

2021

116. Jahrgang
April 2021
ISSN 0005-9900

Sonderdruck

Beton- und Stahlbetonbau



Bauvorhaben Cityringen Abzweig Sydhavnen

Wilhelm Nell, Marc Steinfeld

Bauvorhaben Cityringen Abzweig Sydhavnen

Anwendungsbeispiel für Tübbings

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 und wird dadurch auch ein Schlüsselement für die weitere städtebauliche Entwicklung. Der Tunnel für den Abzweig Sydhavnen besteht aus zwei ca. 4.500 m langen Röhren mit einem Innendurchmesser von jeweils 4,90 m, mit einem Querschlag. Zusätzlich sind fünf Bahnhöfe und zwei Schächte entstanden. Aufgefahren wurde die Strecke mit zwei EPB TBM. 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 ca. 85%) als Bewehrung vorgesehen. Die Bemessung für den Stahlfaserbeton erfolgte nach DBV-Merkblatt.

Stichworte Tübbinge; Betonfertigteile; Segmente; Stahlfaserbeton; Stahlfasern; Tunnel

Project Cityringen Branch off to Sydhavnen – practical example for tunnel lining segments

The overall Cityringen project means enormous progress in public transport for the city of Copenhagen. The extension towards Sydhavnen is an important part of the underground concept. With this expansion, the southern harbour district will be connected to the already existing metro network of Copenhagen and will therefore also become a key element for further urban development. The tunnel for the Sydhavnen extension consists of two approx. 4,500 m long tubes with an inner diameter of 4.90 m, with one cross passage. In addition, five train stations and two shafts have been created. The route is driven with two EPB TBMs.

For the production of the tunnel segments in 5+1 system with a thickness of 30 cm, the use of steel fibres as reinforcement (approx. 85% of the overall production is foreseen with SFRC) was already foreseen in the planning. The design of the steel fibre reinforced concrete was carried out according to DBV data sheet.

Keywords TLS; tunnel segments; precast; steel fibre reinforced concrete; steel fibres; tunneling

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 weltweit führenden Bauunternehmen HOCHTIEF Infrastructure GmbH und VINCI Grand Projets, mit dem Projekt beauftragt. Metroselskabet führt das Projekt 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 Ko-

penhagener Gemeinde zur Entwicklung des Gebiets Sydhavn genehmigt. Die Linie bindet in den bereits bestehenden Cityringen ein 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. EUR. HOCHTIEF fungiert dabei als technischer Leiter des Joint Ventures. Gottlieb Paludan Architects entwarfen die fünf neuen U-Bahn-Stationen der Sydhavn-Linie. Das Architekturbüro arbeitete 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 werden mit zwei Erddruck-Tunnelbohrmaschinen (TBM) vorgetrieben. Der Zeitplan für die TBM ist angesetzt von Q1/2020 bis Q2/2021 mit insgesamt zwölf Anfahrten und zwölf Ausfahrten und vier mal zwei Durchschleppvorgängen in den zu bauenden Stationen. Zusätzlich werden beide Tunnelbohrmaschinen nach dem Auffah-



Bild 1 Verlauf der U-Bahn-Linie und Lage der Stationen
Course of the line and location of the stations

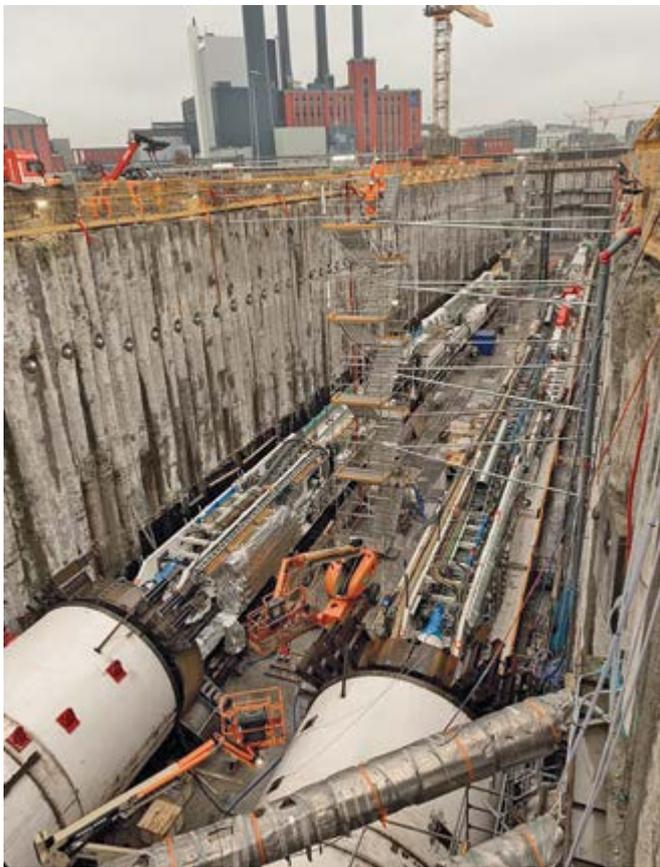


Bild 2 TBM „Inge“ und „Olivia“ im Startschacht Enghave Brygge (EBR)
TBM „Inge“ and „Olivia“ in the starting shaft Enghave Brygge (EBR)

ren von ca. 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. Für die Produktion der Tübbings ist ein Zeitraum vom Mitte 2019 bis Anfang 2021 geplant. Bei dem maschinellen Vortrieb werden 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 und ausreichend untersucht und dokumentiert. Beispielhaft werden hier nur einige positive Aspekte aufgeführt: ausgezeichnete Dauerhaftigkeit; weniger Schäden durch Handhabung, Lagerung und Transport (Vermeidung von Kantenabbrüchen); niedrigere Herstellungskosten als bei herkömmlichem Stahlbeton; Einsparung von Kosten und Platzbedarf zum Lagern der Bewehrungskörbe; weniger Abfall und Ausschuss; ein geringerer CO₂-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 ist hier das benachbarte Projekt „Metro Cityringen Kopenhagen – Branch off to Nordhavn“ genannt [1].

2.2 Anforderungen Stahlfaserbeton

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

- Faserbetonklasse F1,6/1,0 nach DBV-Merkblatt, vgl. [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: $f_{fctk,fl} \geq 4,7 \text{ N/mm}^2$
- Charakteristische äquivalente Zugfestigkeit im Verformungsbereich I $f_{eq,ctk,I}: 1,6 \text{ N/mm}^2 \text{ (L1)}$

- 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 berücksichtigen 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 niedriggekohltem und kalt gezogenem Draht
- Nach DS/EN 14889-1: Group 1, vgl. [3]
- Form: runder Querschnitt und Haken an den Enden
- Zugfestigkeit des Drahts $f_{ft} \geq 1100 \text{ N/mm}^2$
- Nominale Länge $l_f \leq 60 \text{ mm}$
- Schlankheit $\lambda = l_f/d_f$ (Verhältnis Länge zu Durchmesser der Faser): zwischen 50 und 75

Weiter 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 [4]. Dabei handelt es sich um eine kaltgezogene Stahldrahtfaser mit 60 mm Länge, 0,8 mm Durchmesser, einer Schlankheit von 67 und einer Zugfestigkeit von 1550 N/mm^2 . Erfahrungen aus anderen Projekten und aus Forschungen im KrampeHarex Betonlabor deuteten klar darauf hin, dass diese die am besten geeignete Faser für einen geplanten Stahlfaserbeton der Klasse C50/60-F1,6/1,0 ist. Die hohe Leistung, die Qualität und Zugfestigkeit in Kombination mit einem sehr guten Verhältnis von Länge zu Durchmesser passen perfekt zu der zu erbringenden Faserbetonklasse F1,6/1,0 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 vereinzelt einge-



Quelle: KrampeHarex GmbH & Co. KG

Bild 3 Big bag mit 500 kg Stahlfasern zum einfachen Nachfüllen der Dosiereinheit
Big bag with 500 kg steel fibres for easy refill of dosing unit

mischten 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 Fertigteilsegmenten viele Vorteile bieten: erhöhte Dauerhaftigkeit, schnellere und einfachere Produktionsprozesse, weniger Risse und Beschädigungen an den Segmenten, erhöhte Lebensdauer durch weniger erforderliche Wartung und eine insgesamt Zeit- und Kostenersparnis.

Die Tübbings werden in Deutschland hergestellt und dann per Bahn nach Dänemark in ein Zwischenlager transportiert. Von diesem Zwischenlager werden die Segmente dann in Paaren von zwei Ringen pro Lkw auf die Baustelle transportiert (Bild 4). Dies hat sich als problemlose und wirtschaftliche Lösung bereits beim Bau der Linie Nordhavnen bewährt. Insgesamt werden für den Tunnel Sydhavnen ca. 5700 Ringe produziert. Das entspricht 34200 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



Quelle: Marc Steinfeld, HOCHTIEF

Bild 4 Transport von zwei Ringen zur Baustelle
Transport of two rings to the construction site

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 mind. 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 (vgl. [6]).

Die charakteristische Biegezugfestigkeit ($f_{ctk,fl}$) der Stahlfaserbeton-Tübbings wird am 4-Punkt-Biegebalken geprüft (vgl. [1]) und muss $\geq 4,7 \text{ N/mm}^2$ betragen. 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 $\varepsilon_{ct}^f = 10 \text{ ‰}$).

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.

4 Zusammenfassung

Die Verwendung von Stahlfasern (auch in Kombination mit Stabstahl) für die Bewehrung von Tübbings hat sich als sehr vorteilhaft herausgestellt. Bei zahlreichen Projek-



Bild 5 Interne Qualitätskontrolle, Balkentest zur Ermittlung der Faserbetonklasse
Internal quality control, beam test for SFRC performance

ten weltweit wird dies immer wieder bestätigt. Bei dem Projekt Cityringen Abzweig Sydhavnen wurde die Verwendung von Stahlfasern in die Planungsphase frühzeitig mit einbezogen und ein bereits beim Projekt Nordhavnen bewährter Bemessungsansatz übernommen.

Neben den technischen Vorteilen und den deutlich positiven Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit der Tübbings stehen wirtschaftliche Vorteile bei großen Infrastrukturprojekten 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 hineinreicht 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 (2017) *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] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E. V. (2013) *DBV-Merkblatt (2001) Stahlfaserbeton*.
- [3] EN 14889-1 (2006) *Fasern für Beton – Teil 1: Stahlfasern – Begriffe, Festlegungen und Konformität*.
- [4] KrampeHarex GmbH & Co. KG (2020) *Datenblatt DE 60/0,8 N* [online]. https://www.krampeharex.com/typo3temp/pdf/PDB_KrampeHarex-Drahtfaser-DE_60_0_8_M.pdf?1598007566 [Zugriff am: 5. Jan. 2021].
- [5] DIN EN 206 (2017) *Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*. Beuth, Berlin.
- [6] DS 2426 (2011) *Concrete – Materials – Rules for application of EN 206-1 in Denmark*.
- [7] EN 14721 (2007) *Prüfverfahren für Beton mit metallischen Fasern – Bestimmung des Fasergehalts in Frisch- und Festbeton*.

Autoren



Dipl.-Ing. Wilhelm Nell (Korrespondenzautor)
wilhelm.nell@krampeharex.com
KrampeHarex GmbH & Co. KG
Pferdekamp 6–8
59075 Hamm

Zitieren Sie diesen Beitrag

Nell, W.; Steinfeld, M. (2021) *Bauvorhaben Cityringen Abzweig Sydhavnen – Anwendungsbeispiel für Tübbings*. Beton- und Stahlbetonbau 116, Sonderheft Stahlfaserbeton S1, April 2021, S. 6.
<https://doi.org/10.1002/best.202100001>



Dipl.-Ing. Marc Steinfeld
marc.steinfeld@hochtief.de
HOCHTIEF Infrastructure GmbH
Alfredstraße 236
45133 Essen



KRAMPE HAREX®

KNOW WHY.

WEITERE PROJEKTE

Mesaimeer Pumpstation und Abfluss Doha / Katar

Länge: 10 km
Fasern: 1.400 t
Fasertyp: DE 60/0,9 H

Cityringen Sydhavnen Kopenhagen / Dänemark

Länge: 4,5 km
Fasern: 1.000 t
Fasertyp: DE 60/0,8 M

Highspeed 1 Stratford Tunnel London-Stratford / UK

Länge: 4,7 km
Fasern: 210 t
Fasertyp: PM 6/32

Lysehortunneln E39 Svegatjorn - Radalen / Norwegen

Länge: 9,2 km
Fasern: 2.600 t
Fasertyp: DE 35/0,55 N

Cityringen Kopenhagen / Dänemark

Länge: 15 km
Fasern: 200 t
Fasertyp: PM 6/18

Alter Kaiser- Wilhelm-Tunnel Cochem / Germany

Länge: 4,2 km
Fasern: 100 t
Fasertyp: PM 6/32

Fluchtstollen Schürzebergstunnel B27 Oberrieden / Germany

Länge: 240 m
Fasern: 20 t
Fasertyp: DE 30/0,8 N

Abwasserkanal DTSS2 - T07 Singapur

Länge: 12 km
Fasern: 2.500 t
Fasertyp: DE 60/0,9 H

Eisenbahntunnel Lodz Lodz / Poland

Länge: 4,5 km
Fasern: 135 t
Fasertyp: PM 6/18

DEUTSCHLAND

KrampeHarex GmbH & Co. KG
Pferdekamp 6-8
D-59075 Hamm

Tel +49 (0)2381 - 977 977
Fax +49 (0)2381 - 977 955
Internet www.krampeharex.com
E-Mail info@krampeharex.com

ÖSTERREICH

KrampeHarex Fibrin Gesellschaft mbH
Im Astenfeld 1
A-4490 St. Florian

Tel +43 (0)7224 - 207 99
Fax +43 (0)7224 - 207 99 99
Internet www.krampeharex.com
E-Mail info@krampefibrin.com

TSCHECHIEN

KrampeHarex CZ spol. sr. o.
Osvobozeni 234
CZ-66481 Ostrovacice

Tel +420 549 - 245 064
Fax +420 541 - 247 817
Internet www.krampeharex.cz
E-Mail info@krampeharex.cz

