

Darstellung der Förderwürdigkeit der Masterarbeit für den
Forschungspreis der Bundeskammer der ZiviltechnikerInnen 2018:

**UNTERSUCHUNG VON HYBRIDEN AUSSTEIFUNGS-
STRUKTUREN/-SYSTEMEN FÜR DEN HOCHBAU
MIT DER ABLEITUNG VON ENTWURFSMETHODEN**

Verfasser:

Dipl.-Ing. Alexander Stumpf, B.Sc.

Betreuer:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Feix

Mitbetreuer:

Dipl.-Ing. Christoph Walzl, B.Sc.

*Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften
Arbeitsbereich für Massivbau und Brückenbau*

Innsbruck, November 2018

Förderwürdigkeit der Arbeit

Hybrides Bauen hat den Anspruch einer überproportionalen Effizienzsteigerung bestimmter Eigenschaften z. B. eingesetzter Materialien, Bauprozesse oder Tragstrukturen. Im Sommersemester 2015 wurde zum ersten Mal im Masterstudium „Bauingenieurwissenschaften“ der Universität Innsbruck eine neue Lehrveranstaltung „Hybride Konstruktionen“ vom Arbeitsbereich für Massivbau und Brückenbau abgehalten. Zum Thema der hybriden Aussteifungsstrukturen hat Herr Alexander Stumpf mit seiner Masterarbeit unter anderem vertiefende Grundlagen für eine Vorlesungseinheit geschaffen.

Die bauliche Nachverdichtung zur Schaffung von Räumlichkeiten in den Städten Österreichs bleibt mit den steigenden Grundstückspreisen in den wirtschaftlich interessanten Gebieten ein fortwährend aktuelles Thema. Die Untersuchungen in der Masterarbeit zeigen, dass bei Bauwerken ab 30 bis über 50 Stockwerken die Trag- und Verformungseigenschaften durch eine hybride Aussteifung signifikant verbessert werden können. Mit dieser Masterarbeit werden wirtschaftstreibende Ingenieure an das Thema herangeführt – erhalten einen Überblick über mögliche Aussteifungssysteme im Allgemeinen und deren Kombination zu hybriden Aussteifungssystemen im Speziellen. Neben der Beschreibung der Modellbildung findet man anschauliche Bemessungsdiagramme die den Effizienzbereich der untersuchten hybriden Aussteifungssysteme aufzeigen. In der folgenden zusammenfassenden Darstellung kann man sich von der Qualität der Arbeit überzeugen.

Aufbau:

- 1 Ausgangssituation, Motivation und Zielsetzung
- 2 Vorgehensweise
- 3 Relevanz hybrider Aussteifungen
- 4 Untersuchte Hochhausvarianten
- 5 Ergebnisse und Fazit
- 6 Angeführte Literatur

1 Ausgangssituation, Motivation und Zielsetzung

Die Weltbevölkerung und so auch die Bevölkerung in einem Land wie Österreich steigt unaufhaltsam. Dem gegenüber bleibt jedoch die bebaubare Fläche zumeist dieselbe. Und so tritt vermehrt die sogenannte „verdichtete Bauweise“ und damit auch der Gebäudetyp „Hochhaus“ in den Vordergrund. Bei eben diesen Hochhäusern kommt der Gebäudeaussteifung eine besondere Bedeutung zu. Verdeutlicht wird dies in der nachfolgenden Grafik unter Gegenüberstellung der Konstruktionskosten zur Anzahl der Geschosse eines Bauwerkes:

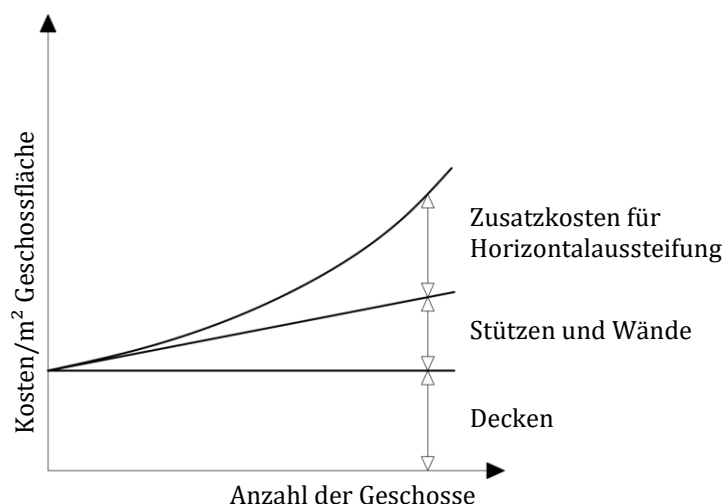


Abbildung 1: Qualitative Gegenüberstellung der Kosten einzelner Konstruktionsteile

Zur Ausbildung der Aussteifungskonstruktion eines Gebäudes stehen dem ausführenden Tragwerksplaner unzählige Kombinationen aus Aussteifungstypen sowie Konstruktionsmaterialien zur Verfügung. Die anspruchsvolle Aufgabe des Ingenieurs besteht nun darin, bereits in einer sehr frühen Projektphase die optimale Konfiguration des Aussteifungssystems im Hinblick auf form-schöne Gestaltung, effiziente Tragstruktur sowie optimaler Energieeffizienz auszuwählen.

Eine äußerst effiziente Aussteifungsvariante stellen hybride Aussteifungen dar. Bei diesen bedeutet der Begriff „hybrid“ eine Kopplung zweier oder auch mehrerer einzelner Aussteifungssysteme zur überproportionalen Steigerung der Trag- und Verformungseigenschaften eines Gebäudes. Die einzelnen Teilsysteme unterscheiden sich dabei in deren Struktur, Material oder durch das Herstellungsverfahren.

Aussteifungstragwerke stellen in der Regel hochgradig statisch unbestimmte Bauwerke dar. Zur Berechnung dieser Bauwerke stehen dem Tragwerksplaner äußerst leistungsfähige und auf die Bedürfnisse von Hochhaustragwerken angepasste Berechnungsprogramme zur Verfügung. Jedoch sind speziell in frühen Projektphasen von Hand ausgeführte Überschlagsrechnungen bzw. Entwurfsformeln von fundamentaler Bedeutung. Nur so können erste Entwurfsskizzen des Architekten bereits im Vorentwurfsstadium auf deren Machbarkeit überprüft und das vom Tragwerksplaner vertretbarste Aussteifungssystem abgewägt werden. Darüber hinaus sind Entwurfsformeln hilfreich bei der Interpretation sowie Plausibilitätskontrolle der Ergebnisse aufwendiger Rechenmodelle.

Die genannten Eckpfeiler der Eigenschaften von hybriden Aussteifungskonstruktionen wurden zur Formulierung der Zielsetzungen zusammengefasst.

Die Ziele der Arbeit können in 3 Punkten anschaulich erläutert werden:

- Da den hybriden Aussteifungskonstruktionen in der Literatur (z.B. (Phocas, 2005), (Liphardt, 1999) oder (König & Liphardt, 2003)) stets verhältnismäßig kurze Absätze gewidmet werden, sollte mit dem vorliegenden Werk dem Arbeitsbereich für Massiv- und Brückenbau der Universität Innsbruck ein Grundlagenwerk für hybride Aussteifungen geschaffen werden. Es werden Anforderungen, Randbedingungen sowie Charakteristiken ausgearbeitet. Vor- und Nachteile werden gelistet und die Einsatzgebiete sowie die Relevanz hybrider Aussteifungen an anschaulichen, realen Beispielen dargestellt
- Zur späteren Bestimmung von Entwurfsformeln ist es ein Augenmerk der Arbeit, die Modellbildung, Vernetzung sowie Aufbringung der Randbedingungen – Gründung sowie Belastung – ausführlich und verständlich aufzuschlüsseln. Es wird ein reales Bauprojekt aufgegriffen, in einem vereinfachten Berechnungsmodell diskretisiert und anhand von 6 Aussteifungs- und Geometrievarianten dessen Verformungs- und Tragverhalten analysiert. So wird dem ausführenden Tragwerksplaner eine Adaptierung an unterschiedlichste Geometrien und Problemstellungen erleichtert
- Für den Einsatz eines hybriden Aussteifungssystems tritt für den ausführenden Ingenieur die Forderung nach Entwurfsmethoden- und Diagramme für festgelegte Randbedingungen als Hilfestellung im Entwurfsstadium zu Tage. So ist das schlussendliche Ziel dieser Arbeit das Finden und grafische Aufzeigen von Zusammenhängen zwischen den Aussteifungsvarianten, sowie eine Tabellierung der notwendigen Randbedingungen im Hinblick auf die Beherrschung der Verformungen sowie Schnittgrößen der betrachteten Hochhäuser.

2 Vorgehensweise

Als erstes erfolgt die Erarbeitung der theoretischen Grundlagen für Bauwerksaussteifungen. Dazu ist es notwendig verschiedene Aussteifungssysteme, deren Einsatzgebiete und Relevanzen, sowie normative Konstruktionsregelungen und Anwendungsgrenzen zu erfassen.

Die weitere Gliederung der Arbeit orientiert sich an der Bestimmung eines Bemessungsgrundrisses sowie -querschnittes und in weiterer Folge an den Vergleichsberechnungen unter Variation des Aussteifungssystems. Es werden Geometrie, Randbedingungen und Belastung ausgehend von einem realen Bauobjekt bestimmt, Vereinfachungen getroffen und bestimmende Parameter am 2-dimensionalen Tragwerk abgeleitet. Abschließend erfolgt die Validierung wiederum am realen Bauwerk. Dabei werden Randbedingungen wie Gründung und Vernetzung analysiert und die Gültigkeit der Erkenntnisse aus ebenen Berechnungen kontrolliert. Die Bemessungen erfolgen mittels softwaregestützter Modellierung. Ergebnisse werden per Handrechnung auf Plausibilität geprüft.

Bei der Auswertung der Berechnungen werden die Ergebnisse in Tabellen zusammengefasst und mithilfe von Diagrammen veranschaulicht. Anschließend wird angestrebt für die vorliegenden Systemlösungen einfache Zusammenhänge zu finden und schließlich Entwurfsformeln und Regelungen für die Vordimensionierung unter festgelegten Grenzen abzuleiten.

3 Relevanz hybrider Aussteifungen

Für die Darstellung der Relevanz hybrider Aussteifungskonstruktionen werden reale Hochhaus-tragwerke auf deren Aussteifung analysiert. Zunächst wird auf Hochhausbauwerke in Österreich eingegangen und anschließend ein Vergleich von internationalen Tragwerken angeführt. Die Betrachtung der Konstruktionen erfolgt stets im Hinblick auf hybride Konstruktionen. Die Relevanz hybrider Aussteifungskonstruktionen – national sowie international – wird jeweils durch einen Vergleich mit den höchsten Hochhausbauwerken der Kategorie hervorgehoben.

Um die Bedeutung von Hochhausaussteifungen und im Speziellen der hybriden Aussteifungen in Österreich zu erfassen, wird die Tragstruktur der beiden höchsten Gebäude des Landes analysiert – der *DC Tower 1* in Wien/Donau City, sowie der *Millennium Tower* in Wien/Handelskai. Der *DC Tower 1* wurde als konventionelles Kern-tragwerk mit Auslegerträgern realisiert, während bereits das zweithöchste Gebäude des Landes – der *Millennium Tower* – als klassische hybride Aussteifung unter Kombination von Stahlbeton-Kern und Verbundbau-Stockwerkrahmen ausgeführt wurde. Ebenfalls wird auf ein aktuelles Hybridbau-Projekte – den *LCT ONE*, ein Holz-Beton-Hybridhochhaus – in Österreich eingegangen. Dies unterstreicht die integrale Planungsthematik beim Thema hybrider Konstruktionen, da sich unterschiedliche Fachdisziplinen an einem Vorzeigeprojekt verwirklichen konnten und die Eigenschaften der einzelnen Konstruktionsteile optimal ausgenutzt und in deren Kombination gesteigert werden konnten.

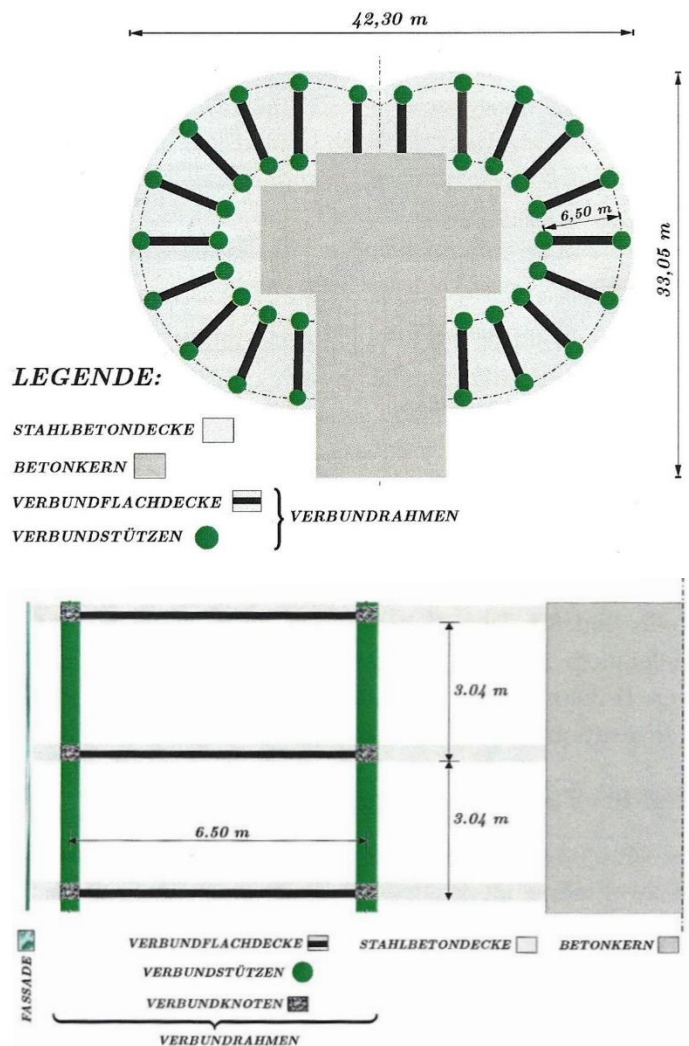


Abbildung 2: Grundriss und Schnitt der Tragstruktur *Millennium Tower* (Arbeitsbereich f. Stahlbau und Mischbautechnologie, 2015)

Im internationalen Vergleich realer Hochhaus-Tragwerke wird die Relevanz hybrider Aussteifungen nochmals verdeutlicht, indem in einer Gegenüberstellung der höchsten Gebäude der Welt analysiert wird, dass 5 der 8 Tragwerke eine eben solche Aussteifungskonstruktion aufweisen.

4 Untersuchte Hochhausvarianten

Den praktischen Teil bildet die Analyse von drei unterschiedlichen Aussteifungsvarianten bei je zwei unterschiedlichen Bauwerkshöhen von 30 sowie 50 Stockwerken. Untersucht wird der Einfluss der Ertüchtigung durch hybride Aussteifungselemente auf die Verformung sowie die dynamischen Bauwerksreaktionen. Ziel ist es, ausgehend von einem konventionellen Aussteifungssystem die hybriden Aussteifungsvarianten zu analysieren, alle Systeme zu vergleichen und im Zuge der Berechnung einfache Zusammenhänge zu ermitteln. Grundlage für die Referenzgeometrie sowie die „Grundaussteifung“ stellt das SV-Hochhaus in München dar.

Die Untersuchungen bezüglich der Effektivität hybrider Aussteifungskonstruktionen werden jeweils am Gesamtsystem, also an einer 3D-Modellierung, durchgeführt. Insgesamt werden 6 Varianten des Bemessungshochhauses analysiert. Diese sind in nachfolgender Tabelle 1 aufgelistet. Angenommen wird eine jeweilige Geschosshöhe von 3,5 m. So haben die Bemessungshochhäuser 01, 02 und 03 von der Geländeoberkante aus gemessen eine Höhe H von 105,0 m, 04, 05 und 06 weisen eine Höhe von 175,0 m auf. Gewählt werden gemäß Vorlage durch das SV-Hochhaus der konventionelle Lastabtrag, sowie für anschließende Vergleichsberechnungen die hybriden Konstruktionen „Kern + Stockwerkrahmen“ und eine „Rohr-in-Rohr“-Konstruktion. Hier angeführt die sogenannte Untersuchungsmatrix:

Tabelle 1: Varianten der Bemessungshochhäuser

Bezeichnung	Stöcke (Typ)	Aussteifung	Hybrides Aussteifungssystem
Hochhaus 01		konventionell Stahlbeton-Kern	nein
Hochhaus 02	30 Stockwerke (Typ 1)	Stahlbeton-Kern + Stahl-Stockwerkrahmen	ja
Hochhaus 03		Rohr-in-Rohr- Konstruktion	ja
Hochhaus 04		konventionell Stahlbeton-Wandscheiben	nein
Hochhaus 05	50 Stockwerke (Typ 2)	Stahlbeton-Kern + Stahl-Stockwerkrahmen	ja
Hochhaus 06		Rohr-in-Rohr- Konstruktion	ja

Der Stockwerkrahmen der Hochhäuser 02 und 05 wird durch eine Stahl-Rahmenkonstruktion einer Verbindung von Rahmen und Kern mittels einer biegesteif angeschlossenen Trägerdecke ausgeführt. Das Rohr-in-Rohr-System wird durch die Ergänzung des konventionellen Systems durch Megafachwerk-Auskreuzungen in der Fassadenebene gebildet. Hier eine 3-dimensionale Darstellung der Bemessungsvarianten mit 30 Stockwerken:

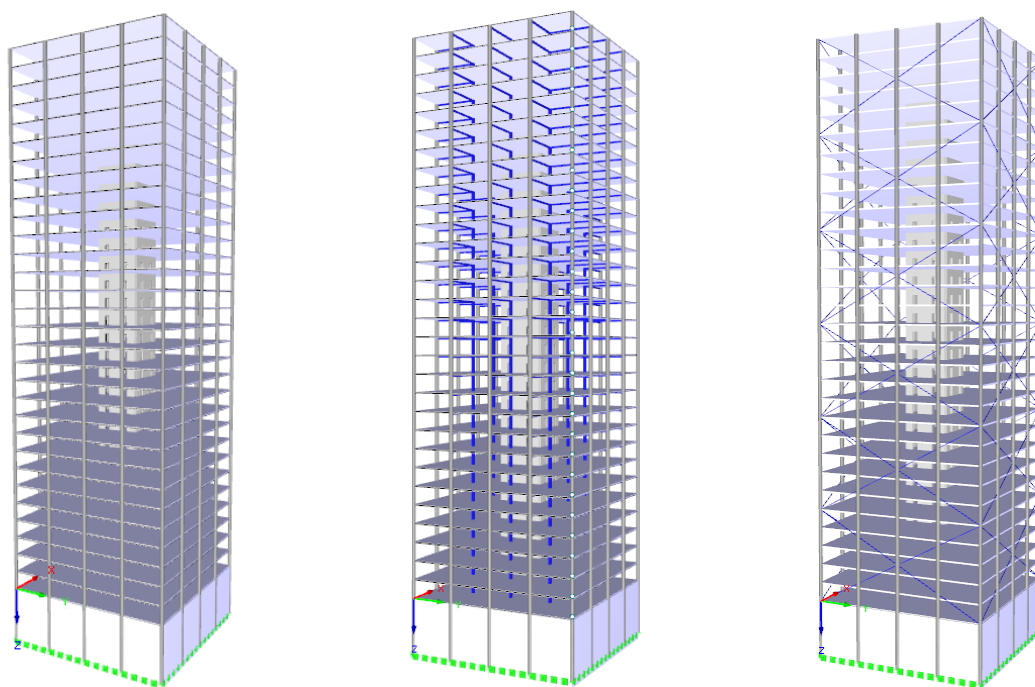


Abbildung 3: 3D-Ansicht Perspektivisch – Bemessungshochhäuser 01/02/03

5 Ergebnisse und Fazit

Die Ergebnisse werden gemäß den Zielsetzungen in Kapitel 1 zusammenfassend in 3 Punkten angeführt:

- Schaffung der theoretischen Grundlage für hybride Aussteifungsstrukturen:
Dem Tragwerksplaner steht ein gesammeltes Werk für die Randbedingungen, die Einsatzgebiete, Anforderungen sowie das Tragverhalten der Komponenten und Gesamtstrukturen dieser integralen Aussteifungsvariante zur Verfügung.

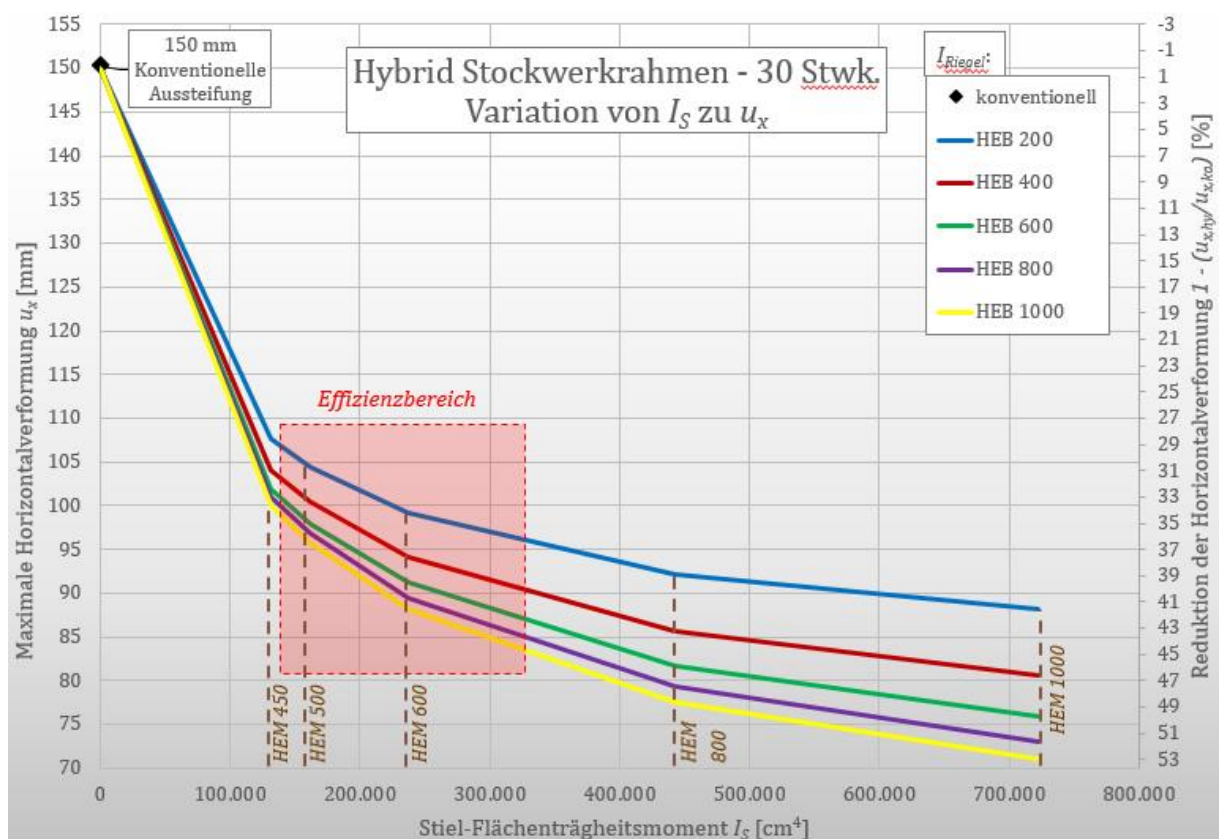
Die konventionelle Kern-Aussteifung stellt für sich bereits ein äußerst effizientes Aussteifungssystem dar, stößt ab einer Höhe von ca. 35 Stockwerken jedoch an wirtschaftliche Grenzen. Durch die hybride Erweiterung kann eine Bauwerkshöhe von über 50 Stockwerken erreicht werden. Durch die hybriden Ertüchtigungen wird eine signifikante Verbesserung der Trag- und Verformungseigenschaften erreicht, wobei eine höhere Gestaltungsdisziplin gefordert wird. Hier liegt die grundsätzliche Entscheidungsbandbreite des Tragwerksplaners.

Die Bedeutung bzw. Relevanz der hybriden Tragwerke wird durch die Verwendung der hybriden Aussteifungsvariante am zweithöchsten Gebäude sowie an einer Vielzahl der weltweit höchsten Bauwerke dargelegt.

- Im Kapitel 6 der Masterarbeit wird dem ausführenden Ingenieur eine Bemessungsvorlage in Bezug auf die Modellbildung und Bemessung gem. Eurocode angeführt. Es wird auf die Einwirkungen eingegangen, welche auf ein Hochhaus-Bauwerk wirken, die Gründungs- und Vernetzungsparameter erarbeitet, sowie ein die Grundlage der Parametervariation für die spätere Ergebnisauswertung anschaulich angeführt.

- Diagramme zur Einschätzung des Verformungsverhaltens werden für die analysierten Bemessungshochhäuser angeführt. Diese sind je Aussteifungsvariante und -höhe angeführt. Darin wird der Effizienzbereich ausgewiesen, welcher den Anwendungsbereich der zu verwendenden Tragwerkskomponenten einschränkt.

Hybride Aussteifungskonstruktionen, im Besonderen die untersuchten Varianten Stockwerkrahmen- sowie Rohr-in-Rohr- Tragwerke, stellen äußerst effiziente Hochhaus-Aussteifungstragwerke dar. Eine signifikante Verbesserung des Trag- und Verformungsverhaltens wird jedoch erst ab einer gewissen Gebäudehöhe sichtbar. Dies zeigt sich in den ausgearbeiteten Bemessungsdiagrammen bezüglich der jeweiligen Verformungseigenschaften. Ein qualitatives Beispiel für eine Bemessungshilfe in Form eines Diagrammes wird nachfolgend angeführt. Zu sehen ist hier die Beeinflussbarkeit der maximalen Horizontalverformung unter Variation der Rahmensteifigkeit beim Bemessungshochhaus 02 (siehe Tabelle 1):



6 Angeführte Literatur

- Arbeitsbereich f. Stahlbau und Mischbautechnologie. (2015). *Grundlagen des Verbundbaus, WS 2015/16*. Innsbruck.
- König, G., & Liphardt, S. (2003). *Hochhäuser aus Stahlbeton. Beton-Kalender 2003, Teil 1, S. 1-66*. Berlin: Ernst & Sohn.
- Liphardt, S. (1999). *Hochhaustragwerke - Stand der Entwicklung, Darmstädter Statik Seminar 1999*. Darmstadt.
- Phocas, M. C. (2005). *Hochhäuser, Tragwerk und Konstruktion*. Wiesbaden: B.G. Teubner-Verlag.