

# **Development of the multi-objective parametric framework MOET for design and analysis of resolved TRC structures**

**Entwicklung des multiobjektiven parametrischen Frameworks MOET für Entwurf  
und Analyse aufgelöster TRC-Strukturen**

Von der  
Fakultät Bauingenieurwesen  
der Technischen Universität Dresden  
zur Erlangung der Würde eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

## **DISSERTATION**

von  
Iurii Vakaliuk M.Sc.  
geboren am 15. April 1992 in Lviv

Gutachter:  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. em. Manfred Curbach  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Josef Hegger  
Dr.-Ing. Silke Scheerer

eingereicht am: 28.03.2025

verteidigt am: 12.06.2025

# Zusammenfassung

Die Dissertation präsentiert die Entwicklung des Multi-Objective Evolutionary Tool (MOET), einer neuartigen numerischen parametrischen Plattform zur Optimierung von textilbewehrten Betonstrukturen (TRC). Die Motivation dieser Forschungsarbeit liegt in der dringenden Notwendigkeit, den globalen Klimawandel anzugehen und die mit dem Bauwesen verbundenen Treibhausgasemissionen (THG) erheblich zu reduzieren. Ausgangspunkt ist dabei die kritische Betrachtung der Umweltauswirkungen herkömmlicher Baupraktiken. Unter Berücksichtigung des großen Potenzials innovativer TRC-Strukturen zur Minimierung des Materialeinsatzes bei gleichzeitig maximierter struktureller Leistung konzentriert sich diese Studie insbesondere auf filigrane, schalenartige TRC-Strukturen, die durch membranartige Tragwirkungen gekennzeichnet sind. Die genannten Strukturen zeichnen sich durch ein äußerst günstiges Verhältnis zwischen Spannweite und Materialverbrauch aus. Dies führt wiederum zu hervorragender struktureller Leistung. Durch die Verwendung von Kohlenstofffaserbewehrung werden zudem Möglichkeiten zur signifikanten Reduzierung der Betonüberdeckung sowie zur Vermeidung korrosionsbedingter Einschränkungen herkömmlicher Stahlbetonstrukturen untersucht. Aufgrund dessen wird die Dauerhaftigkeit verbessert und die Nutzungsdauer verlängert.

Das entwickelte MOET-Framework integriert Prinzipien des generativen Designs und fortschrittliche numerische Methoden, um so komplexe strukturelle Formen anhand vordefinierter multiobjektiver Kriterien zu erkunden und zu optimieren. Mithilfe parametrischer Modellierung basierend auf einer Datenverarbeitungslogik, die von Mechanismen und Prinzipien natürlicher Systeme bis hin zur molekularen Ebene inspiriert ist, bietet das Framework eine hohe Flexibilität bei der Erkundung des Entwurfsraums. Das MOET-Framework bewältigt die rechnerischen Herausforderungen bei der Analyse komplexer Geometrien und Materialinteraktionen, indem es parametrische Designsoftware mit leistungsstarken Finite-Elemente-Analyse-Tools und Python-basierten Routinen zur Bewertung multipler Versagensszenarien kombiniert. Eine schnelle Iteration und die Evaluierung vielfältiger Entwurfsszenarien werden somit ermöglicht.

Darüber hinaus ist das MOET-Framework für die zukünftige Integration mit Modellen des maschinellen Lernens und der künstlichen Intelligenz ausgelegt, was sein Potenzial als leistungsfähiges Instrument für anspruchsvolle, datengetriebene Entscheidungsprozesse im Bereich der Strukturgestaltung und multiobjektiven Optimierung erhöht. Die Forschung legt besonderen Wert auf eine klare Methodik zur Erhebung und Analyse synthetischer Daten und unterstützt damit die langfristige Vision des Einsatzes prädiktiver Surrogate-Modelle und Optimierungsalgorithmen für dynamische Anpassungen des Entwurfs in Echtzeit.

Das Ergebnis dieser Dissertation ist, dass das MOET-Framework optimierte TRC-Strukturen mit überlegener Tragfähigkeit und erheblicher Materialeinsparung effektiv generiert und somit erheblich zu nachhaltigen Baupraktiken beitragen kann. Der umfassende Ansatz der Arbeit bestätigt die strukturellen Fähigkeiten und Umweltvorteile schalenartiger TRC-Strukturen anhand ausgewählter geometrischer Lösungen. Die experimentelle Validierung der numerischen Simulationen bestätigt die Zuverlässigkeit des rechnergestützten Modells und der vorgeschlagenen Versagensbewertungsmethoden. Dabei zeigen sich deutliche Gewichtseinsparungen, verbesserte strukturelle Leistungen sowie bemerkenswerte Verbesserungen in der Gesamteffizienz des Ressourceneinsatzes gegenüber konventionellen Betonkonstruktionen.

Zukünftige Arbeiten sehen die Verbesserung der Betonierverfahren, detailliertere Analysen sich selbst schneidender TRC-Schalen sowie eine kontinuierliche Weiterentwicklung der MOET-Umgebung zur Unterstützung einer breiteren Anwendbarkeit und Integration mit aufkommenden Bautechnologien vor. Vorgeschlagene zukünftige Forschungsbereiche umfassen zudem die Erweiterung des Frameworks zur Behandlung zusätzlicher Zielgrößen wie Kosteneffizienz und Lebenszyklusbewertung, um letztlich auf eine umweltgerechte und ressourceneffiziente Bauwirtschaft hinzuarbeiten.

# Abstract

The dissertation presents the development of the Multi-Objective Evolutionary Tool (MOET), a novel numerical parametric framework designed to optimise textile-reinforced concrete (TRC) structures. Driven by the urgent need to address global climate change and significantly reduce greenhouse gas (GHG) emissions associated with construction, this research is motivated by the critical environmental impacts of conventional building practices. Recognising the substantial potential of innovative TRC structures to minimise material use while maximising structural performance, the study focuses specifically on filigree, shell-like TRC structures characterised by in-plane membrane actions, unveil the potential of utilisation of the extremely favourable span-to-material ratio that, in turn, means excellent structural performance. Furthermore, by leveraging the advantages of carbon fibre reinforcement, the research further explores opportunities to significantly reduce concrete cover and eliminate corrosion-related limitations common in steel-reinforced concrete, thus enhancing durability and extending service life.

The developed MOET framework integrates generative design principles and advanced numerical methods to explore and optimise complex structural forms based on predefined multi-objective criteria. Employing parametric modelling by means of data processing logic inspired by mechanisms and principles found in the organisation of the natural systems up to the molecular level, the framework ensures a high level of flexibility in exploring the design space. The MOET framework addresses the computational challenges of analysing complex geometries and material interactions by combining parametric design software with powerful finite element analysis tools and Python-based multiple failure assessment methods routines, thus enabling rapid iteration and evaluation of multiple design scenarios.

Additionally, the MOET framework is designed to facilitate future integration with machine learning models and artificial intelligence, enhancing its potential as a robust tool for sophisticated, data-driven decision-making in structural design and multi-objective optimisation fields. The research emphasises establishing a clear methodology for the collection and analysis of synthetic data, supporting the long-term vision of employing predictive surrogate models and optimisation algorithms for dynamic, real-time design adjustments.

The research concludes that the MOET framework effectively generates optimised TRC structures with superior load-bearing capacities and substantial material reductions, thereby demonstrating its potential to significantly contribute to sustainable construction practices.

The comprehensive approach of this research validates the structural capabilities and environmental benefits of TRC shell-like structures in the form of selected geometrical solutions. Experimental validation of numerical simulations confirms the reliability of the computational model and proposed failure assessment methods, highlighting significant weight savings, improved structural performance, and notable enhancements in overall resource efficiency compared to conventional concrete designs.

Future work considers the enhancement of the concreting methods, further detailed analysis of self-intersecting TRC shells, and continued refinement of the MOET environment to support broader applicability and integration with emerging construction technologies. Proposed areas of future exploration also encompass expanding the framework to address additional objectives such as cost-efficiency and lifecycle assessment metrics, aiming ultimately towards an environmentally responsive and resource-efficient construction industry.