

Ökonomische stahlfaserbewehrte Spritzbetone mit geringem CO₂-Fußabdruck

Einleitung

Die Verringerung der CO₂-Emissionen wird weltweit immer wichtiger. Norwegen nimmt in diesem Bereich eine Vorreiterrolle ein, was zum Teil auf seine Geschichte zurückzuführen ist. Unter der Leitung der norwegischen Ministerpräsidentin Gro Harlem Brundlandt entwickelte die „Brundlandt-Kommission“ 1987 im Auftrag der Vereinten Nationen das Leitprinzip „Eine Entwicklung, die den Bedürfnissen der Gegenwart entspricht, ohne die Fähigkeit künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen“ [1].

Dies war der Ausgangspunkt für die Arbeit in Norwegen in Bezug auf das Thema Nachhaltigkeit, das insbesondere auch von der norwegischen Bauindustrie aktiv gefördert wird [1].

Folglich liegt der Schwerpunkt auch im Tunnelbau auf der Nachhaltigkeit, wobei sich dieser Artikel insbesondere mit den CO₂-Emissionen (Global Warming Potential - GWP) von (stahlfaserverstärktem) Spritzbeton befasst und das mögliche CO₂-Einsparungspotenzial aufzeigt.

Es gibt zwei wichtige Hebel zur Verringerung des CO₂-Fußabdrucks:

- Reduktion des Betonvolumens
- Verwendung von Ausgangsstoffen mit möglichst niedrigem GWP

Im folgenden Kapitel wird zunächst aufgezeigt, warum die Verwendung von Stahlfasern für permanente Spritzbetontunnelauskleidungen zur Reduzierung des Betonvolumens beitragen kann.

Dauerhafte Spritzbetonauskleidungen

Allgemeines

Die Verwendung von stahlfaserverstärktem Spritzbeton für die dauerhafte Auskleidung von Tunneln ermöglicht es, das Betonvolumen zu reduzieren [2]. Ein Vergleich der Abbildungen 1 und 2 sowie der Tabelle 1 zeigt, dass die permanente(n) Spritzbetonauskleidung(en) (engl.: Permanent Sprayed Concrete Lining(s) (PSCL)) eine insgesamt dünnere Lösung ermöglicht als eine herkömmliche Lösung als Doppelschalenauskleidung (engl.: Double Shell Lining (DSL)).

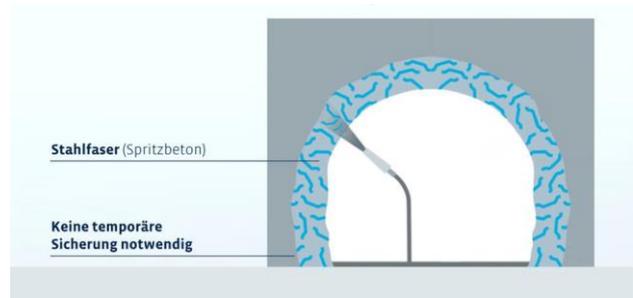


Abb. 1 Lösung mit stahlfaserverstärktem Spritzbeton [3]

Aufgrund der immer weiter fortschreitenden Entwicklung der eingesetzten Technik, wie z. B. Spritzroboter, sowie ständig verbesserter Kontroll- und Bemessungsmethoden, Normen und Richtlinien, wird Spritzbeton immer häufiger als dauerhaftes Ausbaufahren eingesetzt. Insbesondere die Verwendung von stahlfaserverstärktem Spritzbeton (siehe Abbildung 1) für die dauerhafte, endgültige Tunnelinnenschale nimmt daher weltweit zu.

In Norwegen ist die Verwendung von synthetischen Fasern selten geworden und für einige Anwendungen aus Umweltgründen nicht zulässig, da die Fjorde durch aufschwimmende

Kunststofffasern stark verschmutzt wurden [4]. Die Verwendung von stahlfaserverstärktem Spritzbeton bietet zahlreiche Vorteile:

- Geringe Instandhaltungskosten durch geringe Rissbildung.
- Betonoberfläche ist deutlich unempfindlicher gegen mögliche Schäden.
- Schnellere Fertigstellung des Tunnels durch zeit- und kostensparende Bauabläufe.
- Einfache Verarbeitung: Nur ein Arbeitsschritt bei der Bewehrung, da die Fasern zusammen mit dem Beton aufgebracht werden.
- Die temporäre Sicherung entfällt, weil keine konventionelle Bewehrung angebracht werden muss und der Spritzbeton direkt als fertige Lage aufgebracht werden kann.
- Deutlich erhöhte Nutzungsdauer aufgrund erhöhter Dauerhaftigkeit von Faserbeton.

Die konventionelle Auskleidung (siehe Abbildung 2) hat im Vergleich zur stahlfaserverstärkten Spritzbetonlösung mehrere Nachteile:

- Die Oberfläche des Betons ist ungeschützt und schadensanfällig durch die größeren Abstände einer klassischen Bewehrung.
- Der Einbau der Stabstahlbewehrung ist deutlich zeitintensiver, da die Bewehrung in einem gesonderten Arbeitsschritt angebracht wird.
- Sehr aufwendige Bewehrungssituation bei unregelmäßiger Oberfläche und Ausbruch.
- Durch aufwendige und engmaschige Bewehrung können leicht Spritzschatten entstehen, die schnell zu Wassereinbrüchen und weiteren Rissen führen können.

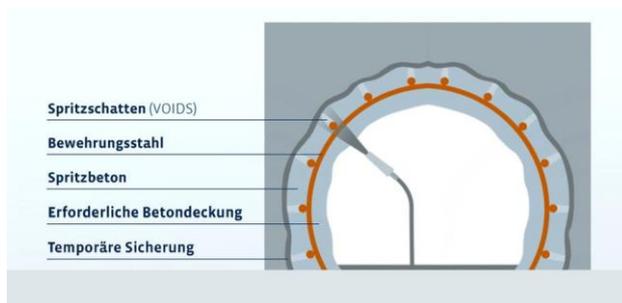


Abb. 2 Lösung mit konventioneller Ausführung [3]

Die oben beschriebenen Ausführungen werden auch im ITA-Bericht „Permanent Sprayed Concrete Linings“ [2] ausführlich beschrieben und im

folgenden Kapitel 2.2 auszugsweise wiedergegeben.

CO₂-Fußabdruck von permanenten Spritzbetonauskleidungen

Um eine valide Informationsgrundlage für die Ökobilanz eines Produkts zu erhalten, wird häufig eine Umweltproduktdeklaration (engl. Environmental Product Declaration (EPD)) verlangt, um die CO₂-Bilanz von Bauprodukten darstellen zu können und damit nachhaltiges Bauen zu fördern.

Eine EPD ist ein umfassender, unabhängig geprüfter und registrierter Produktpass. Er enthält Lebenszyklusinformationen, Merkmale der Lebenszyklusanalyse und Prüfergebnisse für eine detaillierte Bewertung von Baumaterialien und Bauprodukten. Sie beruht auf der internationalen Norm ISO 14025 [5]. Für die Bauindustrie basieren EPDs auf der Norm EN 15804 [6] für Bauprodukte, Dienstleistungen und Prozesse.

Eine EPD ist ideal, um die Umweltauswirkungen von Bauprodukten zu kommunizieren und so nachhaltiges Bauen zu fördern. Bei den Anforderungen an nachhaltige Bauprodukte liegt der Schwerpunkt heute vor allem auf dem Treibhauspotenzial (GWP).

Im weiteren Verlauf des Artikels wird das GWP anhand der EPD dargestellt.

Die folgende Tabelle 1 zeigt die Annahmen in [2]:

Tab. 1 Parameter für den Vergleich der CO₂-Fußabdrücke von PSCL und DSL [2]

Parameter	Hartgestein PSCL	Hartgestein DSL
Dicke der Tunnelaußenschale (mm)	80	80
Erster Faser-/ Bewehrungsgehalt (kg/m ³)	40	40
	Stahlfasern	Stahlfasern
Membran	40	0
	Spritzbare Abdichtungsbahn	PVC- Abdichtungsbahn
Dicke der Tunnelinnenschale (mm)	80	300
Zweiter Faser-/ Bewehrungsgehalt (kg/m ³)	40	97
	Stahlfasern	Stabstahl

In [2] wird für die Abdichtung der PSCL-Option eine spritzbare Abdichtungsbahn (engl. sprayable waterproofing membrane (SAWM)) gewählt, die eine Ausgleichsschicht erfordert (es wird eine Gesamtdicke von 40 mm angenommen), und für die DSL-Optionen wird eine herkömmliche PVC-Abdichtungsbahn herangezogen.

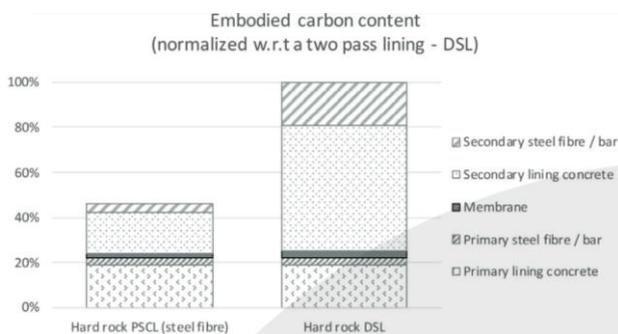


Abb. 3 Gebundene CO₂-Emissionen für Tunnelauskleidungen aus Hartgestein (normiert auf eine zweizügige Auskleidung - DSL) [2]

Spritzbetonrezepturen haben in der Regel einen höheren Zementgehalt und damit ein höheres GWP pro Kubikmeter Beton, das jedoch aufgrund des geringen Betonvolumens (siehe Abschnitt „Dauerhafte Spritzbetonauskleidungen / Allgemeines“) der PSCL-Lösung deutlich reduziert wird, was insgesamt zu einem niedrigeren GWP führt (siehe Abbildung 3). Auch der Gehalt an Stahlfasern ist in der Regel deutlich geringer als die Gesamtmenge der herkömmlichen Bewehrung aus Stabstählen (siehe Tabelle 1 und Abbildung 3).

Die Berechnungen zeigen, dass eine PSCL-Variante zu einer GWP-Einsparung von ca. 20 bis 50 % gegenüber der DSL-Variante führen kann (siehe Abbildung 3).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass insbesondere mit stahlfaserverstärktem Spritzbeton erhebliche Mengen an Beton eingespart werden können.

CO₂ – Einsparung

Der Hauptemittent des CO₂ von Beton ist der Zement. Je höher der Klinkeranteil ist, desto höher sind die CO₂-Emissionen. In der Veröffentlichung „Sustainability in Norwegian Tunnel“ [1] wird die Reduzierung des Klinkeranteils als eine Möglichkeit genannt.

Leider hat die Praxis gezeigt, dass sich die Mischungen in den letzten zehn Jahren in Norwegen nicht wesentlich verändert haben. Der Grund dafür ist nicht die Abneigung der Betonhersteller, Bauunternehmen oder Bauherren, andere Zemente zu verwenden, sondern vielmehr die bestehenden Anforderungen an den Spritzbeton. Sowohl die geforderte Frühfestigkeit als auch die Arbeitssicherheit verhindern (noch) weitgehend den Einsatz von Alternativzementen.

Das bedeutet, dass CO₂-Einsparungen „nur“ durch die anderen eingesetzten Ausgangsstoffe erreicht werden können, zusätzlich zu denen, die bereits durch die stahlfaserbewehrte Bauweise erzielt werden.

Praxisbeispiele

In diesem Abschnitt werden zwei norwegische Tunnelbauprojekte gegenübergestellt:

- der Ryfast-Tunnel, welcher zwischen 2015 und 2018 gebaut wurde, und
- der Rogfast-Tunnel, welcher sich seit 2023 im Bau befindet.

Während für den Ryfast-Tunnel die normalfeste Faser DE 35/0,55 N mit einer Länge von 35 mm, einem Durchmesser von 0,55 mm und einer Zugfestigkeit von 1.250 N/mm² verwendet wurde, kam in Teilen des Rogfast-Tunnels eine 40 mm lange Faser, ebenfalls mit einem

Durchmesser von 0,55 mm und einer Zugfestigkeit von 1.800 N/mm², zum Einsatz.

Bis etwa 2019 war eine Faser mit einer Länge von 35 mm, und einem Durchmesser von 0,55 mm und einer Zugfestigkeit im Bereich von ca. 1.200 bis 1.300 N/mm² für dauerhaft aufgebrauchten Spritzbeton weltweit üblich und wird auch heute noch häufig verwendet.

Die wichtigsten Parameter der beiden Tunnel sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tab. 2 Parameter Ryfast und Rogfast Tunnel

Parameter	Einheit	Ryfast- Tunnel	Rogfast-Tunnel
Gesamtlänge	m	28.600	51.000
Dicke Spritzbeton		0,10	0,10
Spritzbeton	m ³ /m	2,27	2,40
GWP Beton - A1 bis A4 ¹⁾	kg CO ₂ /m ³	277,929	283,030
Faser	-	DE 35/0,55 N	DE 40/0,55 M
Fasergehalt ²⁾	kg/m ³	28,00	21,75

¹⁾ Ohne Fasern

²⁾ ~ 75 % E700 und ~ 25 % E1,000

Der für beide Tunnel verwendete Beton musste die Anforderungen der Festigkeitsklasse B35 und der Dauerhaftigkeitsklasse M40 erfüllen. Wie allgemein bekannt (siehe Abschnitt „Dauerhafte Spritzbetonauskleidungen / CO₂-Fußabdruck von PSCL“), ist der Zementgehalt in Spritzbetonmischungen mit Stahlfasern etwas höher und liegt bei dieser Mischung bei 448 kg/m³, was den größten Teil des GWP ausmacht. Der Unterschied im GWP zwischen den beiden Tunneln pro Kubikmeter Beton ist auf die etwas längeren Transportwege bei dem Rogfast-Tunnel zurückzuführen.

Die detaillierte Zusammensetzung der Rezeptur ist in Tabelle 3 dargestellt.

Tab. 3 Rezeptur für 1 m³ Spritzbeton B35 M40 D8 Spr 220 mm - E700 und E1000 [8]

Ausgangsstoff	Einheit	Gehalt
Luftporenbildner		1,00
Zementersatz- bzw. - zumahlstoffe (SCM)		49,76
Zement	kg/m ³	447,85
Fließmittel/		4,98
Gesteinskörnung		1.573,00
Wasser		188,00

Der in beiden Tunneln verwendete stahlfaserbewehrte Spritzbeton musste für etwa 75 % den Anforderungen der Energieabsorptionsklasse E700 und für die restlichen ca. 25 % die Energieabsorptionsklasse E1000 nach EN 14887-1 [7] entsprechen.

Daraus ergibt sich eine durchschnittliche Dosierung von 28 kg/m³ DE 35/0,55 N für den Ryfast-Tunnel und 21,75 kg/m³ DE 40/0,55 M für den Rogfast-Tunnel.

Durch den Einsatz der DE 40/0,55 M anstelle der DE 35/0,55 N konnte im Rogfast-Tunnel eine Reduktion der Dosierung um rund 22 % - bei gleicher Leistungsfähigkeit (siehe Abbildung 4, links) - erreicht werden.

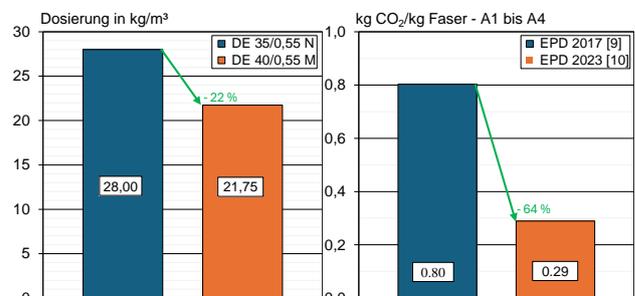


Abb. 3 Verringerung der Dosis (links) und Reduzierung des GWP [9, 10] (rechts)

Neben der Reduktion der Dosierung konnte auch das GWP der Stahlfaser seit 2017 deutlich gesenkt werden. Während der Wert für die Produktionsstufe (A1 bis A3) im Jahr 2017 noch bei 0,771 kg CO₂/kg Faser lag [9], wurde dieser bis 2023 deutlich um ca. 64 % auf 0,257 kg CO₂/kg Faser reduziert [10]. Der Anteil des Transports A4 wurde vereinfacht (Basis [10]) auf 0,032 kg CO₂/kg Faser herangezogen. Dieser Wert wird im Folgenden zur Vereinfachung der Einordnung der Ergebnisse für die bekannte Bandbreite des GWP vergleichbarer Fasern verwendet und kann als sehr konservativ eingestuft werden.

Tabelle 4 zeigt das GWP (A1 bis A4) für die beiden Fasern DE 35/0,55 N und DE 40/0,55 M sowie den Bereich bekannter Vergleichsfasern. Die Vergleichsfaser „niedrig“ stellt mit einem Wert von 0,83 kg CO₂/kg Fasern die untere Grenze und die Vergleichsfaser „hoch“ mit einem Wert von 2,03 kg CO₂/kg Fasern die obere Grenze dar.

Tab. 4 Vergleich des GWP verschiedener Fasertypen und mögliche CO₂-Einsparungen

Fasertyp	Gehalt kg/m ³	GWP A1 bis A4		CO ₂ - Einsparung bezogen auf die Referenz
		kg CO ₂ /kg Faser	kg CO ₂ /m ³	%
DE 35/0,55 N - Referenz	28,00	0,80 [9]	22,48	-
DE 40/0,55 M	21,75	0,29 [10]	6,29	72,04
Vergleichbare Faser „niedrig“	21,75	0,83	18,10	19,52
	7,56		6,29	72,04
Vergleichbare Faser „hoch“	21,75	2,03	44,20	- 96,57
	3,09		6,29	72,04

Wie bereits zuvor erläutert, wurde für A4 für alle vier Fasern ein Wert von 0,032 kg CO₂/kg Fasern verwendet, der für die Vergleichsfasern wahrscheinlich zu niedrig ist.

Zusätzlich zu den ermittelten GWP-Werten (A1 bis A4) pro Kubikmeter Beton wurde auch das CO₂-Einsparpotenzial in Bezug auf die Referenz (DE 35/0,55 N, 28 kg/m³, EPD 2017 [9]) berechnet. Für die beiden Grenzwerte wurde, wie bei DE 40/0,55 M, eine Dosierung von 21,75 kg/m³ angesetzt. Andererseits wurde der Gehalt berechnet, bei dem das gleiche GWP wie bei der DE 40/0,55 M mit einer Dosierung von 21,75 kg/m³ erreicht wird.

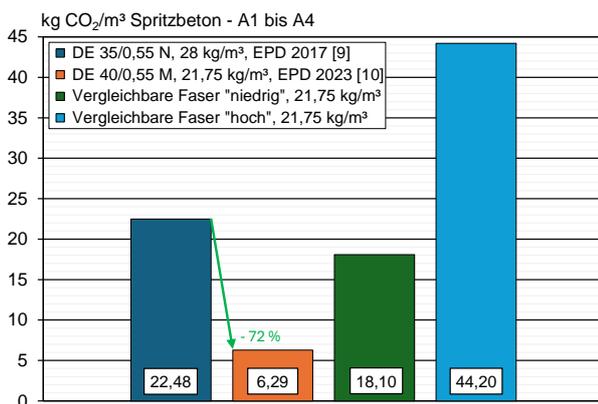


Abb. 4 Vergleich des GWP - A1 bis A4 - in kg CO₂/m³ Spritzbeton von verschiedenen Fasern

Abbildung 5 zeigt, dass die niedrige Dosierung der DE 40/0,55 M (21,75 kg/m³) in Kombination mit der verbesserten EPD zu einer GWP-Reduktion von rund 72 % für die Fasern im Rogfast-Tunnel gegenüber dem Ryfast-Tunnel mit der

DE 35/0,55 N und einer Dosierung von 28 kg/m³ führt. Der Vergleich mit den vergleichbaren Fasern - Dosierung 21,75 kg/m³ - zeigt, dass bei einem niedrigen CO₂-Fußabdruck nur ein Einsparpotenzial von knapp 20 % und bei einem hohen CO₂-Fußabdruck fast eine Verdopplung der CO₂-Emissionen gegenüber dem Ryfast-Tunnel vorhanden wären.

Des Weiteren wird verglichen, welche maximale Dosiermenge möglich ist, um die 6,29 kg CO₂/m³ wie mit dem DE 40/0,55 M im Rogfast-Tunnel einzuhalten. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6 dargestellt. Mit der DE 40/0,55 M können 288 % (Vergleichsfaser „niedrig“) bzw. 709 % (Vergleichsfaser „hoch“) mehr dosiert werden als mit den Vergleichsfasern. Umgekehrt könnten nur 7,56 kg/m³ (Vergleichsfaser „niedrig“) bzw. 3,09 kg/m³ (Vergleichsfaser „hoch“) eingesetzt werden, um den gleichen CO₂-Fußabdruck einzuhalten.

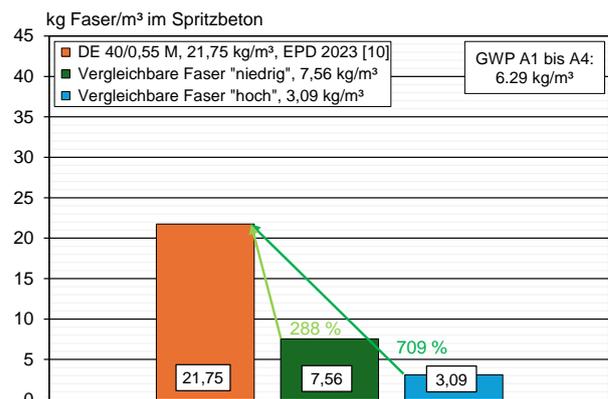


Abb. 5 – Maximale Dosierung zum Erreichen des gleichen GWP A1 bis A4 von 6,29 kg/m³ Spritzbeton

In den vorherigen Kapiteln wurde bereits erläutert, dass der Einsatz von stahlfaserverstärktem Spritzbeton und die Reduzierung des Klinkeranteils einen erheblichen Beitrag zur deutlichen Senkung des GWP leisten können. Nach [2] ist ein Einsparpotenzial von 20 bis 50 % möglich.

In dieser Fallstudie lag der Fokus „nur“ auf dem Einsparpotenzial durch die Auswahl der richtigen Faser. Tabelle 5 berücksichtigt daher nur die Auswirkungen der Faser. Der Einsatz von DE 40/0,55 M im Rogfast-Tunnel führte zu einer CO₂-Einsparung von ca. 3,7 % auf den gesamten Beton, das entspricht rund 1.373 Tonnen.

Tab. 5 GWP-Tunnel mit Fasern

Parameter	Einheit	Ryfast-Tunnel	Rogfast-Tunnel
Gesamtlänge		28.600	51.000
Dicke Spritzbeton	m	0,10	0,10
Spritzbeton	m ³ /m	2,27	2,40
GWP Beton - A1 bis A4 ¹⁾	kg CO ₂ /m ³	277,929	283,030
Faser	-	DE 35/0,55 N	DE 40/0,55 M
Fasergehalt ²⁾	kg/m ³	28,00	21,75
GWP Faser		22,48	6,29
GWP Beton + Fasern	kg CO ₂ /m ³	300,41	289,32
CO ₂ -Einsparung	% t	-	3,7
		-	1.373

¹⁾ Ohne Fasern

²⁾ ~ 75 % E700 und ~ 25 % E1,000

Zusammenfassung und Ausblick

Nachhaltigkeit wird in der Bauindustrie und damit auch im Tunnelbau immer wichtiger. Norwegen nimmt hier eine Vorreiterrolle ein.

Der Einsatz von stahlfaserverstärktem Spritzbeton für dauerhafte Tunnelauskleidung kann einen großen Beitrag leisten, da deutlich weniger Beton verbraucht wird und weniger Aushubmaterial aus dem Tunnel transportiert werden muss.

Da die Betonrezepturen für Spritzbeton in Norwegen aufgrund der Anforderungen an Frühfestigkeit und Arbeitssicherheit derzeit noch nicht wesentlich verändert werden, kann eine gute Auswahl einer Hochleistungsfaser mit geringem CO₂-Fußabdruck insbesondere bei den Rohstoffen zur Nachhaltigkeit beitragen.

Im Rahmen dieses Artikels wurden die Ryfast- und Rogfast-Tunnel in einer Fallstudie analysiert. Es zeigte sich, dass mit der DE 40/0,55 M die Dosierung bei gleichen Leistungsanforderungen um ca. 22 % reduziert werden konnte. Darüber hinaus konnte der CO₂-Fußabdruck der Faser in den letzten Jahren durch eine konsequente Rohstoffauswahl, die Produktion mit Ökostrom und den vergleichsweise CO₂-armen Transport per Schiff und Bahn nach Norwegen deutlich reduziert werden, was zu einer Verringerung des GWP um rund 72 % führte. Gegenüber vergleichbaren Fasern können bei

gleichem GWP bis zu 700 % mehr Fasern zugesetzt werden.

Aus anderen Projekten ist bekannt, dass mit der DE 40/0,55 M ein Einsparpotenzial von bis zu 45 % bei der Faserdosierung erreicht werden kann, sodass der CO₂-Fußabdruck relativ und absolut weiter reduziert werden kann.

Neben der CO₂-Einsparung führen die deutlich geringeren Dosierungen auch zu einer erheblichen Reduzierung der Bewehrungskosten, was den Einsatz von Stahlfasern im Spritzbetonbau in den nächsten Jahren weiter fördern wird.

Literatur

- [1] Norwegian Tunnelling Society: Sustainability in Norwegian Tunnel, Publication no. 30, 2022
- [2] ITAtech: ITA Report n°24 - Permanent Sprayed Concrete Linings - N°ISBN: 978-2-9701242-6-9, October 2020
- [3] <https://www.krampeharex.com>, Retrieved on: 14.06.2024
- [4] Myren, A. S.; Hagelia, P.; Bjøntegaard, Ø.: The ban of polymer fibre in FRSC in Norwegian road tunnels, Conference: 8th International Symposium on Sprayed Concrete, Trondheim, Norway, 11-14 June 2018
- [5] 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
- [6] DIN EN 15804:2022-03: Umweltkennzeichnungen und -deklarationen - Typ III Umweltdeklarationen - Grundsätze und Verfahren (ISO 14025:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14025:2011
- [7] DIN EN 14487-1:2023-03: Spritzbeton - Teil 1: Begriffe, Festlegungen und Konformität; Deutsche Fassung EN 14487-1:2022
- [8] Ølen Betong AS: Environmental Product Declaration "B35 M40 D8 Spr 220mm A1-A4", NEPD-3204-1846-NO, EPD-Norge, gültig bis 02.10.2028
- [9] Mapei AS: Environmental Product Declaration "Steelfibre (DE 35/0,55 DE 50/0,55 og DE 50/1,0)", NEPD-1383-447-NO, EPD-Norge, gültig bis 19.09.2022
- [10] KrampeHarex GmbH & Co. KG: Environmental Product Declaration "Steel fibre with hooked ends", NEPD-4605-3859, EPD-Norge, gültig bis 18.01.2028