

Entwurf faserbewehrter Tunnelsegmente mit reduziertem Emissionsgehalt durch Verknüpfung von Schädigungsanalysen und Optimierungsverfahren

Gerrit E. Neu, Vladislav Gudžulić and Günther Meschke

Institut für Statik und Dynamik, Ruhr-Universität Bochum

Zusammenfassung: Dieser Beitrag zeigt das Potential der Nutzung von Optimierungsverfahren in Kombination mit modell-basierten Design für den Entwurf von faserbewehrten Strukturen. Hierzu werden computerbasierte Ansätze zur Bewertung der Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit von Tübbings unter Berücksichtigung des Fasergehalts und -orientierung präsentiert, die mit Sicherheitskonzepten für die Berücksichtigung von Unschärfe verknüpft werden.

1 Einleitung

Beton ist eines der am häufigsten verwendeten Baumaterialien und hat aufgrund des hohen Energiebedarfs der Zementherstellung erhebliche Auswirkungen auf den globalen Emissionsausstoß. In den letzten Jahrzehnten wurden Anstrengungen zur Verringerung der Umweltauswirkungen unternommen, die einerseits die direkte Reduktion der CO₂-Emission bewirken (bspw. durch Reduzierung des Zementgehalts von Betonstrukturen, die Entwicklung zementfreier Bindemittel oder die Verwendung von recycelten Aggregaten) oder andererseits die Leistungsfähigkeit des Betons erhöhen, um optimierte Tragglieder herzustellen (bspw. Verwendung von Faserbewehrung oder ultra-hochfestem Beton). Die fortschreitende Berücksichtigung des Klimawandels in Entscheidungsprozessen führt zu neuen Herausforderungen und Entwicklungen in der Bauindustrie und speziell im Tunnelbau. Hierbei ist das Tübbingdesign von entscheidender Bedeutung, da einerseits eine Vielzahl an Tunnelsegmenten vorproduziert wird und andererseits sich kleinere Einsparungen akkumulieren können. Üblicherweise werden Tübbings aus konventionellem Stahlbeton (STB) gefertigt, jedoch kommt weltweit Stahlfaserbeton (SFB) immer häufiger zum Einsatz. Vorteile ergeben sich aus der globalen Bewehrungswirkung hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeitscharakteristiken (Rissbreitenbegrenzung, Reduktion von Schädigungen, Verhinderung der Schwindriss-

bildung) und der potentiellen Reduktion der Tübbingdicke, da keine Restriktionen bezüglich der Betondeckung einzuhalten sind. Als nachteilig erweist sich die Bestimmung und starke Schwankung der Nachbruchfestigkeit von SFB, die im Rahmen der Bemessung angesetzt werden darf. Generell ist das Nachrissverhalten abhängig vom gewählten Fasertyp, der Fasermenge, der Verteilung und Orientierung der Fasern im Bauteil, weswegen zu Bemessungszwecken das Nachbruchverhalten vereinfachend indirekt aus Biegeversuchen abgeleitet wird (z.B. [1]). Durch die grundlegend unterschiedliche Faserorientierung ist die anhand dieser Versuche abgeleitete Nachbruchfestigkeit meist nicht repräsentativ für das zu bemessende Bauteil und erfordert, auch im Zusammenhang mit dem streuenden Verhalten, den Ansatz erhöhter Sicherheitsbeiwerte. Weiterhin erfolgt die Bemessung auf Querschnittsebene anhand elastischer Berechnungen, wodurch lokales Versagen gleichbedeutend mit einem globalen Strukturversagen ist und so potentielle Traglastreserven durch Spannungumlagerungen in statisch unbestimmten Systemen unberücksichtigt bleiben.

Ziel dieses Beitrages ist die Ableitung eines faserbewehrten Tübbingdesigns mit reduziertem Emissionsgehalt. Hierzu wird ein Mehr-Ebenen Faserbetonmodell verwendet, welches die Prognose des Nachrissverhaltens von Stahlfaserbeton auf Grundlage des gewählten Fasertyps, des Fasergehalts und der Faserorientierung erlaubt (Abschnitt 2). Dies ermöglicht den expliziten Einfluss einzelner Faserbeton-Mischungsparameter auf die Strukturantwort zu untersuchen und somit Streuungen ebendieser Einflussgrößen abzubilden. Das vorgestellte Modell wird nachfolgend zur nichtlinearen Strukturanalyse genutzt, um die Leistungsfähigkeit und Tauglichkeit verschiedener Bewehrungskonzepte (konventionelle Stabbewehrung und Stahlfasern) für Tübbings unter Vortriebspresenbeanspruchung hinsichtlich ihrer Rissentwicklung und ihres Versagens zu untersuchen und miteinander zu vergleichen (Abschnitt 3). Abschließend soll gezeigt werden, inwiefern die Verknüpfung von Schädigungsanalysen mit Optimierungsverfahren und Unschärfemodellen verwendet werden kann, um wirtschaftlichere faserbewehrte Tübbings mit reduziertem CO₂-Fußabdruck zu entwerfen (Abschnitt 4). Zur Einhaltung der geforderten Versagenswahrscheinlichkeit wird das probabilistische Sicherheitskonzept genutzt.

2 Mehr-Ebenen Faserbetonmodell

Auf der Strukturebene wird das Nachrissverhalten durch ein diskretes Rissmodell auf Basis kohäsiver Interface-Elemente erfasst. Zwischen den regulären finiten Elementen (Bulk-Elemente), werden sogenannte zero-thickness Interface-Elemente eingefügt (Abb. 1, links), die eine diskrete Abbildung von Rissen erlauben und dessen Nachbruchverhalten durch eine Spannungs-Rissweiten-Beziehung beschrieben wird (Abb. 1, rechts). Das Bulk-Material wird als linear elastisch angenommen. Das Materialverhalten der Interface-Elemente wird modifiziert, um das Verhalten von SFB zu berücksichtigen. Das Trag- und Bruchverhalten von Stahlfaserbeton hängt maßgeblich vom Auszugsverhalten einzelner Fasern aus der Betonmatrix und deren Orientierung als auch Verteilung im Bauteil ab. Ziel der Modellentwicklung war die Rissüberbrückungseigenschaften des Stahlfaserbetons anhand der Fasereigenschaften abzuleiten und in ein numerisches Simulationsmodell mit einer diskreten Abbildung von Rissen zu überführen. Ausgehend von der Ebene der Einzelfaser wurde ein semi-analytisches Modell entwickelt, welches das Faserauszugsverhalten auf Grundlage der

Faser-, der Faser-Beton-Verbund- und der Matrixeigenschaften gerader Fasern prognostizieren kann. Zur Beschreibung der Rissüberbrückungseigenschaften, wird ein repräsentativer Riss mit einer aus Bauteilgröße und Betoniervorgang resultierenden Faserorientierung und -gehalt betrachtet und hieraus eine Spannungs-Rissweiten-Beziehung berechnet. Durch die Integration der zuvor bestimmte Spannungs-Rissweiten-Beziehung in die Interface-Elemente, kann das Mehr-Ebenen Faserbetonmodell den Einfluss wichtiger Fasermischungseigenschaften auf das Strukturverhalten untersuchen. Mehr Informationen zum Modell als auch Validierungen können [7], [3] und [5] entnommen werden. Es sei darauf hingewiesen, dass auch beliebige Traktions-Rissweiten-Beziehungen verwendet werden können. Zur Berücksichtigung konventioneller Stabbewehrung kann ein vernetzungsunabhängiges Kopplungsverfahren genutzt werden (Abb. 1, links), welches Bewehrungselemente mit der Betonmatrix unter Einbeziehung der Verbund-Schlupf-Beziehung auf Basis von [1] verbinden kann [2].

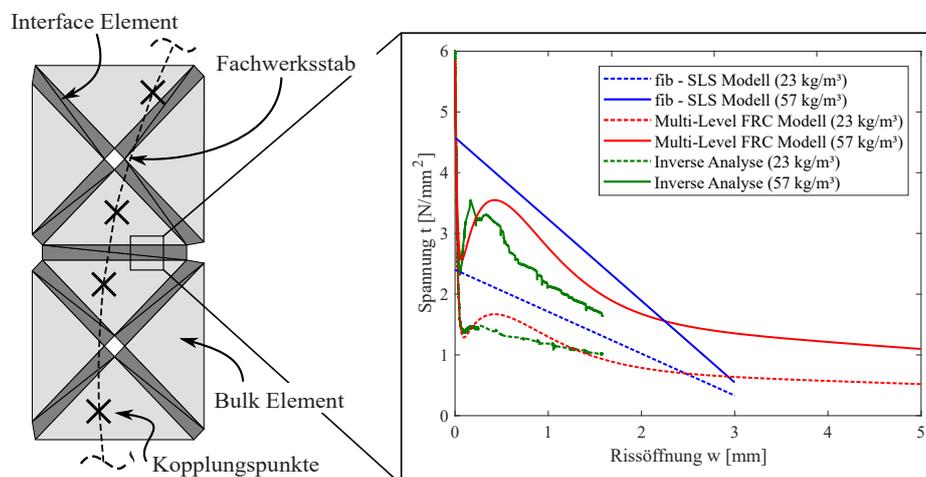


Abbildung 1: Diskretes Rissmodell auf Basis kohäsiver Interface-Elemente (links) und Spannungs-Rissweiten Beziehungen zweier Faserbetone, die durch das Mehr-Ebenen Faserbetonmodell (rot) prognostiziert wurden (rechts).

Im nachfolgenden Abschnitt werden konventionelle und faser-basierte Bewehrungskonzepte für Tübbings vergleichend untersucht, wobei die zugehörigen Materialkennwerte aus einer durchgeführten mehr-ebenen Validierungskampagne herangezogen werden [3]. Für den Beton wurde ein Elastizitätsmodul E_c von $39\,976\text{ N/mm}^2$, eine Zugfestigkeit f_t von $6,0\text{ N/mm}^2$ und eine Bruchenergie G_F von $0,136\text{ N/mm}$ ermittelt. Das experimentelle Programm umfasste Faser-Auszugstests bei unterschiedlichen Einbettungslängen und Orientierungen von Dramix 3D 55/60 und Dramix 3D 65/60 Stahlfasern mit Endverankerung. Nach erfolgreicher Validierung des Modells auf Faserebene wurden Spannungs-Rissweiten-Beziehungen abgeleitet und für Nachrechnungen von 3-Punkt Biegeversuchen mit unterschiedlichen Fasergehalten an Dramix 3D 65/60 Fasern verwendet. Die resultierenden Spannungs-Rissweiten-Beziehungen, die vom Mehr-Ebenen Faserbetonmodell vorhergesagt wurden, sind in Abb. 1 (rechts) für einen Fasergehalt von 23 kg/m^3 (rote gestrichelte Linie) und 57 kg/m^3 Dramix 3D 65/60 Fasern (rote Linie) dargestellt.

3 Strukturanalysen von STB und SFB Tübbings

Die Vortriebspresenkräfte die während des Tunnelvortriebs in die Tübbings eingeleitet werden führen zu potentiell kritischen Spannungskonzentrationen, die zu einer Rissbildung zwischen den Pressenangriffspunkten und innerhalb des Tübbings führen können. Zur Evaluierung der Tauglichkeit von Faserbewehrung für Tunnelsegmente soll die Strukturantwort hinsichtlich Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit für den Lastfall der Pressenbeaufschlagung analysiert werden und mit der eines konventionellen STB Tübbings verglichen werden.

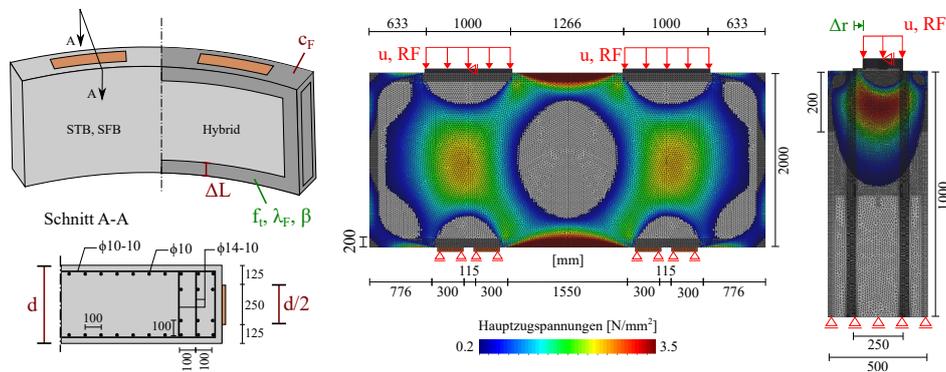


Abbildung 2: Bewehrungskonzepte (links) und FE-Modelle zur Strukturanalyse von Tunnelsegmenten unter Vortriebsbeanspruchung (rechts).

Für den Vergleich von konventionellen und einen faserverstärkten Tübbings werden die Beton- und Fasereigenschaften aus einer Validierungskampagne, die in Abschnitt ?? zusammengefasst sind, verwendet. Das Bewehrungslayout des STB Tübbings ($\Phi 10-10$ + zusätzliche Bewehrung in hoch beanspruchten Bereichen) wurde durch Verwendung konventioneller Entwurfsverfahren abgeleitet und ist in Abb. 2 (links) dargestellt. Alle Bewehrungsstäbe werden durch lineare Fachwerkelemente mit einem elastisch-plastischen Materialgesetz abgebildet ($E_s = 200\,000\text{ N/mm}^2$, $f_y = 550\text{ N/mm}^2$). Das SFB Segment ist mit 57 kg/m^3 Dramix 3D 65/60 Stahlfasern bewehrt, wodurch eine ähnliche Stahlmenge pro Segment erzielt wird (SFB 258 kg/Segment vs. STB 260 kg/Segment). Darüber hinaus wird das Konzept einer hybriden Faserbewehrung [6] untersucht, welches die Platzierung unterschiedlicher Faserbetone im Bauteil erlaubt. In den stark beanspruchten Bereichen um die Presseneinleitungspunkte und die Längsfuge wird eine 200 mm breite Schicht (ΔL) mit 57 kg/m^3 Dramix 3D 65/60 Stahlfasern eingebracht (Abb. 2, links), während im übrigen Segment ein Fasergehalt von 23 kg/m^3 verwendet wird (Nachbruchverhalten gemäß Abb. 1, rechts). Die Gesamtstahlmenge kann daher auf 146 kg/Segment reduziert werden. Für den Vergleich der untersuchten Bewehrungskonzepte werden ebene FE-Modelle verwendet, die auf den Entwurfsmodellen für den Vortriebslastfall in der Ingenieurspraxis basieren. Die Geometrie, Randbedingungen, Vernetzung und die Hauptzugspannungsverteilung im elastischen Bereich sind in Abb. 2 dargestellt. Hierbei ist das Modell zur Analyse der Teilflächenbeanspruchung (rechts) maßgebend für die Ermittlung der Tragfähigkeit und das ebene Segmentmodell (mitte) ist entscheidend hinsichtlich der Rissbildung zwischen den Pressenangriffspunkten.

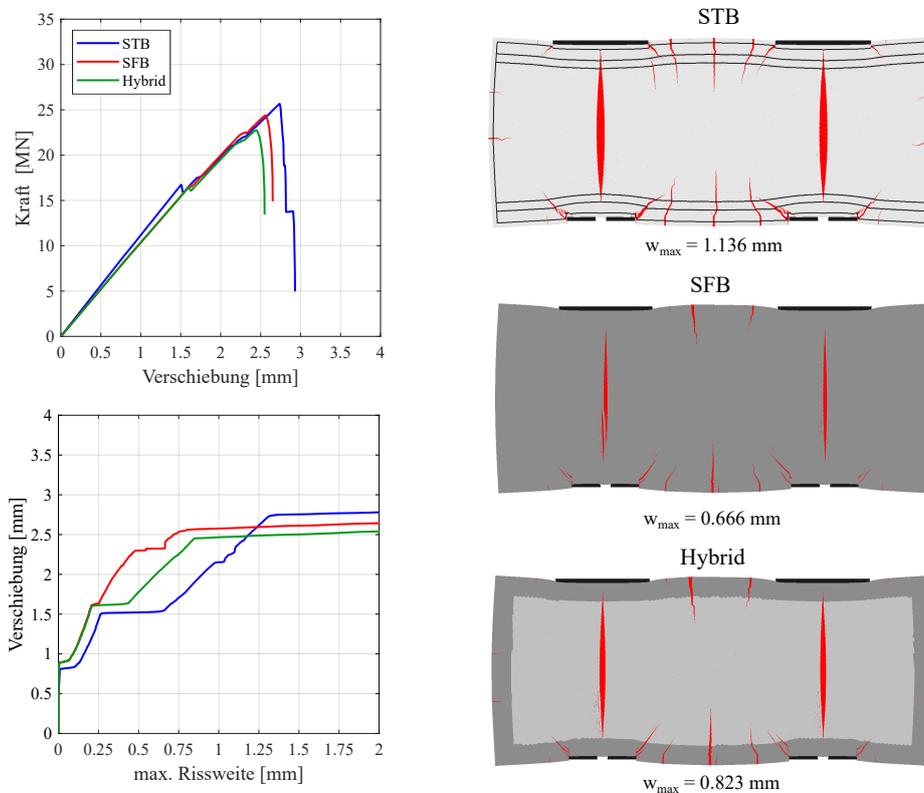


Abbildung 3: Kraft-Verschiebungs und Verschiebungs-Rissweiten Diagramm für die untersuchten Bewehrungskonzepte am ebenen Segmentmodell (links). Rissbilder (75x vergrößert) bei einer aufgebracht Verschiebung von 2,4 mm (rechts).

Hinsichtlich des Kraft-Verformungsverhaltens (Abb. 3, oben) weist das STB Segment die größte Tragfähigkeit (25,63 MN) auf, gefolgt vom SFB (24,38 MN) und dem hybriden Tübbing (22,74 MN). Bei einer aufgebracht Verformung von etwa 0,86 mm ($F \approx 8,95$ MN) treten bei allen untersuchten Bewehrungskonzepten die ersten Risse zwischen den Pressenangriffspunkten auf (Abb. 3). Bei einer Verformung von etwa 1,5 mm ($F \approx 16$ MN) entstehen Risse in der Mitte des Segments, die zu einer weiteren Zunahme der maximalen Rissweite führen (siehe Plateau bei einer Verformung von 1,5 mm in Abb. 3, links unten). Das Versagen tritt bei einer Verformung von ca. 2,5 mm aufgrund von Schäden im Bereich der Pressenschuhe bzw. der Lagerungsplatten auf. Die Rissbilder bei einer Verformung von 2,4 mm sind in Abb. 3 (rechts) dargestellt. Die faserbewehrten Segmente sind effektiver hinsichtlich der Rissweitenbegrenzung durch die im Bauteil verteilte Faserbewehrung und die entfallende Betondeckung (verzögerte Aktivierung der Stabbewehrung). Der hybride Tübbing zeigt bis zu einer Verformung von etwa 1,5 mm ($F \approx 15$ MN) eine äquivalente Leistung wie das SFB Segment, da sich alle Risse noch innerhalb der Verstärkungsschicht befinden.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen des ebenen Segmentmodells, kann eine generell geringere Traglast und eine bessere Leistungsfähigkeit der faserbewehrten Tübbings unter Teilflächen-

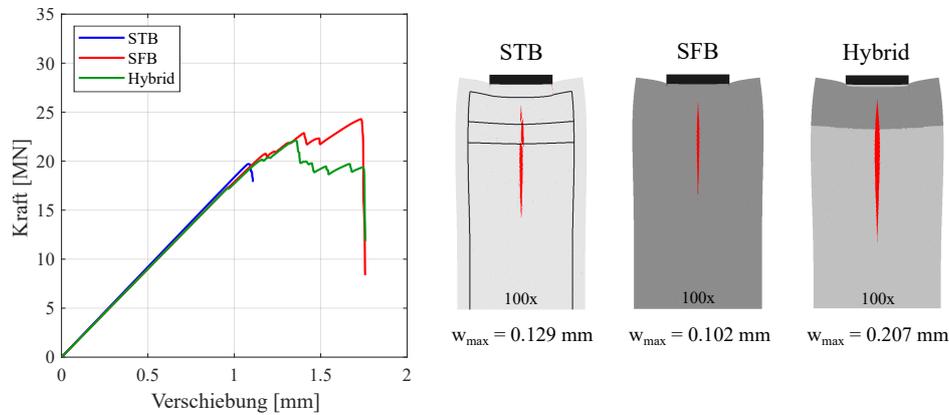


Abbildung 4: Kraft-Verschiebungs Diagramm für die untersuchten Bewehrungskonzepte unter Teilflächenbelastung (links) und die zugehörige Rissbilder bei einer aufgebracht Verschiebung von 1,089 mm (rechts).

belastung beobachtet werden (SFB: 24,25 MN, Hybrid: 22,08 MN und STB: 19,71 MN). Bei einer Verformung von 0,94 mm ($F \approx 17$ MN) wird ein Spaltzugriss initiiert, der bei weiterer Steigerung der Belastung in vertikaler Richtung propagiert (Abb. 4). Der Spaltzugriss bildet sich in der Nähe der Bewehrungsstäbe, wodurch diese eine weitere Rissöffnung und -ausbreitung verhindern. Die Bewehrungsstäbe beginnen bei einer Verformung von 1,07 mm zu fließen, was zu einer Ausbreitung des Spaltzugrisses und folglich zum Versagen führt. In der faserbewehrten Tübbings bieten die Fasern nach einer bestimmten Ausbreitung des Spaltzugrisses einen ausreichenden Widerstand und verhindern seine weitere Propagation. Bei einer Verformung von 1,36 mm (Hybrid) / 1,43 mm (SFB) wird die Scherfestigkeit des Betons überschritten und es kommt zum Versagen durch eine Keilbildung unterhalb der Lastplatte. Die Rissbilder kurz vorm Fließen der Bewehrungsstäbe sind in Abb. 4 dargestellt.

4 Optimierungsgestützter Tübbingentwurf

Der optimierungsgestützte Entwurf eines hybrides Tübbings mittels des Mehr-Ebenen Faserbetonmodell und Unsicherheitsmodellen erfolgt auf Grundlage des im Abschnitt 3 vorgestellten Referenztunnelprojekts, bei dem eine maximale Vortriebspresenkraft von $F_{design} = 5600$ kN möglich ist. Die Zielfunktion ist so formuliert, dass die Designvariablen (Segmentdicke d , Faseranteil c_F und Breite ΔL der verstärkenden SFB-Schicht) minimiert werden, wobei Materialunsicherheiten (Faserorientierung λ_F , Zugfestigkeit des Betons f_t und Scherfestigkeit β) als auch Imperfektionen (Exzentrizität der Vortriebspresse Δr) berücksichtigt werden (Abb.2, links). Die Einhaltung der erforderlichen Versagenswahrscheinlichkeit wird durch die Einbettung des probabilistischen Sicherheitskonzepts in die Nebenbedingungen gewährleistet. Als Bemessungsmodelle werden die in Abschnitt 3 vorgestellten FE-Modelle genutzt, wobei diese zur Lösung der Optimierung unter Unschärfe und der damit einhergehenden immensen Anzahl an Funktionsauswertungen durch Surrogatmodelle (\rightarrow künstliche neuronale

Netze) ersetzt werden. Eine detaillierte Beschreibung der Optimierungsaufgabe und der Unschärfemodellierung findet sich in [5]. Informationen zur Nutzung von Sicherheitskonzepten bei Verwendung nichtlinearer Berechnungsmodelle finden sich in [4].

Bedingt durch die Formulierung der Optimierungsaufgabe wird das Minimum der Zielfunktion auf dem constraint limit state (CLS - definiert durch die Nebenbedingungen) liegen, der den Entwurfsraum in einen zulässigen und unzulässigen Bereich teilt. Es werden drei verschiedene Strategien verfolgt: Als 'Reference' Fall, wird die Optimierung für einen im Tunnelbau üblichen C40/50 Beton durchgeführt, wobei die Zugfestigkeit als lognormal Zufallsvariable modelliert wird ($\mu = 1,24$, $\sigma = 0,18$). Es wird angenommen, dass die Druckfestigkeit, das Elastizitätsmodul und die Bruchenergie vollständig mit der Betonzugfestigkeit korreliert sind. Darüber hinaus wird der Einsatz von hochfestem Beton ('High Performance' - $\mu = 1,51$, $\sigma = 0,18$) und Recyclingbeton ('Recycling' - $\mu = 1,04$, $\sigma = 0,18$) untersucht.

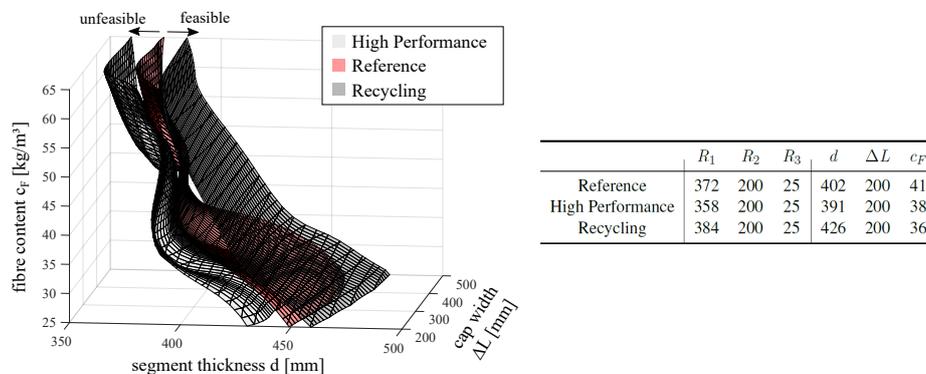


Abbildung 5: Constraint limit states für den 'Reference', 'High Performance' und 'Recycling' Fall (links). Entwurfsvariablen nach Lösung des Optimierungsproblems (rechts).

Aufgrund des monotonen Verhaltens aller unscharfen Parameter wird der CLS für eine einzige Realisierung der Intervalle ($\Delta r = 40$ mm, $\beta = 5$, $\lambda_F = 0,35$) bewertet. Weitere Informationen zu den Parameterbereichen und verschiedenen Realisierungen finden sich in [5]. Wie in Abb. 5 zu sehen ist, dominieren die Segmentdicke d und der Fasergehalt c_F die Form der CLS, während die Breite der verstärkenden Schicht ΔL nur einen geringen Einfluss hat. Wenn nur der minimale Fasergehalt von 25 kg/m³ verwendet wird, können Segmentdicken von $d \geq 435$ mm ('High Performance'), $d \geq 450$ mm ('Referenz') und $d \geq 465$ mm ('Recycling') erzielt werden. Eine Erhöhung des Faseranteils auf bis zu 40 kg/m³ ermöglicht eine weitere Reduzierung der Segmentdicke. Schließlich wird die Minimierung der Zielfunktion für alle Fälle durchgeführt und die Ergebnisse (Optimum jeder individuellen Zielgröße $R_{1,2,3}$ sowie die resultierenden Entwurfsvariablen) sind in Abb. 5 zusammengefasst. Aus der Optimierung folgt ein Tübbingentwurf für den Referenzfall mit einer Dicke von 402 mm und einer 200 mm breiten SFB-Kappe mit einem Fasergehalt von 41 kg/m³. Im Vergleich zum konventionellen STB Tübbing (Abb. 2) wird der Stahlgehalt um 59% (106 vs. 260 kg/Segment) und das Betonvolumen um 20% reduziert ($3,61$ vs. $4,53$ m³/Segment). Die Verwendung von leistungsfähigerem Beton kann die Segmentdicke weiter reduzieren ($3,2$ vs. $3,61$ m³/Segment), wobei ein ähnlicher Stahlgehalt im Vergleich zum Referenzfall erreicht werden kann (92 vs.

106 kg/Segment). Alternativ führt die Verwendung von Beton mit recycelten Zuschlagstoffen immer noch zu einem Tübbingentwurf mit einem geringeren Betonvolumen (3,83 vs. 4,53 m³/Segment) und einem reduzierten Stahlgehalt (108 vs. 260 kg/Segment).

5 Zusammenfassung

Die in diesem Beitrag vorgestellten Ergebnisse zeigen das Potential der Verknüpfung von nichtlinearen Berechnungsverfahren, der Modellierung von Unschärfe im Rahmen des probabilistischen Sicherheitskonzepts und der Anwendung von Optimierungsalgorithmen für den Entwurf von faserbewehrten Strukturen auf. Anhand des vorgestellten Mehr-Ebenen Faserbetonmodells konnte die Tauglichkeit von Faserbewehrung für Tübbings durch vergleichende Strukturanalysen in Bezug auf die Tragfähigkeit (ULS) und die Rissentwicklung (SLS) aufgezeigt werden. Der anschließend durchgeführte optimierungsgestützte Tübbingentwurf resultierte in einem faserbewehrten Tübbing mit einem 20% geringeren Betonvolumen und einem um 59% reduzierten totalen Stahlgehalt im Vergleich zu einem STB Tübbing, der mittels konventioneller Entwurfsmethoden bemessen wurde. Durch Nutzung von hochfestem Beton kann eine weitere Reduktion erzielt werden, während die Nutzung von Recyclingbeton zu einer geringeren Materialeinsparung führt.

Literatur

- [1] CONCRETE STRUCTURES 2010 fib Model Code f.: *Fédération internationale du béton (fib)*. Ernst & Sohn, 2013
- [2] GALL, V. E.: *Numerical Investigation of Hybrid Segmental Lining Response to Mechanized Tunneling Induced Loadings*, Ruhr-Universität Bochum, Diss., 2018
- [3] GUDŽULIĆ, V. ; NEU, G. ; GEBUHR, G. ; ANDERS, S. ; MESCHKE, G. : Numerisches Mehrebenen-Modell für Stahlfaserbeton: Von der Faser- zur Strukturebene. In: *Beton und Stahlbetonbau* 115 (2020), S. 146–157
- [4] NEU, G. ; GUDŽULIĆ, V. ; MESCHKE, G. : Design of steel fiber reinforced concrete tunnel lining segments by nonlinear finite-element analysis with different safety formats. In: *Computational Modeling of Concrete Structures (EURO-C 2022)*. 2022
- [5] NEU, G. ; EDLER, P. ; FREITAG, S. ; GUDŽULIĆ, V. ; MESCHKE, G. : Reliability based optimization of steel-fibre segmental tunnel linings subjected to thrust jack loading (accepted). In: *Engineering Structures* (2022)
- [6] PLÜCKELMANN, S. ; BREITENBÜCHER, R. : Experimental Investigation of Hybrid Concrete Elements with Varying Fiber Reinforcement under Concentrated Load. In: *ACI Symposium Publication* 343 (2020)
- [7] ZHAN, Y. ; MESCHKE, G. : Multilevel computational model for failure analysis of steel-fiber - reinforced concrete structures. In: *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)* 142 (2016), Nr. 11, S. 04016090(1–14)