



www.tunnel-online.info

tunnel

2
2022

Offizielles Organ der STUVA · Official Journal of the STUVA



SONDERDRUCK

@ BEKAERT

better together

**Steel-Fibre-Reinforced Segments Improve Carbon Footprint
Stahlfaserbewehrte Tübbinge verbessern Umweltbilanz**

Steel-Fibre-Reinforced Segments Improve Carbon Footprint

Stahlfaserbewehrte Tübbinge verbessern Umweltbilanz

Although the use of steel fibres for shotcrete or concrete segments can significantly improve the CO₂ footprint, their use is still not widespread in Europe. The example of construction lot 16-1 of the Grand Paris Express (GPE) rapid transit network in France shows how the interaction of innovatively thinking construction partners not only creates cost savings, but also benefits the environment.

Obwohl die Verwendung von Stahlfasern für Spritzbeton oder Betontübbinge die CO₂-Bilanz signifikant verbessern kann, ist deren Einsatz in Europa noch wenig verbreitet. Am Beispiel des Bauloses 16-1 des Schnellverkehrsnetzes Grand Paris Express (GPE) in Frankreich wird dargestellt, wie das Zusammenspiel innovativ denkender Baupartner nicht nur Kosteneinsparungen möglich macht, sondern auch der Umwelt nutzt.

Dipl.-Ing. JEAN-LUC BISCHOFF, Operativer Manager Tunneling Abteilung Eiffage Génie Civil, Campus Pierre Bergé, Vélizy-Villacoublay, France/Frankreich

BENOIT DE RIVAZ, Global Business Development Director, NV Bekaert SA, Belgium/Belgien

DIETER HANSEL, General Manager Underground Solutions, NV Bekaert SA, Germany/Deutschland

Dipl.-Ing. ROLAND HERR, International Freelance Journalist/Internationaler Freier Journalist, Wetzlar, Germany/Deutschland

Comprehensive climate-relevant optimisations are possible above all in the production of cement, concrete and steel. For example, the production of cement in Germany alone generates about 0.6 t of CO₂ per 1 t of cement. The use of high-performance concretes enables significantly lower component thicknesses, which in turn leads to savings in steel reinforcement, concrete quantity and cement content. As early as the design and planning of structures, climate-relevant improvements are possible: this is where the design decisions for more environmentally friendly construction methods are made, such as fibre-reinforced tunnel linings.

Umfassende klimarelevante Optimierungen sind vor allem bei der Produktion von Zement, Beton und Stahl möglich. So entstehen etwa bei der Herstellung von Zement in Deutschland ca. 0,6 t CO₂ pro 1 t Zement. Die Verwendung von Hochleistungsbetonen ermöglicht deutlich geringere Bauteildicken, was wiederum zu Einsparungen bei der Stahlbewehrung, der Betonmenge und dem Zementanteil führt. Bereits beim Entwurf und bei der Planung von Bauwerken sind klimarelevante Verbesserungen möglich: hier werden die konstruktiven Entscheidungen für umweltfreundlichere Bauweisen getroffen, wie etwa faserverstärkte Tunnelauskleidungen.

1 Introduction

In some countries, the use of steel fibres has already become established, for example in the USA, Canada and also Australia (Fig. 1). A turning point in the application was marked by the construction of the metro in Doha, Qatar, where in 2014 100 % fibre-reinforced solutions and innovative concrete concepts met the high durability requirements in a particularly aggressive environment (12 % chlorides, 5000 mg/l sulphates). Worldwide and especially since the publication of the Model Code 2010 – English-speaking countries are leading in the use of steel fibre-reinforced concretes, here for example Great Britain, Singapore and Malaysia with metro and sewage projects.

Steel fibres have now been used for the first time on a large scale in the reinforcement of the concrete segments for 12 km of the new 19.3 km long Line 16 in Lot 1 of the Grand Paris Express (GPE) rapid transit network. The plan was to use conventional steel cage reinforcement for the segments, which was replaced by steel fibre reinforcement.

1 Einführung

In einigen Ländern hat sich die Verwendung von Stahlfasern bereits durchgesetzt, so z. B. in den USA, Kanada und auch Australien (Bild 1). Einen Wendepunkt in der Anwendung markierte der U-Bahnbau in Doha, Katar, wo 2014 in besonders aggressiver Umgebung (12 % Chloride, 5000 mg/l Sulfate) zu 100 % faserverstärkte Lösungen und innovative Betonkonzepte die hohen Anforderungen an die Dauerhaftigkeit erfüllten. Weltweit – und insbesondere seit der Veröffentlichung des Model Code 2010 – sind englischsprachige Länder führend bei der Verwendung von stahlfaserbewehrten Betonen, hier etwa Großbritannien, Singapur und Malaysia mit Metro- und Abwasserprojekten.

Erstmals in größerem Umfang wurden nun Stahlfasern bei der Bewehrung der Betontübbinge von 12 km der neuen 19,3 km langen Linie 16 in Los 1 des Schnellverkehrsnetzes Grand Paris Express (GPE) eingesetzt. Geplant war eine herkömmliche Korbbewehrung der Tübbinge, die durch Stahlfaserbewehrung ersetzt wurde.

2 Projektbeschreibung

Der 19,3 km lange Tunnel des Bauloses 16-1 wird mit sechs Herrenknecht-Tunnelbohrmaschinen und drei verschiedenen

- 1 More than 1000 t of CO₂ emissions were avoided during the construction of the Legacy Way road tunnel in Brisbane, Australia, partly due to the use of steel-fibre-reinforced segments for the 4.25 km long twin tube

Beim Legacy Way Straßen-tunnel in Brisbane, Australien, wurden über 1000 t CO₂-Emissionen unter anderem durch die Verwendung von stahlfaserbewehrten Tübbing für die 4,25 km lange Doppelröhre vermieden



Credit/Quelle: Eiffage Génie Civil

- 2 Launch shaft for two of six TBMs of construction lot 16-1 of the Grand Paris Express railway line, France

Startschacht für zwei von sechs TBM des Bauloses 16-1 der Schnellbahnlinie Grand Paris Express, Frankreich



Credit/Quelle: Eiffage Génie Civil

2 Project Description

The 19.3 km long tunnel of construction lot 16-1 is being excavated with six Herrenknecht tunnel boring machines and three different diameters (Fig. 2). Along the route, the five stations Saint Denis Pleyel, Stade de France, La Courneuve, Le Bourget and Le Blanc Mesnil as well as 21 ancillary structures with four tunnel crossings are being built. A total of around 6 million tonnes of excavated material will be produced. 800 000 m³ of concrete will be used for structural buildings and 200 000 m³ of concrete for tunnel segments. At peak times, about 2250 workers (with 6 million man-hours) are employed at the site; construction is scheduled to be completed in November 2023 after about 69 months.

In December 2019, the construction company Eiffage Génie Civil began manufacturing the concrete segments at the segment plant in Conflans Sainte Honorine (France); the first segments were installed in July 2020. The teams of four TBMs of construction lot 16-1 are installing 7+0 segments of 100% steel fibre reinforced concrete per tunnel ring in a 12 km long tunnel section with 9.5 m external and 8.7 m internal diameter.

3 Feasibility Study

The basis for the feasibility study was the extensive information work with the client (Société du Grand Paris), construction companies and segment manufacturers on the advantages of using steel fibres. For the study, the steel fibre Dramix was selected to achieve the minimum performance values according to the Model Code 2010. FIB Bulletin 83 (2017) VP 1.4.1, which supplements the FIB Bulletin known as Model Code 2010 (2010), sets out the general rules for loads that can occur during the service life of a segment. Out of ten possibilities, the following load cases were considered:

- Demoulding
- Storage
- Handling
- Transport
- Cylinder thrust
- Geology

In addition, only the largest diameter of the three segment diameters (6.70 m, 7.75 m and 8.70 m internal diameter) to be produced for the interior work in construction lot 16-1 was taken as a basis.

4 Comprehensive Test Campaign

To assess the suitability of the steel fibres for the concrete matrix, Eiffage Génie Civil tested Dramix steel fibres from Bekaert as well as three fibres from other manufacturers. Important parameters such as grading

Durchmessern aufgeföhren (Bild 2). Im Verlauf der Trasse entstehen die fünf Stationen Saint Denis Pleyel, Stade de France, La Courneuve, Le Bourget und Le Blanc Mesnil sowie 21 Nebenbauwerke mit vier Tunnelkreuzungen. Insgesamt werden rund 6 Millionen Tonnen Aushubmaterial anfallen. 800 000 m³ Beton sollen für konstruktive Bauten und 200 000 m³ Beton für Tunnelsegmente verwendet werden. In Spitzenzeiten sind etwa 2250 Arbeiter (mit 6 Millionen Arbeitsstunden) auf der Baustelle beschäftigt; im November 2023 sollen die Bauarbeiten nach rund 69 Monaten abgeschlossen sein.

Im Dezember 2019 begann das Bauunternehmen Eiffage Génie Civil im Tübbingwerk in Conflans Sainte Honorine (Frankreich) mit der Herstellung der Betontübbing; im Juli 2020 wurden die ersten Segmente eingebaut. Die Teams von vier TBM des Bauloses 16-1 bauen in einem 12 km langen Bereich des Tunnels mit 9,5 m Außen- und 8,7 m Innendurchmesser pro Tunnelring 7+0 Segmente aus 100 % stahlfaserbewehrtem Beton ein.

3 Machbarkeitsstudie

Grundlage für die Machbarkeitsstudie war die umfangreiche Aufklärungsarbeit bei Bauherrin (Société du Grand Paris), Bauunternehmen und Tübbingherstellern zu den Vorteilen der Verwendung von Stahlfasern. Für die Studie wurde die Stahlfaser Dramix ausgewählt, um die Mindestkennwerte gemäß Model Code 2010 zu erreichen. Das FIB-Bulletin 83 (2017) VP 1.4.1, welches das als Model Code 2010 (2010) bekannte FIB-Bulletin ergänzt, legt die allgemeinen Regeln für Belastungen fest, die während der Lebensdauer eines Segments auftreten können. Von zehn Möglichkeiten wurden die folgenden Lastfälle berücksichtigt:

- Entformen
- Lager
- Handhabung
- Transport
- Zylinderschub
- Geologie

Zudem wurde von den drei für den Innenausbau in Baulos 16-1 zu produzierenden Segmentdurchmessern (6,70 m, 7,75 m und 8,70 m Innendurchmesser) nur der größte Durchmesser zu Grunde gelegt.

4 Umfangreiche Testkampagne

Um die Eignung der Stahlfasern für die Betonmatrix zu überprüfen, testete Eiffage Génie Civil Dramix-Stahlfasern von Bekaert sowie drei Fasern anderer Hersteller. Wichtige Parameter wie Sieblinie, Sand, Sand/Kies-Verhältnis, Zementqualität, Wasser/Zement-Verhältnis wurden geprüft und verglichen, da ein Minimum an Feinanteilen für eine gute Verarbeitung der Fasern und deren Verteilung in der Betonmatrix unerlässlich ist. Drei Basisrezepturen mit insgesamt fünf Fasern wurden in verschiedene Sekundärrezepturen mit Variationen in der Materialdosierung aufgeteilt und getestet.

curve, sand, sand/gravel ratio, cement quality, water/cement ratio were tested and compared, as a minimum of fines is essential for good processing of the fibres and their distribution in the concrete matrix. Three basic formulations with a total of five fibres were divided into different secondary formulations with variations in material dosage and tested.

The production of the fibres was coordinated between the contractor and the manufacturer and further extensive fire tests, design and suitability tests and large-scale tests were carried out. Ten segments were subjected to large-scale tests, with at least two segments per series each being required to test the shear strength through the hydraulic cylinders and the breaking strength of the segments. The maximum shear force of 5200 kN of the Herrenknecht TBM used was assumed here. The breaking strength of the segments was assessed with bending tests. 40 kg of steel fibres were added per 1 m³ of concrete (Fig. 3).

Although it is generally accepted that synthetic microfibrils (mostly made of polypropylene) offer passive fire resistance, the segments reinforced with steel fibres and polypropylene had to be tested for their load-bearing capacity under fire load in accordance with the NF EN 1363-1 standard given the following general conditions:

- Examination of 3 segments in the fire test
- Temperature from 0 to 1000 °C
- 2 hours of exposure to load
- 20 minutes to reach the standard exposure temperature of 800 °C

After 18 months of extensive testing, the final recipe for the steel fibre reinforced concrete of the segments was determined in December 2019.

5 Selection and Production of the Adequate Steel Fibre

Bekaert's Dramix steel fibre (SF), produced at the Petrovice plant in the Czech Republic, was selected. While the normal tensile strength is 1100 to 1300 N/mm², the SF for the project was produced with a higher tensile strength of 1800 N/mm². This was achieved by optimising the hook shape and the length/diameter ratio (L/D = 80), which maximises the anchoring of the SF in the concrete matrix. The 60 mm long and, with a diameter of 0.75 mm, relatively fine fibres optimally integrate the aggregates (maximum diameter 20 mm), creating a network of 11 km of fibres per cubic metre of concrete. With 4584 fibre units/kg, the fibres are optimally distributed evenly into all areas of the concrete matrix of the segment. It is important that the fibres do not agglomerate and form gravel clusters during the concrete production process. In the period from December 2019 to December 2021,

Die Produktion der Fasern wurde zwischen Bauunternehmen und Hersteller abgestimmt und weitere umfangreiche Brandversuche, Auslegungs- und Eignungsprüfungen sowie Großversuche durchgeführt. In Großversuchen wurden zehn Segmente getestet, wobei mindestens zwei Segmente pro Serie jeweils zur Prüfung der Schubfestigkeit durch die Hydraulikzylinder und der Bruchfestigkeit der Segmente erforderlich waren. Hier wurde die maximale Schubkraft von 5200 kN der eingesetzten Herrenknecht-TBM angenommen. Mit Biegeversuchen wurde die Bruchfestigkeit der Tübbinge getestet. Es wurden 40 kg Stahlfasern pro 1 m³ Beton zugesetzt (Bild 3). Obwohl allgemein anerkannt ist, dass synthetische Mikrofasern (meist aus Polypropylen) einen passiven Feuerwiderstand bieten, mussten die mit Stahlfasern und Polypropylen bewehrten Segmente auf ihre Tragfähigkeit unter Brandlast entsprechend der Norm NF EN 1363-1 unter folgenden Rahmenbedingungen getestet werden:

- Untersuchung von 3 Segmenten im Brandtest
- Temperatur von 0 bis 1000 °C
- 2 Stunden Belastung
- 20 Minuten, um die Standardeinwirkungstemperatur von 800 °C zu erreichen

Nach 18 Monaten umfangreicher Tests wurde im Dezember 2019 die finale Rezeptur für den stahlfaserbewehrten Beton der Tübbinge festgelegt.

5 Auswahl und Produktion der geeigneten Stahlfaser

Ausgewählt wurde die Dramix-Stahlfaser (SF) von Bekaert, die im tschechischen Werk Petrovice produziert wurde. Während die normale Zugfestigkeit bei 1100 bis 1300 N/mm² liegt, wurde die SF für das Projekt mit einer höheren Zugfestigkeit von 1800 N/mm² hergestellt. Dies wurde durch Optimierung der Hakenform und des Verhältnisses Länge/Durchmesser (L/D = 80) erreicht, wodurch die SF maximal in der Betonmatrix verankert ist. Durch die 60 mm langen und mit einem Durchmesser von 0,75 mm relativ feinen Fasern werden die Zuschlagstoffe (maximal 20 mm Durchmesser) optimal integriert, und es entsteht ein Netz von 11 km Fasern pro Kubikmeter Beton. Mit 4584 Fasereinheiten/kg sind die Fasern gleichmäßig bis in alle Bereiche der Betonmatrix des Segments optimal verteilt. Wichtig ist dabei, dass es mit den Fasern bei der Betonherstellung nicht zur Igelbildung mit Kiesnestern kommt. In der Zeit von Dezember 2019 bis Dezember 2021 wurden 5300 t Stahlfasern hergestellt, und es wurden Qualitätsstichproben im Fertigteilwerk, beim Bauunternehmen sowie in den Bekaert-Labors in Belgien durchgeführt.

6 Herstellung der stahlfaserbewehrten Tübbinge

Im Werk Conflans Sainte Honorine lagen bereits Schalformen zur Herstellung von Tübbing für die Verlängerung der Linie

5300 t of steel fibres were produced and quality sampling was carried out at the precast plant, at the contractor's premises and at the Bekaert laboratories in Belgium.

6 Manufacture of the Steel Fibre-Reinforced Segments

The Conflans Sainte Honorine plant already was equipped with formwork moulds for the production of segments for the extension of line 14 of the Paris metro. For this construction lot, the segments had been produced with reinforcement cages and bar steel as well as a few segments with Dramix steel fibres.

For the production of the segments of construction lot 16-1, an efficient and controlled feeding of the fibres into the dosing unit was developed. A buffer was installed upstream, which allowed a pre-feeding of up to 9 t of fibres. This device was supplemented by a triple weighing system of the fibre quantity fed into the mixer (doser, fibre receiving belt and mixer feeding belt). In a press, it was possible to carry out bending tensile strength tests in accordance with the EN 14 651 standard, which were required for quality control on site. In total, a new concrete mixing plant, moulds with the right diameter for line 16-1, the fibre mixing machine, the press and the buffer were purchased with a total value of around 2 million euros (Fig. 4).

7 Significant Improvement in the Carbon Dioxide Footprint

The significant reduction of CO₂ emissions through the use of steel fibres instead of steel bars results from various advantages, such as significantly lower transport costs due to the reduction of the reinforcement from around 85 kg/m³ steel to 40 kg/m³ fibres. At the same time, significantly fewer truck deliveries are possible due to optimised loading: to reinforce 60 segments, 22 big bags of steel fibres of 1100 kg each are required. This means that when delivering fibres, the maximum possible loading capacity of the trucks used can be 24.20 t instead of 17.85 t with steel bars.

In this way, steel consumption is halved for a 10 km tunnel on line 16-1, resulting in a saving of 5000 t of steel and thus considerable cost and emission savings. With steel fibres, 9000 t of CO₂ equivalent are saved on average per 10 km of tunnel compared to reinforced concrete.

Another advantage becomes apparent when comparing the reinforcement. For example, the structurally necessary thickness of the concrete segments can be reduced from 30 to 25 cm, since the required concrete cover of the steel reinforcement is no longer necessary when only steel fibres are used, which allows for significantly slimmer components (Fig. 5).



Credit/Quelle: Eiffage Génie Civil

- 3 Bending tests were carried out by the contractor in cooperation with the steel fibre manufacturer to determine the optimal concrete mix, steel fibre type and ratio

In Zusammenarbeit mit dem Stahlfaserhersteller führte der Bauunternehmer Biegeversuche durch, um die optimale Betonrezeptur sowie Stahlfaserart und -anteil zu bestimmen

14 der Pariser U-Bahn vor. Für dieses Baulos waren die Tübbinge noch mit Bewehrungskörben und Stabstahl sowie einige wenige Elemente mit Dramix-Stahlfasern hergestellt worden. Zur Herstellung der Tübbinge des Bauloses 16-1 wurde eine effiziente und kontrollierte Zuführung der Fasern in die Dosiereinheit entwickelt. Es wurde ein Puffer vorgeschaltet, der eine Vorfütterung von bis zu 9 t Fasern ermöglichte. Ergänzt wurde diese Vorrichtung durch ein dreifaches Wiegesystem der in den Mischer eingeführten Fasermenge (Dosierer, Faseraufnahmeband und Mischerzuführband). In einer Presse konnten Biegezugfestigkeitsprüfungen gemäß der Norm EN 14 651 durchgeführt werden, die für die Qualitätskontrolle vor Ort erforderlich waren. Insgesamt wurden eine neue Betonmischanlage, Formen mit dem richtigen Durchmesser für die Linie 16-1, die Fasermischmaschine, die Presse und der Puffer in einem Gesamtwert von rund 2 Millionen Euro angeschafft (Bild 4).

7 Signifikante Verbesserung der Kohlendioxidbilanz

Die deutliche Minimierung des CO₂-Ausstoßes durch die Verwendung von Stahlfasern statt Stabstahl resultiert aus verschiedenen Vorteilen, wie z. B. einem deutlich geringeren Transportaufwand infolge der Reduktion der Bewehrung von rund 85 kg/m³ Stahl auf 40 kg/m³ Fasern. Gleichzeitig sind deutlich weniger Lkw-Fahrten durch optimierte Beladung möglich: Um 60 Tübbinge zu bewehren sind 22 Big Bags Stahlfasern zu je 1100 kg nötig. Dies bedeutet, dass bei der Anlieferung von Fasern die maximal mögliche Ladekapazität der verwendeten Lkw 24,20 t betragen kann statt 17,85 t mit Stabstahl.

So wird bei einem 10 km langen Tunnel der Linie 16-1 der Stahlverbrauch halbiert, was zu einer Einsparung von 5000 t Stahl und damit zu erheblichen Kosten- und Emissionseinsparungen führt. Mit Stahlfasern werden im Vergleich zu Stahlbeton 9000 t

The production of the steel reinforcement cages is also no longer necessary, which, in addition to an improved environmental balance, also results in lower costs. The production of steel fibres is also far more environmentally friendly than the production of steel bars.

8 Conclusion

The production of steel-fibre-reinforced segments and their use for the interior lining of the tunnel in construction lot 16-1 for the Grand Paris Express is a novelty on this scale not only in France but in the whole of Europe. The extremely positive experience gained during implementation should open the door to new projects with fibre-reinforced segments in France and Europe, especially as a large number of tunnels have already been built with this technology worldwide.

The advantages of steel fibre reinforced concrete in tunnel construction are obvious:

- Crack monitoring during the construction phase
- Greater impact resistance
- Cost reduction



Credit/Quelle: Eiffage Génie Civil

- 4 The delivery of steel fibres in big bags is much more environmentally friendly than steel reinforcement. Shown here is the loading of up to 9 t of fibres into the dosing unit with a triple weighing system

Die Anlieferung der Stahlfasern in Big Bags ist deutlich umweltfreundlicher als die von Stahlbewehrung. Hier die Zuführung von bis zu 9 t Fasern in die Dosiereinheit mit dreifachem Wiegesystem

CO₂-Äquivalent durchschnittlich pro 10 km Tunnel eingespart. Ein weiterer Vorteil zeigt sich beim Vergleich der Bewehrung. So lässt sich die konstruktiv notwendige Dicke der Tübbingsegmente von 30 auf 25 cm reduzieren, da die erforderliche Betonüberdeckung der Stahlbewehrung bei ausschließlicher Verwendung von Stahlfasern entfällt und somit deutlich schlankere Bauteile möglich sind (**Bild 5**).

Auch die Herstellung der Bewehrungskörbe aus Stahl entfällt, was sich neben einer verbesserten Umweltbilanz mit niedrigeren Kosten bemerkbar macht. Die Herstellung der Stahlfasern ist zudem weitaus umweltfreundlicher als die Herstellung von Stabstahl.

8 Fazit

Die Produktion von stahlfaserbewehrten Tübbing und deren Verwendung für den Innenausbau des Tunnels im Baulos 16-1 für den Grand Paris Express ist in diesem Umfang nicht nur in Frankreich, sondern in ganz Europa ein Novum. Die bei der Umsetzung gemachten äußerst positiven Erfahrungen sollten die Tür zu neuen Projekten mit faserverstärkten Tübbing in Frankreich und Europa öffnen, zumal weltweit bereits eine große Anzahl von Tunneln mit dieser Technologie gebaut wurden.



Credit/Quelle: Eiffage Génie Civil

- 5 The use of steel fibres allows significantly leaner segment designs. The image shows the segments reinforced with steel fibres on their way to the interim storage facility

Aufgrund konstruktiver Vorteile bei der Verwendung von Stahlfasern sind deutlich schlankere Tübbinge möglich. Hier ausgeschaltete stahlfaserbewehrte Betontübbinge auf dem Weg zum Zwischenlager

- Optimisation of production processes
- Life cycle assessment benefits

With the construction lot 16-1 of the Grand Paris Express project, it was demonstrated that the use of steel fibres for the reinforcement of segments is not only technically possible and economically very attractive, but that this construction method significantly protects the environment.

Die Vorteile von stahlfaserbewehrtem Beton im Tunnelbau liegen klar auf der Hand:

- Rissüberwachung während der Bauphase
- Größere Stoßfestigkeit
- Kostenreduzierung
- Optimierung von Produktionsprozessen
- Vorteile in der Ökobilanz

Mit dem Baulos 16-1 des Grand Paris Express Projekts konnte deutlich gemacht werden, dass der Einsatz von Stahlfasern für die Bewehrung von Tübbingem nicht nur technisch möglich und wirtschaftlich sehr reizvoll ist, sondern diese Bauweise die Umwelt signifikant schont.

REFERENCES/LITERATUR

- [1] vdz: Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien (Eine CO₂-Roadmap für die deutsche Zementindustrie). https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/zementindustrie/VDZ-Studie_Dekarbonisierung_Zement_Beton_2020.pdf
- [2] Leucker, R., Schmitz, M. (2021): „Klimaschutz im Verkehrswegebau – Gesamtoptimierung oder interessenorientierte Segmentierung?“. STUVA e. V., Köln, STUVA-Tagungsband 2021 Forschung + Praxis 56, Beitrag S. 26–39.
- [3] FIB Special Activity Group 5 (2010). Bulletin 55-56: Model Code 2010 – First complete draft. Lausanne: International Federation for Structural Concrete (FIB).
- [4] FIB Working Party 1.4.1 Tunnels in fibre-reinforced concrete (2017). FIB Bulletin 83 Precast tunnel segments in fibre-reinforced concrete, state-of-the-art report. (A. Meda, Ed.) Lausanne, Switzerland: Federation International du Beton (FIB).

Dramix®

High concrete performance at a low total cost

Steel fibre reinforced concrete segments

In the **Paris Metro Line 16-1** Dramix® steel fibres are used as the unique reinforcement of the definitive precast tunnel segments. Using steel fibre reinforcement assures an easy handling process and optimal crack control. This results in a safer, more durable concrete structure and a reduced carbon footprint.

©Photo Eiffage Genie Civil, Line 16-1 Paris Metro, Paris (France)

 **BEKAERT**

better together

Go to bekaert.com/underground and get in touch with your local underground expert.