

E6 Rentvannstunnel Oslo – CO₂-Einsparpotential von Tunnelsegmenten bei Verwendung von stahlfaserverstärktem Stahlbeton

Die Herausforderungen an die Planung von Tunneln werden neben den technischen und ökonomischen Anforderungen durch ökologische Aspekte immer größer. Um klimapolitische Vorgaben einhalten zu können, muss im Bausektor die Dekarbonisierung weiter vorangetrieben werden. Die im Tunnel zum Einsatz kommenden Baustoffe und -produkte bestimmen maßgeblich die Auswirkungen auf die Umwelt. Um eine valide Informationsgrundlage für die Ökobilanz eines Produkts zu erhalten, wird häufig eine Environmental Product Declaration (kurz: EPD, deutsch: Umweltproduktdeklaration) gefordert. Eine EPD basiert auf der internationalen Norm ISO 14025 [1]. Im Hinblick auf die Bauindustrie beruhen EPDs insbesondere auf der Norm EN 15804 [2] für Bauprodukte, Dienstleistungen und Prozesse. Bei den Anforderungen an nachhaltige Produkte liegt der Fokus heute vor allem auf dem Global Warming Potential (kurz: GWP, deutsch: Treibhauspotenzial).

Stahlfasern im Tunnelbau

Im Tunnelbau ist der Einsatz von Beton unumgänglich. Weder für Spritzbetone, noch für Tunnelsegmente (Tübbings) oder auch für vor Ort hergestellte Betonbauwerke im Tunnelbau gibt es zur Zeit technisch und/oder wirtschaftlich sinnvolle Alternativen. Aus diesem Grund muss das Ziel sein, die CO₂-Emissionen durch den verwendeten Beton deutlich zu reduzieren.

Der Fokus dieses Artikels liegt auf dem Einsatz von CO₂-reduzierten Tunnelsegmenten, bei denen diese durch die Verwendung von stahlfaserverstärktem Stahlbeton erzielt wird. Eine CO₂-Reduzierung kann zum einen durch ein gutes Design erzielt werden, mit dem das Betonvolumen möglichst gering ist. Des Weiteren kann eine signifikante Einsparung durch die Konzeption der Betonrezeptur erzielt werden. Wesentlicher CO₂-Emittent ist der Zement. Das GWP des Zements wird durch den Anteil an Portlandklinker maßgeblich bestimmt. Je höher dessen Anteil ist, desto höher ist das GWP des Zements, sodass möglichst klinkerarme Zemente verwendet werden sollten.

Die tatsächliche 28-Tage-Festigkeit der Tübbings ist häufig deutlich höher als die Entwurfsfestigkeit. Dies ist darauf zurückzuführen, dass hohe Frühfestigkeiten erreicht werden sollen, um kurze Ausschalzeiten zu ermöglichen und zeit-

gleich hohe Abhebefestigkeiten sicherzustellen. Ggf. ist es möglich, die höhere Festigkeit im Entwurf zu verwenden, um eine Reduzierung der Dicke des Tübbings und somit des Betonvolumens zu generieren, was sich in einer Verringerung des GWP niederschlägt [3].

Daher kann die richtige Auswahl der Bewehrung dazu beitragen, das GWP zu verringern. Während üblicherweise in Tunnelsegmenten aus reinem Stahlbeton ein Bewehrungsgehalt von 80 bis 150 kg/m³ enthalten ist, werden üblicherweise Stahlfasergehalte von 30 bis 45 kg/m³ verwendet.

Fallstudie

Die Stadt Oslo baut ein Reservewasserversorgungssystem auf, um die Wasserversorgung der wachsenden norwegischen Hauptstadt langfristig zu sichern [4, 5].

Das Joint Venture zwischen dem norwegischen Ingenieur- und Bauunternehmen AF Gruppen und dem italienischen Tunnelbauspezialisten Ghella baut derzeit einen neuen Wasserversorgungstunnel als Teil des E6-Rentvannstunnel-Projekts, der die zusätzliche Versorgung mit sauberem Trinkwasser aus der neuen Wasseraufbereitungsanlage in Huseby, westlich von Oslo, und einer unterirdischen Kläranlage in Huseby für rund 1 Million Einwohner ermöglicht [4, 5].

Das Wasserverteilungsnetz wird zwischen Huseby, Oset und Stubberud in Oslo errichtet (vgl. Abb. 1). Für den Tunnel wird



Abb. 1: Geplante neue Wasserversorgung für die Stadt Oslo [5]

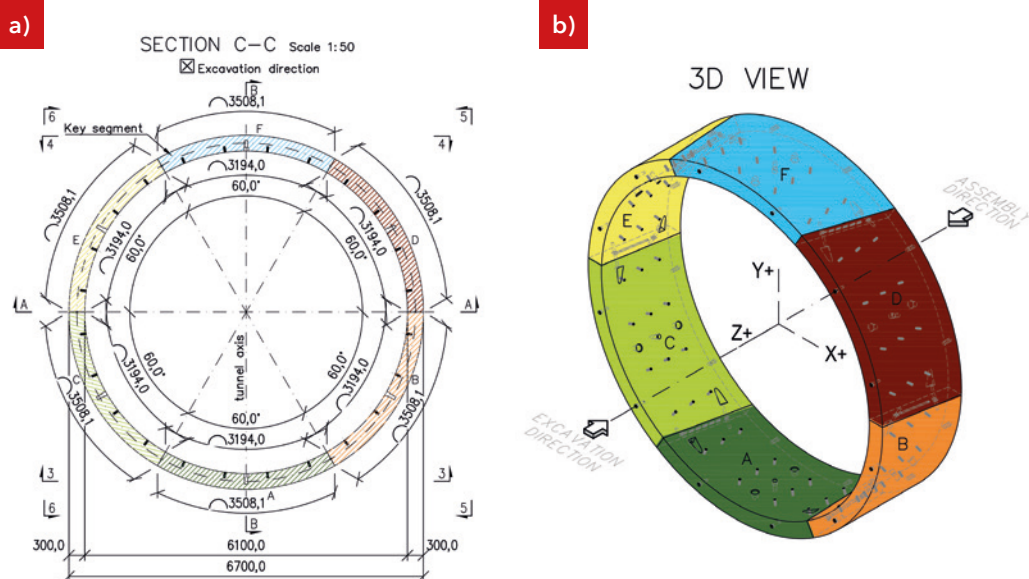


Abb. 2: Tübbingring:
Abmessungen der
Segmente, Detail (a),
3D-Modell (b) [7]

auf einer Länge von etwa 11 km mit einer Doppelschild-Tunnelbohrmaschine (TBM) im Hartgestein gebohrt und 7 km im Sprengvortrieb aufgeföhren. Die Arbeiten sollen im November 2027 abgeschlossen sein [4, 5].

Planung der Auskleidung

Der Tunnelbau erfolgt durch maschinellen Ausbruch mit einer TBM und dem Einbau einer vorgefertigten Tübbingschale mit einem Innendurchmesser von 6,1 m. Die Tunnelauskleidung besteht aus sechs vorgefertigten Stahlbetonsegmenten mit einer Dicke von 300 mm (vgl. Abb. 2), die von der TBM unmittelbar nach dem Ausbruch zu einem Ring montiert werden. Für den Tunnel werden rund 6.000 Ringe gefertigt. Der Außendurchmesser des Rings beträgt 6,70 m, der jeweils eine Länge von 1,80 m aufweist. Insgesamt werden über 65.000 m³ Beton für die Herstellung der Tübbings benötigt.

Zum Einsatz kommen zwei unterschiedliche Betonrezepturen, zum einen ein Beton der norwegischen Betondruckfestigkeitsklasse B45 ($f_{ck,Zylinder} 45 \text{ N/mm}^2$) und zum anderen ein Beton der norwegischen Betondruckfestigkeitsklasse B65 ($f_{ck,Zylinder} 65 \text{ N/mm}^2$). Hinsichtlich der Nachrissbiegezugfestigkeit müssen für beide Betone die *fib*-Model-Code-Klasse 4C [6] erreicht werden. Dies bedeutet, dass die charakteristische Nachrissbiegezugfestigkeit f_{R1k} größer als 4,0 N/mm² sein muss. Zudem muss das Verhältnis von f_{R3k}/f_{R1k} zwischen 0,9 und 1,1 liegen.

Die Bemessungslebensdauer des Tunnels beträgt 100 Jahre und die folgenden Anforderungen müssen erfüllt sein:

1. Betondauerhaftigkeitsklasse M40 (Expositionsklassen XD2, XD3, XS2, XS3, XA3, XSA, Mindestluftporengehalt 4 Vol.-%)



DER CO₂-FUSSABDRUCK IHRES BETONS SOLL SINKEN?

TIEFER ALS MIT UNS GEHT ES NICHT.

Mit 0,26 kg CO₂-Eq. pro kg Stahlfasern erzeugen wir **bis zu acht Mal weniger CO₂** als vergleichbare Fasern anderer Hersteller. Dadurch sind wir im Markt weltweit führend und machen nachhaltiges Bauen so einfach wie nie.

0,26 kg CO₂-Eq.

2. Sulfatwiderstandsklasse SuR2 (XA2, XA3 und Gefahr von Alaunschiefer (Pyritform) besteht). Gemäß NS-EN 206-1 pt. 5.2.8/NA.5.2.8 [8] und NS-EN 1992-1-1 pt. NA.4.4.1.2 [9]
3. Chloridwiderstand gem. NS-EN 206-1 pt. 5.2.8/NA.5.2.8 [8] und NS-EN 1992-1-1 pt. NA.4.4.1.2 [9] für alle Stahlbetonkonstruktionen Chloridwiderstandsklasse Cl 0.10.

CO₂-Einsparung im Projekt

Transport

Die Tübbinge werden in Mukran/Sassnitz in Deutschland gefertigt und per Bahn mit speziellen Waggonen direkt nach Oslo transportiert.

Bindemittel

Besonderen Wert wurde auf einen geringen Klinkeranteil in der Rezeptur gelegt, was durch eine hohe Substitution des Portlandzementes durch Hüttensandmehl erzielt wurde. Um die Anforderungen an die Frühfestigkeit und die Dauerhaftigkeit zu gewährleisten, wurde zudem ein Puzzolan zugegeben.

Stahlfasern

Zusätzlich wurde durch den Einsatz von Stahlfasern DE 60/0,9 H von KrampeHarex mit einem besonders geringen GWP von 0,257 kg CO₂ eq [10] und der Verringerung des Gesamtstahlgehalts das GWP deutlich reduziert.

Berechnungen

Bei den Berechnungen werden die CO₂-Emissionen aus dem Herstellprozess – cradle to gate (A1 bis A3) – herangezogen und miteinander verglichen.

Der Einsatz eines Portlandzementes führt zu einem GWP von 406 kg CO₂/m³ Tübbing, Annahme [11]. Durch die Verwen-

dung eines Hochofenzementes kann der Wert auf 167,8 kg CO₂/m³ Tübbing (B45) bzw. 191,1 kg CO₂/m³ Tübbing (B65) reduziert werden. Der Einsatz des verwendeten Puzzolans erzeugt im Bindemittelbereich beim B45 3,0 kg CO₂/m³ Tübbing und beim B65 3,4 kg CO₂/m³ Tübbing.

Bei den Stahlfasern ergibt sich ein GWP-total von 10,8 kg CO₂/m³ Tübbing (B45) bzw. 9,0 kg CO₂/m³ Tübbing (B65). Bei einem GWP-total von 0,500 kg CO₂ eq [12] für die konventionelle Stabstahlbewehrung ergibt sich ein CO₂-Gehalt von 18,5 kg CO₂/m³ Tübbing für den B45 und 24,0 kg CO₂/m³ Tübbing bei der Betonsorte B65.

Verglichen mit einem üblichen Bewehrungsgehalt in Tübbings von 150 kg/m³ und einem GWP-total von 0,500 kg CO₂ eq [12] für den Stabstahl ergibt sich ein CO₂-Gehalt von 75 kg/m³ Tübbing.

Abbildung 3 zeigt das GWP für einen Kubikmeter Tübbing für eine im Tunnelbau übliche Standardrezeptur sowie den B45 und B65.

Die Tabelle 1 zeigt die Berechnung des CO₂-Einsparpotentials der Betonsorten B45 und B65 im Vergleich zu einer Standardrezeptur.

Bei einem Gesamtbetonvolumen von 66.352 m³ unter der Annahme, dass ca. 2/3 des Betons mit dem Beton B45 und rd. 1/3 mit dem Beton B65 gefertigt werden, ergibt sich eine Einsparung an CO₂ von rd. 2.950 Tonnen alleine durch die Hybridbewehrung mit der KrampeHarex Faser DE 60/0,9 H und Stabstahl anstatt der konventionellen Stabstahlbewehrung. Beim Bindemittel verringert sich der CO₂-Fußabdruck um fast 15.100 Tonnen. Dies resultiert in einer Gesamtmenge der CO₂-Einsparung von über 18.000 t.

In Abbildung 4 sind die CO₂-Emissionen für die Standardrezeptur sowie den Mix B45/B65 sowohl für das Bindemittel als auch für die Bewehrung dargestellt.

Tabelle 1: CO₂-Einsparpotential der Betonsorten B45 und B65 im Vergleich zur Standardrezeptur

Ausgangsstoff/ Parameter	Standardrezeptur	B45	CO ₂ -Einsparpotential	B65	CO ₂ -Einsparpotential
	M.-%	M.-%	-	M.-%	-
Zement	20,7 ¹⁾	14,5 ²⁾	-	16,0 ²⁾	-
Puzzolan	-	2,3		2,6	
Stabstahl	6,25	1,5		1,9	
Stahlfasern	-	1,7		1,4	
-	kg/CO ₂ /m ³ Tübbing		%	kg/CO ₂ /m ³ Tübbing	%
Bindemittel	406,0	170,8	57,9	194,5	52,1
Bewehrung	75,0	29,3	60,9	33,0	56,0
Gesamtgehalt	481,0	200,1	58,4	227,5	52,7

¹⁾ OPC (Portlandzement) ²⁾ Blast furnace slag cement (Hochofenzement)

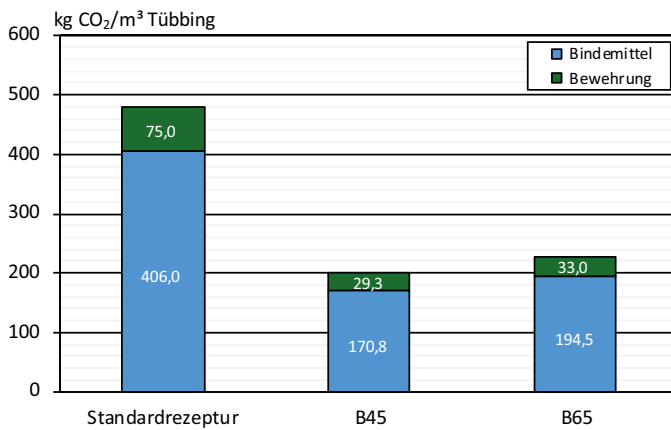


Abb. 3: Vergleich des GWP (A1 bis A3) für das Bindemittel und die Bewehrung einer Standardrezeptur und der beiden verwendeten Betonsorten B45 und B65 in kg CO₂ pro Kubikmeter Tübbing

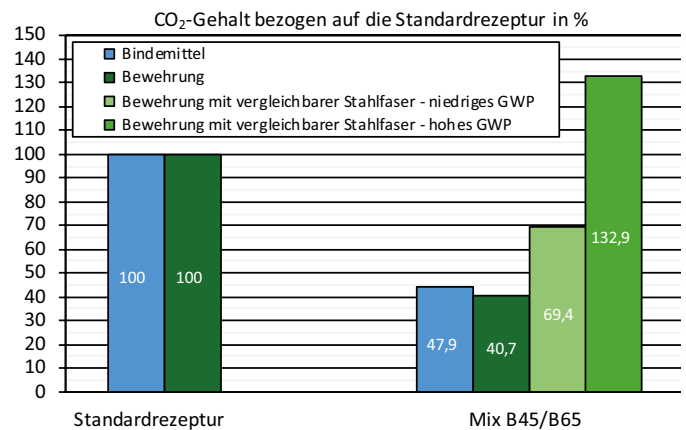


Abb. 4: Vergleich des GWP (A1 bis A3) für das Bindemittel und die Bewehrung der Standardrezeptur und dem Mix der Betonsorten B45 und B65, CO₂-Gehalt bezogen auf die Standardrezeptur

Der Mix B45/B65 mit der Hybridbewehrung weist im Vergleich zur konventionell bewehrten Standardrezeptur beim Bindemittel nur ca. 48 % und bei der Bewehrung rund 41 % an CO₂-Emissionen auf. Bei einer vergleichbaren Stahlfaser mit einem niedrigen GWP von 0,80 kg CO₂/kg Faser läge der CO₂-Gehalt zwar bei 69 % der Standardrezeptur, aber 70 % höher als bei der DE 60/0,9 H. Würde eine vergleichbare Faser mit einem hohen GWP von 2,0 kg CO₂/kg Faser verwendet werden, wäre der CO₂-Gehalt der Hybridbewehrung mit 133 % sogar höher als bei der Standardrezeptur und läge bezogen auf die DE 60/0,9 H bei 325 %.

Fazit

Bei dem Wassertunnelprojekt E6 Rentvannstunnel muss für beide eingesetzten Betonsorten B45 und B65 eine Nachrissbiegezugfestigkeitsklasse 4c gemäß MC 2010 erzielt werden. Durch den Einsatz von stahlfaserverstärkten Stahlbeton-Tübbingungen können erhebliche Mengen an CO₂ eingespart werden. Zum einen wird dies durch die Verwendung eines Hochofenzements und zum anderen durch eine Verringerung des Gesamtbewehrungsgehalts einhergehend mit einem sehr niedrigen GWP für die Stahlfasern DE 60/0,9 H erzielt. Sowohl beim Bindemittel als auch bei der Bewehrung können Einsparungen von fast 60 % im Vergleich mit einer konventionell bewehrten Standardrezeptur erreicht werden.

Literatur

- [1] DIN EN ISO 14025:2011-10 Umweltkennzeichnungen und -deklarationen - Typ III Umweltdeklarationen - Grundsätze und Verfahren (ISO 14025:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14025:2011 - Environmental labels and declarations - Type III environmental declarations - Principles and procedures (ISO 14025:2006); German and English version EN ISO 14025:2011
- [2] DIN EN 15804:2022-03 Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauwerke; Deutsche Fassung EN 15804:2012+A2:2019 + AC:2021 - Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products; German version EN 15804:2012+A2:2019 + AC:2021

- [3] ITA Report n° 35 - ITAtech Activity Group Low Carbon Concrete Linings I Low Carbon Concrete Tunnel Linings, April 2024
- [4] <https://ghella.com/es/proyectos/e6-clean-water-tunnel>, Abrufdatum: 30.09.2024
- [5] <https://www.afgruppen.com/news/2022/02/to-construct-clean-water-distribution-tunnels-in-oslo/>, Abrufdatum: 30.09.2024
- [6] NVO-AFG-410-CA-601-0_Rev 03E_TBM Tunnel, Precast segmental lining, RingConfiguration.pdf
- [7] fib-federation internationale du beton. fib model code for concrete structures 2010. John Wiley & Sons, 2013.
- [8] NS-EN 206:2013+A2:2021+NA:2022 Betong - Spesifikasjon, egenskaper, framstilling og samsvar
- [9] NS-EN 1992-1-1:2004+A1:2014+NA:2021 Eurokode 2 - Prosjektering av betongkonstruksjoner - Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger
- [10] KrampeHarex GmbH & Co. KG: Environmental Product Declaration "Steel fibre with hooked ends", NEPD-4605-3859, EPD-Norge, valid until 18.01.2028
- [11] Kunda Nordic Tsement AS, HeidelbergCement Group: Environmental Product Declaration "Portland Cement CEM I 52,5 R", EPD-KNT-20220145-CAA1-EN, IBU - Institut Bauen und Umwelt e.V., valid until 26.06.2027
- [12] Database One Click LCA 2018: Reinforcement steel (rebar), generic, 97% recycled content (typical), A615

WEITERE INFORMATIONEN



KrampeHarex GmbH & Co. KG
Pferdekamp 6-8
59075 Hamm, Deutschland
www.krampeharex.com