergehalts im Frischbeton und für die ständige Überwachung werden drei Proben entnommen, entsprechend verdichtet und gewogen. Anschließend wird der Zementleim so lange herausgespült, bis die Fasern mit einem Magneten gesammelt werden können. Nach dem Reinigen und Trocknen werden die Fasern gewogen (siehe [6]).

Die charakteristische Biegezugfestigkeit ( $f_{fctk,fl}$ ) der Stahlfaserbeton-Tübbings wird am 4-Punkt-Biegebalken geprüft (siehe [1]) und muss  $\geq 4,7 \text{ N/mm}^2$  sein. Die charakteristische äquivalente Zugfestigkeit  $f_{eq,ctk,I}$  beträgt  $\geq 1,6 \text{ N/mm}^2$  in der Verformungszone I (unmittelbar nach dem Riss) und die Restzugfestigkeit  $f_{eq,ctk,II}$  beträgt  $\geq 1,0 \text{ N/mm}^2$  in der Verformungszone II (bei einer Verformung  $\epsilon_{ct} = 10 \%$ ).

Die Prüfungen zur Ermittlung der Zugfestigkeiten werden an Balken mit den Abmessungen  $b \times h \times l = 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 700 \text{ mm}$  durchgeführt und erfolgen als 4-Punkt-Biegeversuch (Auflagerabstand = 600 mm, Bild 5). Dabei wird ein Kraft-Durchbiegungs-Diagramm bis zu einer Durchbiegung von 3,5 mm aufgezeichnet. Danach können die äquivalenten Biegezugfestigkeiten rechnerisch nach DBV-Merkblatt ermittelt werden.



Bild 4: Transport von zwei Ringen zur Baustelle

Foto: Marc Steinfeld/Hochtief



Bild 5: Interne Qualitätskontrolle, Balkentest zur Ermittlung der Faserbetonklasse  
Foto: KrampeHarex GmbH & Co. KG

## 4 Zusammenfassung

Die Verwendung von Stahlfasern (auch in Kombination mit Stabstahl) für die Bewehrung von Tübbings hat sich als sehr vorteilhaft herausgestellt. Bei zahlreichen Projekten weltweit wird dieses immer wieder bestätigt. Bei dem Projekt Cityringen Abzweig Sydhamnen wurde die Verwendung von Stahlfasern in der Planungsphase frühzeitig mit einbezogen und ein bereits beim Projekt Nordhamnen bewährter Bemessungsansatz übernommen.

Neben den technischen Vorteilen und den deutlich positiven Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit der Tübbings, stehen wirtschaftliche Vorteile bei großen Infrastruktur-Projekten mit an vorderster Stelle. Durch einen schnelleren und sichereren Produktionsprozess können Tübbings mit Stahlfaserbewehrung deutlich schneller hergestellt werden. Zusätzlich gibt es durchschnittlich weniger Schäden und Ausschuss an den Fertigteilen, weil die Stahlfaserbewehrung bis in Kanten und Ecken hinein-

reicht und somit weniger Kantenabbrüche (insbesondere beim frühen Ausschalen, Lagern und Transport) entstehen.

Die innovative und pragmatische Herangehensweise der Beteiligten bei diesem Projekt sorgt auch dafür, dass für zukünftige Projekte ein weiteres, positives Beispiel als Vorlage und Anregung entsteht. Der Bedarf an Tunneln wird im Zuge der Urbanisierung weiter stark wachsen. Sichere, dauerhafte und wirtschaftliche Konzepte sind nötig, um diesen steigenden Bedarf zu decken. Eine frühzeitige Planung des Konzepts und die Einbindung von Stahlfasern als Bewehrung von Tübbings ist dabei eine wirtschaftliche Lösung, die für alle Beteiligten entscheidende Vorteile aufzeigt.

## Literatur

- [1] Abel, R.; Köster, A.: Metro Cityringen Kopenhagen – Branch off to Nordhavn: Projekt, Anfahrt und Logistik. TVM, konventionelle und Stahlfaser-Tübbingbewehrung, Schächte und Querschläge. Forschung + Praxis 49, U-Verkehr und unterirdisches Bauen, STUVA-Tagung 2017, S. 37-42
- [2] DBV-Merkblatt Stahlfaserbeton. Deutscher Beton und Bautechnik-Verein E.V. (DBV), Berlin 2001
- [3] DIN EN 14889-1:2006-11 „Fasern für Beton Teil 1: Stahlfasern Begriffe, Festlegungen und Konformität“
- [4] Datenblatt DE 60/0,8 N. KrampeHarex GmbH & Co. KG, [https://www.krampeharex.com/download-file?file\\_id=632&file\\_code=9bd4c5176d](https://www.krampeharex.com/download-file?file_id=632&file_code=9bd4c5176d), abgerufen am 2. Mai 2024
- [5] DIN EN 206:2017-01 „Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität“
- [6] DS 2426:2011-01 „Concrete – Materials – Rules for application of EN 206-1 in Denmark“
- [7] EN 14721:2007-03 „Prüfverfahren für Beton mit metallischen Fasern Bestimmung des Fasergehalts in Frisch- und Festbeton“



**Betonstein**

Ihre nachhaltige Lösung  
für Flächenbefestigungen.

Mehr Infos unter:

[betonstein.org](https://betonstein.org)

