

STRUKTUR / GLIEDERUNG KURZBERICHT

Titel

Langfassung Titel: „Globale Stabilität schubweicher anisotroper hochbelasteter Laminat- und Sandwich-Träger unter kombinierter Belastung im Brücken- und allgemeinen Ingenieurhochbau“

Anlass/ Ausgangslage

Hinsichtlich der Stabilität von Faserverbund-Trägern besteht eine Vielzahl offener Fragen. Hauptaugenmerk dieses Vorhabens lag auf der Entwicklung innovativer, schneller und hochgenauer Rechenverfahren, mit deren Hilfe eine Stabilitätsanalyse von Faserverbund-Trägern erfolgen kann. Alle Analysezugänge berücksichtigen die für solche Strukturen typischen Koppeleffekte und transversalen Schubverformungen explizit. Der letzte Punkt erforderte die Verwendung höherer Laminattheorien.

Gegenstand des Forschungsvorhabens

Das Stabilitätsverhalten klassischer isotroper Trägerstrukturen ist insgesamt verstanden und i.A. sehr gut beherrschbar. Hingegen besteht hinsichtlich des Stabilitätsverhaltens im Sinne der Verzweigungstheorie schubweicher Träger in Faserverbund-Bauweise eine erhebliche Anzahl offener Fragen, deren Klärung das geplante Vorhaben gewidmet war. Hauptaugenmerk lag dabei auf der Entwicklung innovativer, schneller und hochgenauer Rechenverfahren, mit deren Hilfe in der Ingenieurspraxis eine globale Stabilitätsanalyse (also hinsichtlich Stabilitätsfällen wie Kippen, Biegedrillknicken, Drillknicken, Biegeknicken, aber auch im Hinblick auf die sog. Gesamtstabilität) von Faserverbund-Trägern erfolgen kann. Die Analysezugänge berücksichtigen die für solche Strukturen typischen Koppeleffekte und transversalen Schubverformungen explizit. Der letzte Punkt machte die Verwendung höherer Laminattheorien erforderlich, die die Einschränkungen der klassischen Laminattheorie erweitern.

Nach dem Schaffen der theoretischen Grundlagen (Kapitel 2 des Abschlussberichts) wurde in Kapitel 3 ein Referenzbauteil konstruiert und nachgewiesen, und zwar in Form eines Hallenrahmens in Faserverbundbauweise unter den für solche Bauwerke üblichen Lastfällen. Kapitel 4 hatte dann die eingehende Diskussion der Effektiveigenschaften von dünnwandigen Faserverbund-Trägern zum Inhalt, hier insbesondere effektive Dehn-, Biege- und Torsionssteifigkeiten. Ein Vergleich mit FEM-Berechnungen zeigte dabei eine sehr gute Übereinstimmung zwischen analytischer Herangehensweise und numerischer Simulation. Kapitel 5 des Abschlussberichts war dann der Betrachtung globaler Stabilitätsfälle gewidmet, wobei hier das Hauptaugenmerk auf der Anwendbarkeit klassischer Handrechenformeln auf Faserverbund-Träger lag. Es zeigte sich dabei, dass es für die Anwendung ausreichend ist, mit bekannten Berechnungsformeln für Verzweigungslasten zu arbeiten, wenn hierin die Effektiveigenschaften für die betrachteten Faserverbund-Träger eingesetzt werden.

Der Themenkomplex der lokalen Stabilität (also das lokale Beulen von Flanschen und Stegen schubweicher Faserverbund-Träger, repräsentiert durch elastisch eingespannte Faserverbund-Platten) als wichtige Grundlage für die Gesamtstabilität wurde in den Kapiteln 6-9 bearbeitet. Die Methode basiert auf der sog. Discrete-Plate-Analysis (Bild 1), im Rahmen derer die einzelnen Segmente gedanklich aus dem Träger freigeschnitten und an den Schnittkanten elastische Einspannungen vorgesehen werden. Kapitel 6 beinhaltet die Herleitung einer Lévy'schen Lösung für die Beulanalyse schubweicher Lamine mit elastischen Randeinspannungen im Rahmen der Schubdeformationstheorie 3. Ordnung, repräsentativ für die Segmente von Laminat-Trägern. Zwar sind solche Lösungen von impliziter Natur und damit für die praktische Anwendung wenig tauglich, sie sind aber exakt im Sinne der getroffenen Annahmen und damit von großem Wert für das Generieren von Referenzlösungen. Eine Beullösung für elastisch eingespannte Faserverbund-Platten nach Art eines Rayleigh-Quotienten wird in Kapitel 7 des Abschlussberichts beschrieben. Diese Art der Lösung basiert auf der Formulierung möglichst einfacher Ansatzfunktionen für die Beulform und der Verwendung einer Energieformulierung, was letztlich auf geschlossen-analytische Näherungsausdrücke für die gesuchten Beullasten führt. Es zeigt sich dabei, dass diese Methode auf sehr verlässliche und genaue Ergebnisse führt, dies allerdings bei einem Bruchteil des Rechenaufwands, der für hochauflösende FEM-Simulationen (Bild 2) notwendig wäre. Eine Erweiterung der Methodik findet sich in Kapitel 8, in dem das Ritz-Verfahren für symmetrische schubweiche Lamine unter komplexen Lastfällen vorgestellt wird. Kapitel 8 bildet damit auch die Grundlage für die Untersuchungen des Kapitels 9, in dem eine ganzheitliche lokale Beulanalyse für dünnwandige Faserverbund-Träger unter Berücksichtigung der Interaktion der einzelnen Segmente (Flansche und Stege) vorgestellt wird. Die Methodik basiert auf dem Ritz-Verfahren, wie in Kapitel 9 bereitgestellt, und der Verwendung von Lagrangeschen Multiplikatoren zur Berücksichtigung der Beulinteraktion der einzelnen Trägersegmente. Die Methode arbeitet hochgenau bei einem Bruchteil des numerischen Aufwandes einer FEM-Analyse (Bild 3).

Fazit

Die Thematik der globalen Stabilität wurde vollumfänglich erfüllt. Die Untersuchungen zeigen auf, dass es möglich ist, klassische Berechnungsformeln auch für Faserverbund-Träger zu verwenden, wenn die entsprechenden effektiven Querschnittskennwerte nach der Verbundtheorie angesetzt werden. Der Aspekt der lokalen Stabilität wurde ebenfalls vollumfänglich bearbeitet, wobei hier neben einfachen geschlossen-analytischen Methoden auch implizite-exakte Lösungen vom Lévy-Typ entwickelt und ausgewertet wurden. Eine semi-analytische Methode wurde mit Hilfe des Ritz-Verfahrens für Lamine mit beliebigen Aufbauten erstellt. Hingegen konnte aus Zeitgründen die Thematik der Gesamtstabilität nicht mehr bearbeitet werden, ebenso wie auch die geplanten Versuche nicht mehr durchführbar waren. Die geleisteten Arbeiten stellen aber sämtliche Grundlagen bereit, um die ausstehenden Arbeitsschritte in einem Folgeprojekt erfolgreich abzuschließen.

Eckdaten

Kurztitel: Globale Stabilität von Laminat- und Sandwichträgern

Forscher / Projektleitung:

Dipl.-Ing. Siham Mittelstedt (Bearbeitung)

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Mittelstedt, TU Darmstadt (vormals SOGETI, Antragstellung und Bearbeitung)

Maxime Miget, administrative Leitung

Gesamtkosten: 289.756,81 € €

Anteil Bundeszuschuss: 202.829,77 €

Projektlaufzeit: 24 Monate

BILDER/ ABBILDUNGEN:

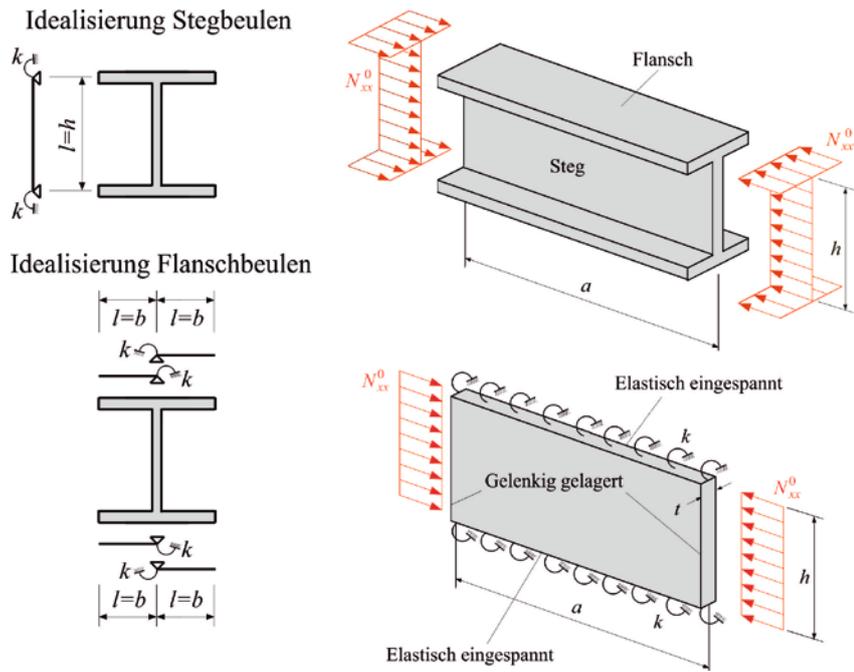


Bild 1: DiscretePlateAnalysis.jpg

Lokale Beulanalyse anhand diskreter elastisch eingespannter Laminat-Platten (links) anhand eines I-Trägers (oben rechts), Ersatzmodell für den Steg eines I-Trägers (unten rechts).

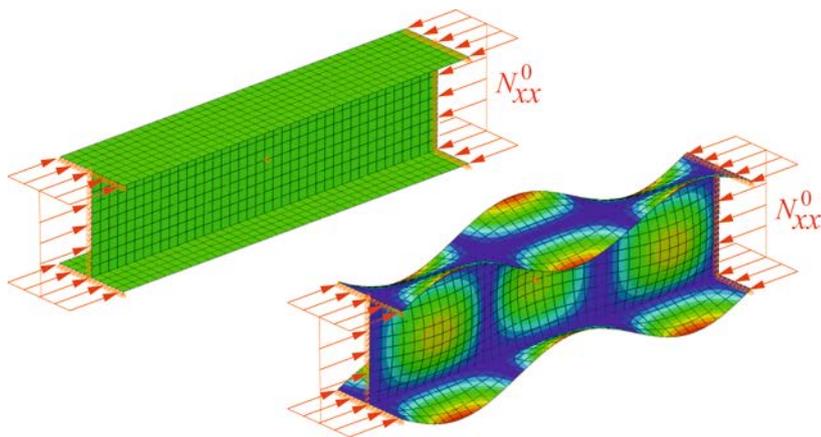


Bild 2: FEM.jpg

Typisches FEM-Modell für die Stabilitätsanalyse (links), lokale Beulform unter uniaxialem Druck (rechts).

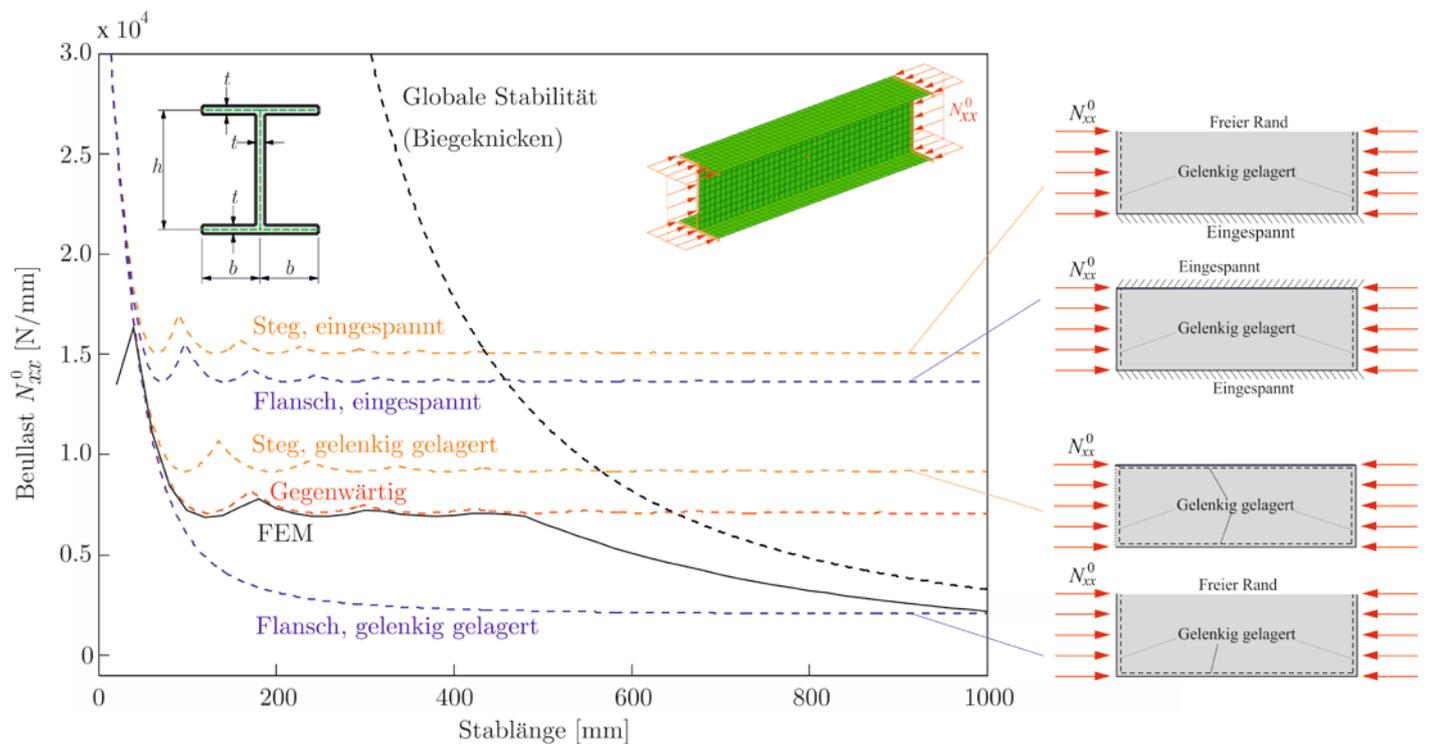


Bild 3: MixedModeBuckling.jpg

Ergebnisse der ganzheitlichen Methode nach Kapitel 9, Vergleich mit den Ergebnissen nach dem Ritz-Verfahren für die beiden Grenzfälle „gelenkig gelagert“ und „eingespannt“ sowie mit FEM-Analysen.