



Schlussbericht

Machbarkeitsstudie zu Schwerlastbrücken in Holz für
Schweizer National- und Kantonsstrassen
« 40 Tonnen, 40 Meter, 40 gute Gründe »

Steffen Franke, Bettina Franke, Constantin Pfindel, Vasiliki Gkesouli, Christophe Sigrist
31. März 2024

*Dieses Projekt wurde unterstützt durch die Wald- und Holzforschungsförderung Schweiz (WHFF-CH)
im Projekt WHFF 2021.15.*

Forschungsbericht - Schlussbericht
Machbarkeitsstudie zu Schwerlastbrücken in Holz
1.Januar 2022 – 31. Dezember 2023

Published by
Bern University of Applied Sciences
Architecture, Wood and Civil Engineering
Solothurnstrasse 102
CH-2504 Biel

<https://www.bfh.ch/ahb/de/forschung/forschungsprojekte/2022-679-845-866/>

«40 Tonnen, 40 Meter, 40 gute Gründe»

Schlussbericht

Bericht Nr. 74FE-011845-R-01

Auftrag Nr. 01.0101.PZ/E6D9E8CB3/2021.15

Klassifizierung

Datum 31. März 2024

Auftraggeber Bundesamt für Umwelt
Abteilung Wald
3003 Bern

Adresse der Forschungsstelle Berner Fachhochschule
Architektur, Holz und Bau
Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur
Kompetenzbereich Holzbau
Solothurnstrasse 102
2500 Biel/Bienne 6

www.ahb.bfh.ch

Verfasser/in Prof. Dr. Steffen Franke, Dr. Bettina Franke, Constantin Pfindel, Vasiliki Gkesouli, Prof. Dr. Christophe Sigrist

Projektverantwortliche/r Prof. Dr. Steffen Franke

Leiter FDW Prof. Dr. Frédéric Pichelin

Abstract

Für die Klima-Neutralität der Schweiz im Jahr 2050 braucht es neue nachhaltige Lösungen für die Verkehrswege/Brücken in der Schweiz. Die Realisierung von weitspannenden und mehrspurigen Schwerlastbrücken in Holz wäre ein wichtiger Schritt hierzu. Die Ausbildung der bekannten Hohlkastenquerschnitte aus dem Betonbau soll in Verbindung mit der Vorspanntechnologie in Holz geprüft werden.

Zur Erarbeitung des optimalen Trag- und Verformungsverhaltens in Brückenquer- und -längsrichtung des Hohlkastenquerschnittes ist ein parametrisiertes Modell erarbeitet wurden. Die Anwendung der Vorspanntechnologie mit Spanngliedführung, Anzahl der Litzen und Verankerung ist rechnerisch geprüft. Ein initiales Arbeitsmodell in annähernd Originalgrösse diente der Erarbeitung von Lösungen und zur Bewertung praxisrelevanter Fragen zur Ausführung.

Im Projektablauf konnten insgesamt sechs Workshops mit den Partnern aus der Praxis zielführend umgesetzt werden. In der Methodik wurden jeweils die thematischen Fragen in Gruppen bearbeitet, Lösungsansätze skizziert und Ergebnisse anschliessend gemeinsam diskutiert.

Im Ergebnis der Machbarkeitsstudie entstand primär der Entwurf eines Brückenquerschnittes in Holz. Sekundär ist eine Variante in Holz-Beton Verbund mit betrachtet. Der Brückenquerschnitt umfasst drei Fahrspuren mit Pannenstreifen in Fahrtrichtung. Die Spannweiten wurden zu 40-60-40 Meter für mögliche Brücken in

Längsrichtung der Trasse geplant. Anhand der Schnittgrössen und Vorbemessung wird ein modulartiger Kastenquerschnitt mit geraden Stegen als Lösungsansatz näher betrachtet.

Für die Realisierung der Brücke in Längssichtung sind die Aspekte:

- Anforderungen und Profilquerschnitt
- Entwurf und Evaluierung von Brückenquerschnitten
- Nachweis der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit auf Niveau Vorbemessung
- Herstellung, Ausführung und Transport des definierten Brückenquerschnittes
- Anwendung und Wirkungsweise der Vorspanntechnologie in Längsrichtung, Spanngliedführung und Verankerung der Spannglieder
- Ansatzdiskussion zur Ausbildung von Details, u.a. Fahrbahnaufbau, Schrammbordanschluss, Wasserführung

betrachtet worden. Das dynamische Verhalten, die Beanspruchung durch Erdbeben und die Realisierung des Brandschutzes sind nicht Bestandteil der Machbarkeitsstudie gewesen.

Die erreichten Ergebnisse sind wegweisend und zeigen das Potential von Holz in der Realisierung von Schwerlastbrücken in Längsrichtung auf. Die in Ansätzen erarbeiteten Lösungen sind für die technische Realisierung in experimentellen Prüffreihen zu beständigen und gerade im Hinblick auf das Langzeittragverhalten zu evaluieren.

Keywords: Holz, Brücken, Schwerlastverkehr

Inhaltsverzeichnis

1 Projektbeschrieb	7
2 Umsetzung des Projektes	7
3 Darlegung der Ergebnisse	10
3.1 Prinzipielle Anforderungen	10
3.2 Arbeitsmodell	11
3.3 Brückentypologie in Längsrichtung	13
3.4 Statisches System in Längsrichtung	14
3.5 Brückenquerschnitt	16
3.6 Modell zu den Lastannahmen und Schnittgrößen	18
3.6.1 Querschnittsdefinition	18
3.6.2 Ständige Einwirkungen	18
3.6.3 Verkehrslasten	19
3.6.4 Brems- und Beschleunigungskräfte	20
3.6.5 Windlasten	20
3.6.6 Erdbebenlasten	21
3.6.7 Lasten aus Hochwasserereignis	21
3.6.8 Schneelast	21
3.6.9 Lastkombinationen und Schnittgrößen	21
3.7 Nachweis der Tragfähigkeit des Querschnitts – Niveau Vorbemessung	22
3.7.1 Materialkenngrößen	22
3.7.2 Berechnungsansatz und Materialisierung	22
3.7.3 Nachweise: Biege- und Schubnachweis	25
3.7.4 Auflagerpressung	28
3.8 Gebrauchstauglichkeit	29
3.9 Vorspanntechnologie	30
3.9.1 Interne versus externe Vorspannung	31
3.9.2 Vorspanngrad	33
3.9.3 Einfluss der Vorspannung auf die Tragsicherheit bzw. Gebrauchstauglichkeit	33
3.9.4 Verankerung der Spannglieder im Holzbau	36
3.9.5 Zusammenfassung – Ausblick	42
3.10 Ausführung und Herstellung	44
3.10.1 Varianten	44
3.10.2 Empfehlung	46
3.11 Detailausbildung	47
3.11.1 Fahrbahnaufbau	47
3.11.2 Schrammbordanschluss & Rückhaltesystem	48
3.11.3 Fahrbahnübergang	49
3.11.4 Querstoss der Stege	50
3.12 Wissenstransfer	51
4 Zusammenfassung	52
5 Ausblick	53
6 Danksagung an die Projektpartner	54

7	Anhang A	55
7.1	Einwirkungen - Lastkombinationen	55
8	Literaturverzeichnis	58

1 Projektbeschrieb

Die Klimaneutralität der Schweiz 2050¹ wurde vom Bundesrat verabschiedet und nun gilt es Lösungen in allen Branchen zu erarbeiten. Die Realisierung von Hochhäusern in Holz zeigt den zukünftigen Weg des Bauens und gewinnt hier Marktanteile dazu. Dennoch werden Brücken auf der anderen Seite heutzutage immer noch überwiegend in Beton und Stahl gebaut. Die Schweiz verfügt über ein 2254.5 km langes Nationalstrassennetz mit bereits insgesamt 4270 Brücken in den Hauptachsen oder als Überführungen, Röthlisberger (2020). Hinzu kommen z.B. allein im Kanton Bern weitere 2037 km Kantonsstrassen mit 1000 Brücken, Kanton Bern (2021). Der Jahresbericht des ASTRA vermerkt zudem, dass der Schwerlastverkehr um 3.9 Prozent zugenommen hat, Röthlisberger (2020).

Allein die Anzahl der Brückentragwerke des Nationalstrassennetzes, mit ~2 Brücken pro Kilometer Verkehrsnetz, beweist eine sehr hohe Dichte/Anzahl von Brückentragwerken in der Schweiz. Innerhalb der nächsten 10 Jahre müssen ca. 300 Brücken instandgesetzt oder durch einen Ersatzbau erneuert werden. Eine Ausführung in Holz umfasst gegenüber Beton ein CO₂-Wirkungspotential (Speicherung und Einsparung) von 2.7 Mio. Tonnen. An dieser Stelle setzt die «Machbarkeitsstudie zu Schwerlastbrücken in Holz für Schweizer National- und Kantonsstrassen» - « 40 Tonnen, 40 Meter, 40 gute Gründe » an.

Im vorliegenden Forschungsprojekt soll über eine Machbarkeitsstudie geprüft werden, inwiefern bekannte Techniken für Schwerlastbrücken aus dem Betonbau im Holzbau nahezu 1:1 anwendbar sind. Der Grundgedanke ist, in Anlehnung an vorgespannte Hohlkastenbrücken in Beton einen tragenden Hohlkasten aus Holz als Brückenquerschnitt auszubilden. Unter zusätzlicher Anwendung der Vorspanntechnologie sollen dann Schwerlastbrücken in Holz für eine erste Auslegung von 40 t und 40 m Spannweite realisiert werden können. Die Vorspannung erzeugt durch Überdrücken der Zugzone günstige Spannungsbedingungen im Bauteil, was eine effiziente Nutzung der Baumaterialien ermöglicht. Das Forschungsgesuch, wird als erster Baustein in der Gesamtstrategie zur klimafreundlichen Infrastruktur in der Schweiz, gesehen und gliedert sich in die folgenden Arbeitspakete und Meilensteine (vgl. Abb. 1).

2 Umsetzung des Projektes

Das Projekt konnte am 1. Januar 2022 zielgerichtet starten und wurde gemäss dem Zeitplan in Tabelle 1 umgesetzt. Es gliederte sich in insgesamt sechs Workshops die thematisch den Arbeitspaketen aus dem Projektantrag zugeordnet sind, vgl. Abb. 1. Gegenüber der skizzierten Projektschiene im Antrag wurde das Arbeitsmodell gleich zu Beginn gemeinsam mit den Partnern aus der Praxis realisiert. Dieser Entscheid erwies sich als äusserst wirkungsvoll für die Diskussionen und gleichfalls für die Erweiterung der Interessierten an der Thematik. Zusätzlich ergab bei der Umsetzung des Projekts ein neues Arbeitspaket, welches zu Ansatzdiskussionen bezüglich der wichtigsten Konstruktionsdetails diente.

¹ <https://www.admin.ch/gov/de/start/dokumentation/medienmitteilungen.msg-id-76206.html>

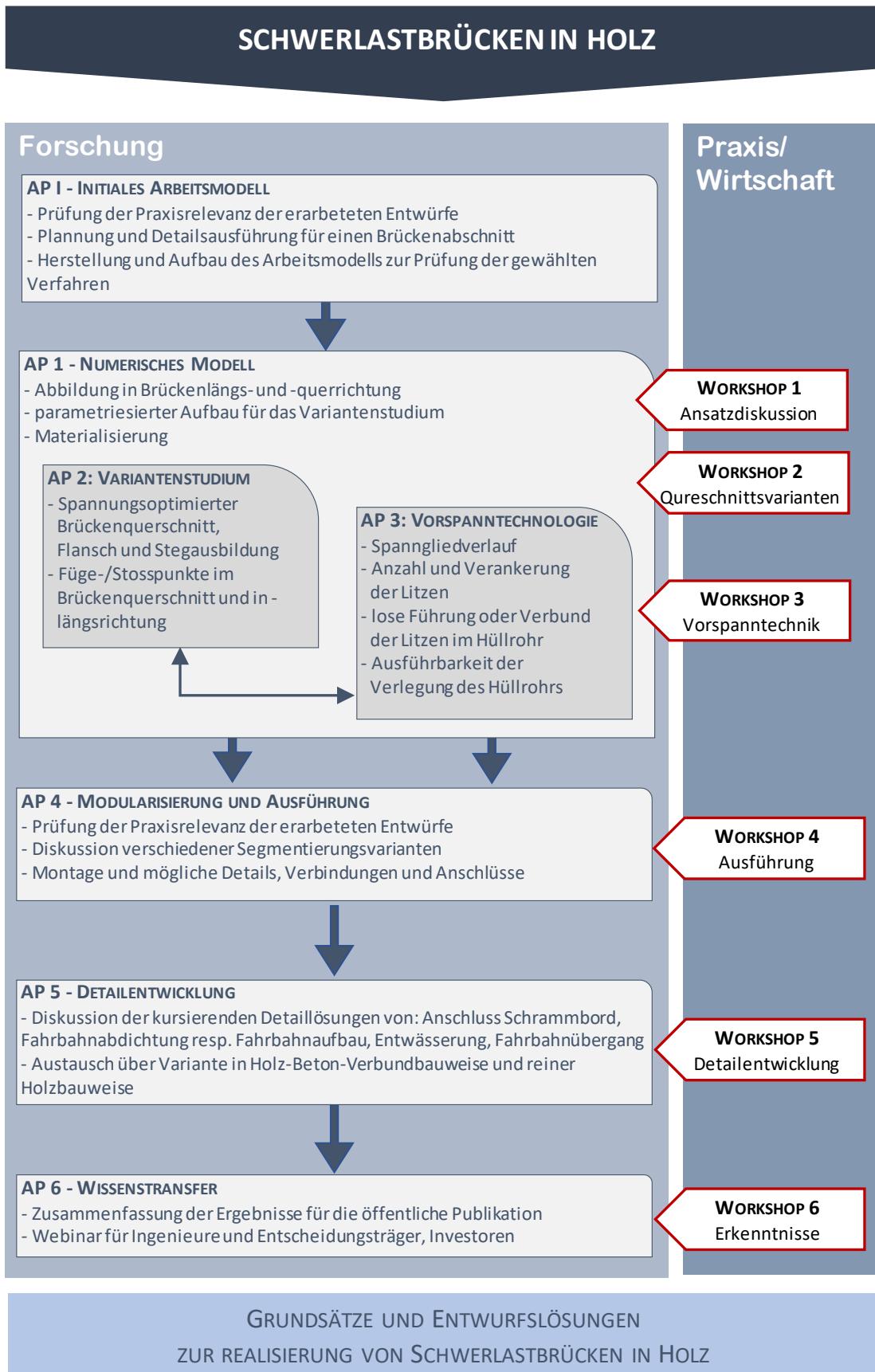


Abb. 1: Projektgliederung in Arbeitspakte mit Meilenstein und Richtungen des Wissenstransfers

Tabelle 1: Arbeitsplan mit definierten Arbeitssitzungen, (BFH-Berner Fachhochschule, WiPa-Wirtschaftspartner)

3 Darlegung der Ergebnisse

3.1 Prinzipielle Anforderungen

Im Folgenden werden die erreichten Ergebnisse aus den Workshops mit den Experten und die Forschungsarbeiten an der BFH vorgestellt. Im ersten Workshop wurde der Schwerpunkt der Machbarkeitsstudie auf Brücken in Längsrichtung des Nationalstrassennetzes gesetzt. In dem zweiten Workshop wurden die bestimmten Lastannahmen und Schnittgrößen vorgestellt. Ferner wurden mit den Experten gemeinsam Brückenquerschnitte im Zusammenhang mit der Brückentypologie, der Herstellung und Montage wie auch den Fügepunkten evaluiert.

Ziel sind zukunftsweisende Konstruktionen für die Schweizer Infrastruktur. Aus diesem Grund wird ein Regelquerschnitt mit 3 Fahrspuren plus Pannenstreifen für die Brückenbreite definiert, vgl. Abb. 2. In der Materialwahl liegt der Fokus zunächst auf 100 % Holz im Tragwerk. Holz-Beton-Verbund Varianten oder Lösungen mit ultrahochleistungsfähigem Beton stehen in dieser Machbarkeitsstudie nicht im Vordergrund.

Die Gliederung der nachfolgenden Abschnitte orientiert sich an den Entwurf und beginnt mit dem Arbeitsmodell, welches als erstes Statement platziert wurde, gefolgt von der Auswahl der Brückentypologie in Längsrichtung, Festlegung des statischen Systems gefolgt von den Lastannahmen und Schnittgrößen, dem Entwurf/ Validierung des Brückenquerschnittes, die Vorbemessung, Prüfung der Vorspanntechnologie und der Ansatzdiskussion zur Ausführung, Herstellung und Detailausbildung. Abschliessend wird der erfolgte Wissenstransfer vorgestellt.

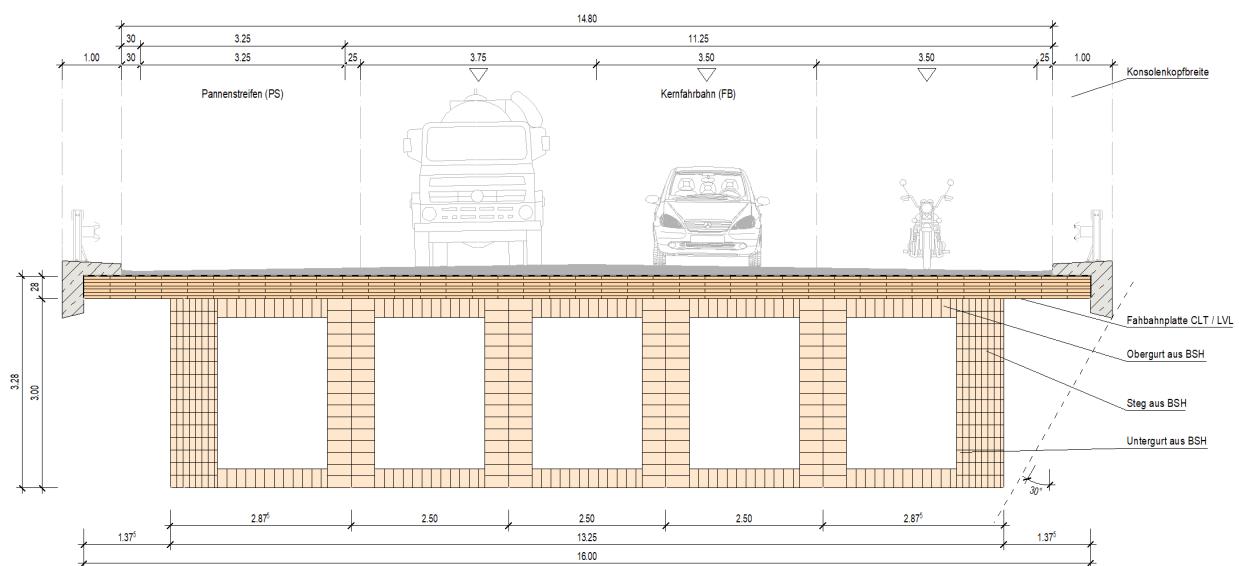


Abb. 2: Definition der Fahrspuren gem. Rili ASTRA 11001(2021), prinzipieller Brückenquerschnitt

3.2 Arbeitsmodell

Im Zuge der Bearbeitung des Projektes wurde immer wieder eine grosse Skepsis gegenüber den allgemeinen Zielen innerhalb der Machbarkeitsstudie und der Möglichkeit zur Realisierung eines Hohlkastenquerschnittes in Holz gespürt. Gemeinsam mit den Wirtschaftspartnern wurde aus diesem Grund entschieden das Arbeitsmodell vorzuziehen und als erstes Statement zu platzieren. Ein zweiter Grund war die Idee mit vielen internationalen Holzbrückenexperten die Idee des Forschungsgesuchs bereits zu teilen. Nichts ist anschaulicher und einprägsamer als ein Exponat.

Grundlage für den Entwurf des Arbeitsmodells, war die Form eines typischen Hohlkastenquerschnittes aus dem Stahl- und Spannbetonbau, vgl. Abb. 3. Als Materialien wurden Brettsperrholzelemente aus dem ehemaligen Aussenprüfstand zur Evaluierung der TS3-Technologie wiederverwendet. Die Fügung der Elemente erfolgte über die TS3-Technologie. Das Arbeitsmodell ist bereits mit ausgewählten Details wie u. a. einem Schrammbord, Geländer und den erforderlichen Abdichtungen ausgeführt. In Abb. 4 ist die Errichtung des Arbeitsmodells im Mai 2022 zu sehen und Abb. 5 das fertiggestellte Arbeitsmodell.

Das Exponat diente bereits im zweiten Workshop als gute Diskussionsbasis zur Findung von alternativen Querschnitten. Anschaulich konnten Ausführungsmöglichkeiten, Vereinfachungen oder andere Formen diskutiert werden. Auch beim dritten Workshop zur Vorspanntechnologie diente es als wichtiges Hilfsmittel zur Planung und Ausführung der Spanngliedkanäle.

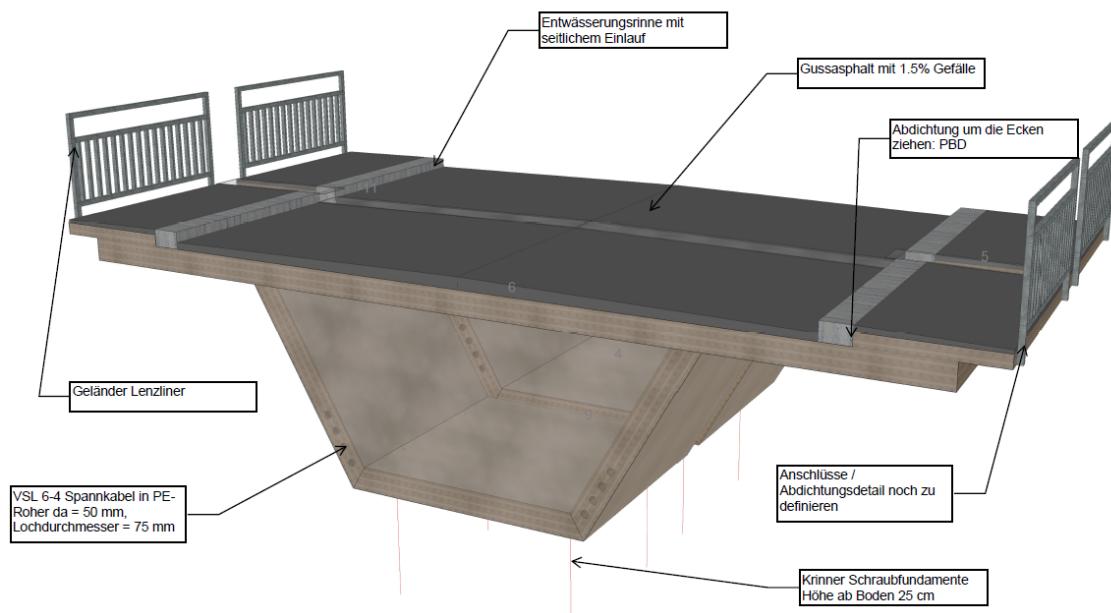


Abb. 3: Planung des Arbeitsmodells mit Angabe der einzelnen Komponenten



Abb. 4: Errichtung des Arbeitsmodells, BFH Campus - Solothurnstrasse 102, Biel



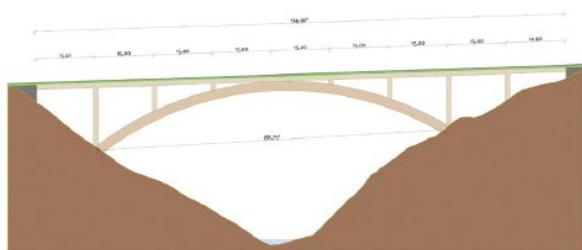
Abb. 5: Realisiertes Arbeitsmodell am Standort, BFH Campus - Solothurnstrasse 102, Biel

3.3 Brückentypologie in Längsrichtung

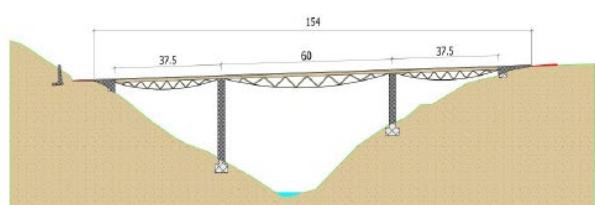
Die Brückentypologie umfasst die konstruktive Ausbildung der Brücke u.a. als Bogenbrücke, Durchlaufträger-/Balkenträgerbrücke oder Sprengwerke, vgl. Abb. 6. Die standardmässigen Varianten wurden mit Fachwerkträgern, Holzbeton-Verbundbrücken und der Hohlkastenbrücke erweitert. Alle Varianten wurden unabhängig von den Experten in den Workshops evaluiert, siehe hierzu Abb. 7. Das Ergebnis konzentriert sich auf den Standardbrückentyp, eine gerade schlichte Hohlkastenbrücke, die der Typologie Balkenträgerbrücke zuzuordnen ist. Die Argumente hierfür waren:

- eine möglichst schlichte Konstruktion mit regelmässigen, einfachen und geraden Anschlüssen
- durchgängiger Brückenquerschnitt resp. Hohlkastenquerschnitt
- Anzahl der Anschlüsse kann möglichst gering gehalten werden
- gute Umsetzung des konstruktiven Holzschutzes zur Sicherung der Dauerhaftigkeit der Brücke.

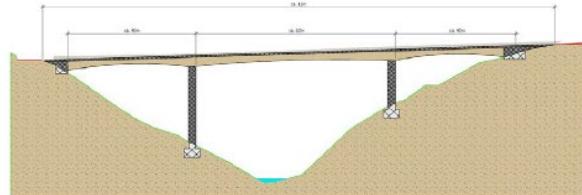
Bogenbrücke



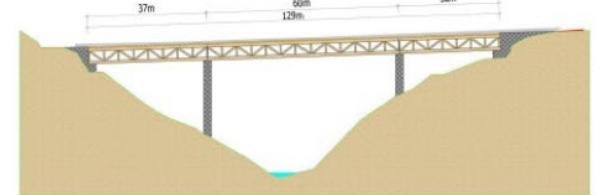
Fischbauchbrücke



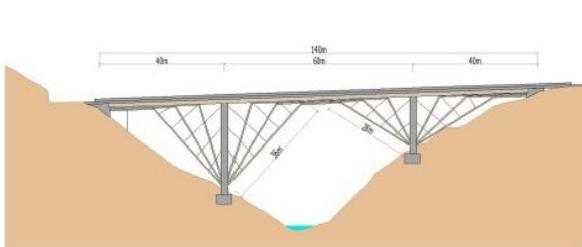
Holz-Beton-Verbundbrücke



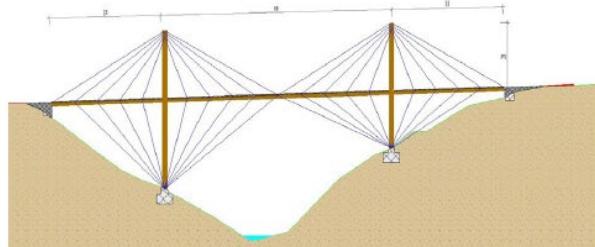
Fachwerkbrücke



Sprengwerkbrücke



Schrägseilbrücke



Hohlkastenbrücke



Abb. 6: Prinzipiell dargestellte Brückentypologien in Längsrichtung; (Quelle: Bogen-, Fischbauch-, Holz-Beton-Verbund-, Fachwerk-, Sprengwerk- und Schrägseilbrücke stammen aus 6 Präsentationen einer Semesterarbeit an der BFH)

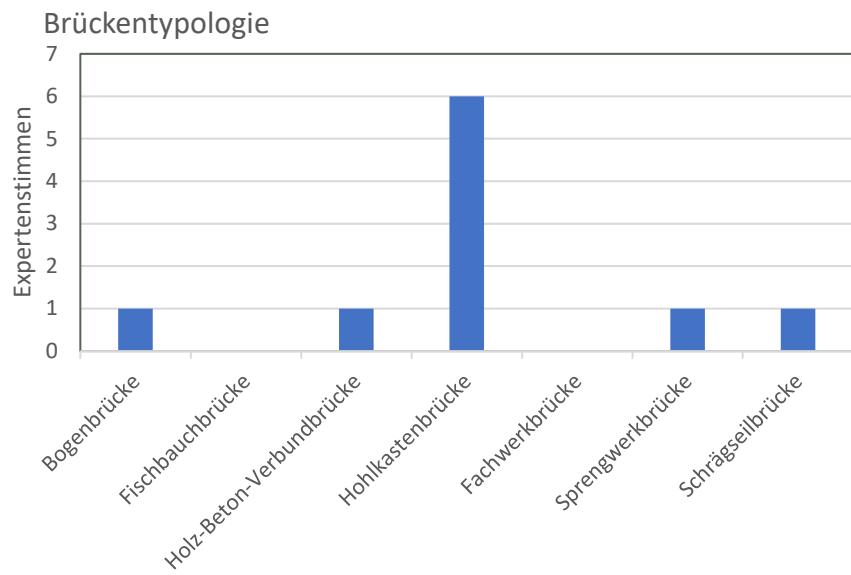


Abb. 7: Ergebnis der Evaluierung zur Brückentypologie für Schwerlastbrücken in Holz

3.4 Statisches System in Längsrichtung

Brücken in Längsrichtung im National- und Kantonstrassennetz sollen einen möglichst geringen Umwelteinfluss, begründet durch die Landschaftsschutzkonzepte, nehmen und deshalb ein möglichst grosses offenes Lichtraumprofil mit wenigen Stützen aufweisen. Für Brücken in Querrichtung zum National- und Kantonstrassennetz ist eine realisierte Spannweite ohne Mittelabstützung von Vorteil für den Bau, Betrieb und Unterhalt. Aktuell werden wirtschaftliche Brückenbauwerke mit Spannweiten von 25 bis 40 m im Allgemeinen, im Stahl – und Spannbetonbau mit ca. 38 m realisiert².

Auf der einen Seite liegt das Landschaftsschutzkonzept und auf der anderen Seite der ingenieurmässige Aspekt, das Verhältnis zwischen Spannweite und Anzahl von Pfeilern/Stützen. Die grössten Spannweiten sind am besten mit einem Mehrfeldträgersystem zu erreichen, da durch die Durchlaufwirkung geringere Schnittgrössen auftreten und auch die Robustheit und Redundanz sich im Tragwerk erhöht. Statische Systeme mit Gelenken sollten generell vermieden werden². Daher wird Variante 2 nicht weiter betrachtet.

Das Ergebnis der Evaluierung bestätigt für die Machbarkeitsstudie das Dreifeldsystem mit durchlaufenden konstanten Brückenquerschnitt, vgl. Abb. 9. Im Mittelfeld soll die Machbarkeit einer Spannweite von 60 m geprüft werden. Die anderen statischen Systeme in Längsrichtung werden nicht generell ausgeschlossen. Denn jede Brücke ist ein individuelles Projekt und pauschale Annahmen sind eher schwierig. Es ist je nach Situation und Randbedingungen, wie u. a. die Austauschmöglichkeit von Tragglieder und der Unterhalt, individuell in einer tatsächlichen Planung zu berücksichtigen. Die Spannweite für den Ein- und Zweifeldträger wurden äquivalent über die massgebenden Schnittgrössen aus dem Dreifeldträgersystem abgeleitet. Die Schnittgrössen werden hierdurch skalierbar auf die anderen Systeme übertragen.

² Gespräch mit Herrn W. Waldis, UVEK Bundesamt für Strassen ASTRA, 9. Juni 2022

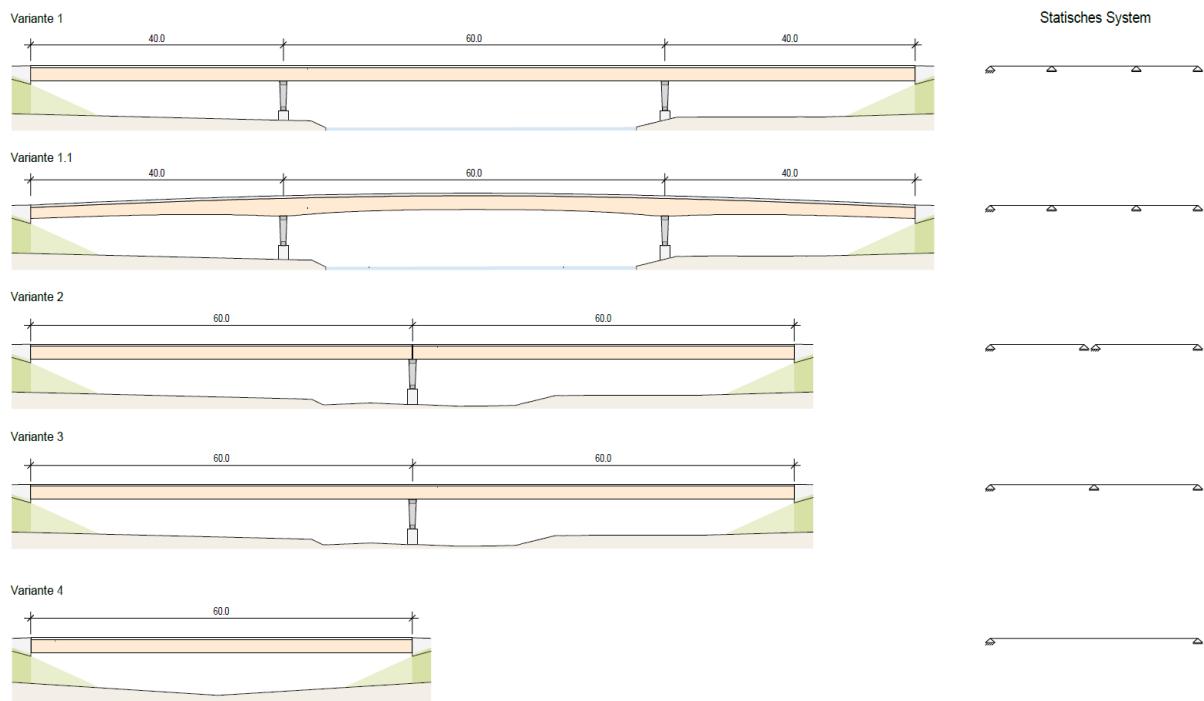


Abb. 8: Auswahl an statischen Systemen in Längsrichtung, Variante 1: durchlaufendes Dreifeldsystem mit konstantem Querschnitt; Variante 1.1 durchlaufendes Dreifeldsystem mit variablem Querschnitt; Variante 2 gestossener Zweifeldträger; Variante 3: durchlaufender Zweifeldträger; Variante 4: Einfeldträger

Statisches System in Längsrichtung

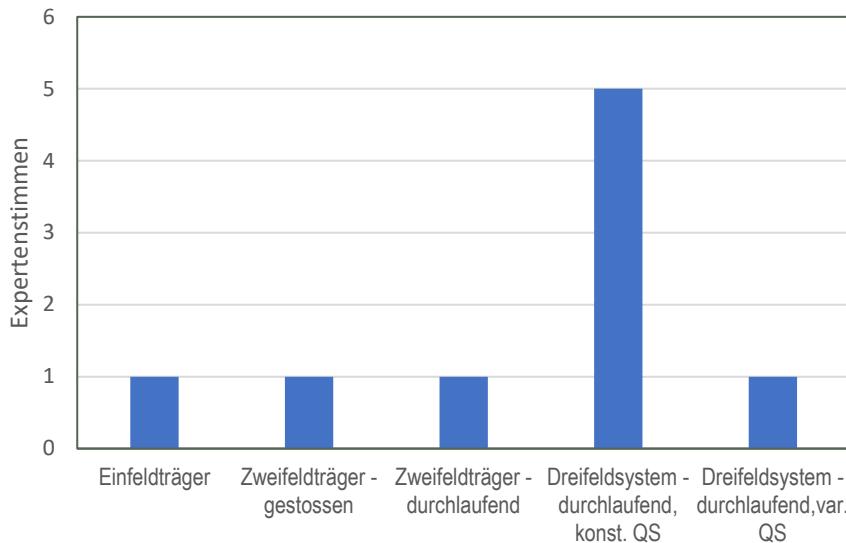


Abb. 9: Ergebnis der Evaluierung zum statischen System in Längsrichtung für Schwerlastbrücken in Holz

3.5 Brückenquerschnitt

In der Brückentypologie wurde eine Balkenträgerbrücke mit Hohlkastenquerschnitt definiert. Die Varianten in der Ausbildung des erforderlichen Hohlkastens für den Brückenquerschnitt sind wiederum zahlreich. Beginnend mit dem vom Stahl-/und Spannbeton abgeleiteten typischem Querschnitt mit geneigten Stegen, zu Fachwerkträgern oder modularartig gerade zusammengesetzte Hohlkastenquerschnitten. Abb. 10 enthält Varianten, die als Diskussionsgrundlage für den zweiten Workshop verwendet wurden.

Die Experten diskutierten dann anhand des typischen Trag- und Verformungsverhalten von Holz, den ersten Schnittgrößenverläufen und dem Arbeitsmodell intensiv über mögliche Brückenquerschnitte. Im Gesprächsmittelpunkt standen die Steifigkeit des Querschnittes, eine möglichst einfache Montage sowie Fertigung und die Implementierung der Vorspannung. Mit Blick auf die Nachhaltigkeit wurde auch Augenmerk auf die Materialeffizienz und Materialisierung gelegt. Die Verwendung von blockverleimten Brettschichtholzträgern wurde aus diesem Grund in der Machbarkeitsstudie ausgeschlossen. Die Evaluierung der Ergebnisse aus einzelnen Gruppenarbeiten im zweiten Workshop belegen eine Konzentration auf einen Hohlkasten mit geraden Stegen in den inneren und äusseren Bereichen.

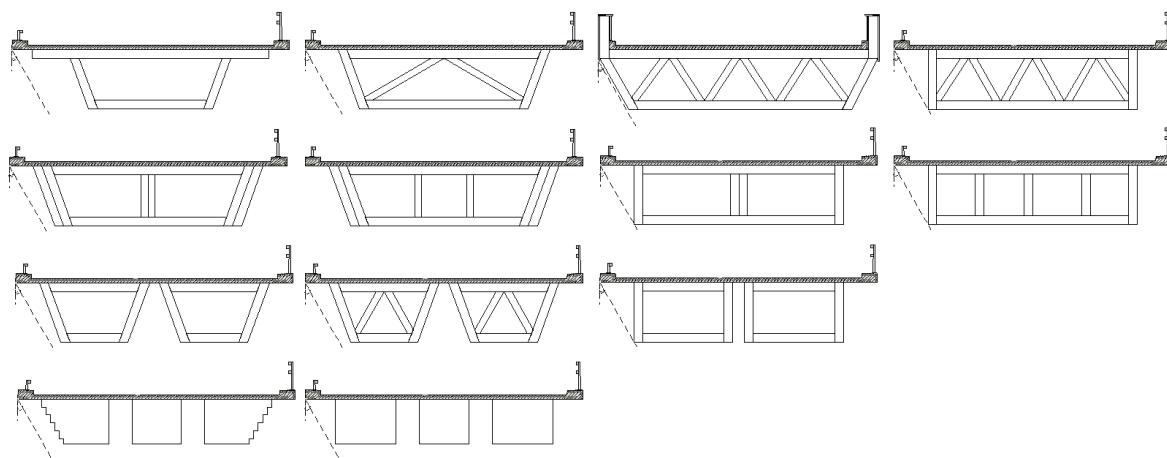


Abb. 10: Skizzen verschiedener Brückenquerschnitte als Diskussionsgrundlage

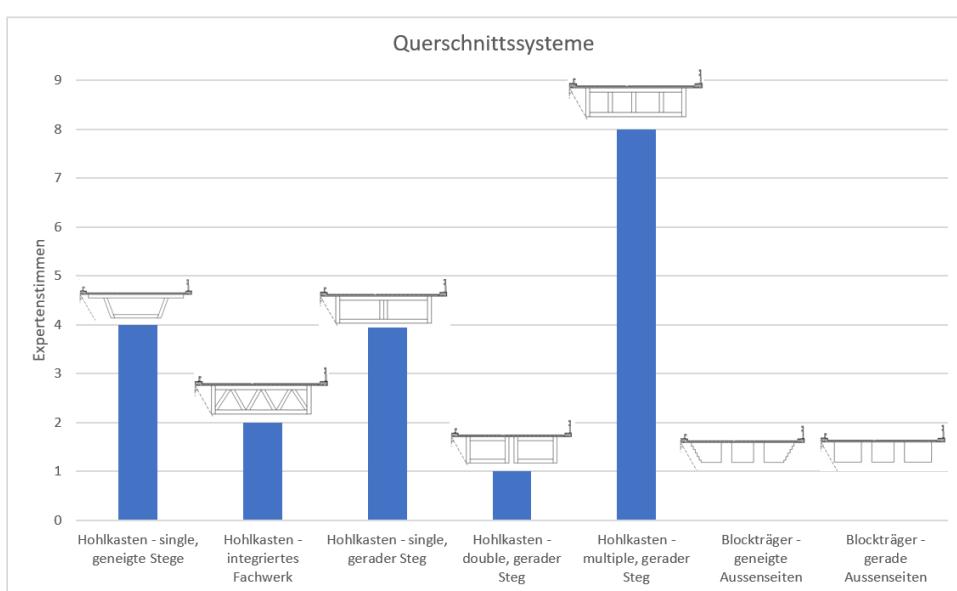


Abb. 11: Ergebnis der Evaluierung zu den Brückenquerschnittsvarianten

Die Vorteile des geraden Brückenquerschnitts als Rechteck mit Zwischenstegen sind:

- interne sowie externe Vorspannung möglich, vereinfachte Leitungsführung
- gute Unterstützung der Fahrbahnplatte durch die Zwischenstege
- Begehbarkeit des Brückenquerschnitts für den Unterhalt
- Wirtschaftlich durch den geraden Querschnitt in der Herstellung und Montage
- positive statische Ausnutzung
- Elementierbarkeit
- Ausführbarkeit des konstruktiven Holzschutzes des Brückentragwerkes.

Im Entwurf des Brückenquerschnittes sollten getrennte Hohlkastenquerschnitte keine Anwendung finden, da diese zu einer Bewegung in der Fahrbahnplatte führen können. Die diskutierten Evaluierungspunkte des zweiten Workshops sind in einem Mindmap zusammengefasst, vgl. Abb. 12.

Die Forschungsarbeit an der BFH wird nun zum Brückenquerschnitt mit folgenden Themenpunkten fortgesetzt:

- Festlegen der Geometrie, Spannweiten, Querschnitt für eine rechnerische Längs- und Queranalyse
- Materialisierung: Welche Materialien eignen sich an Auflager, welche in Feldmitte, in den Stegen, im Ober- und Untergurt, der Fahrbahnplatte? Berücksichtigung von Materialkombinationen von BSH und BSP/CLT
- Prüfung, ob eine stossfreie Konstruktion möglich ist? Wie kann die Ausbildung eines biegesteifen Stosses erfolgen?
- Optimierung der Ausbildung der Fahrbahnplatte; Prüfung von u. a. Mehrschichtplatte, Massivholzplatte oder Furnierschichtholz
- Führung der Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise mit einem Auslastungsgrad von < 85 %; Berücksichtigung von Anpralllasten
- Prüfung der Machbarkeit der modularen Bauweise – möglichst hoher Grad der Vorfertigung erreichen; Berücksichtigung des Austausches von Elementen, z. B. Elementbreite 3.5 m pro Spur.

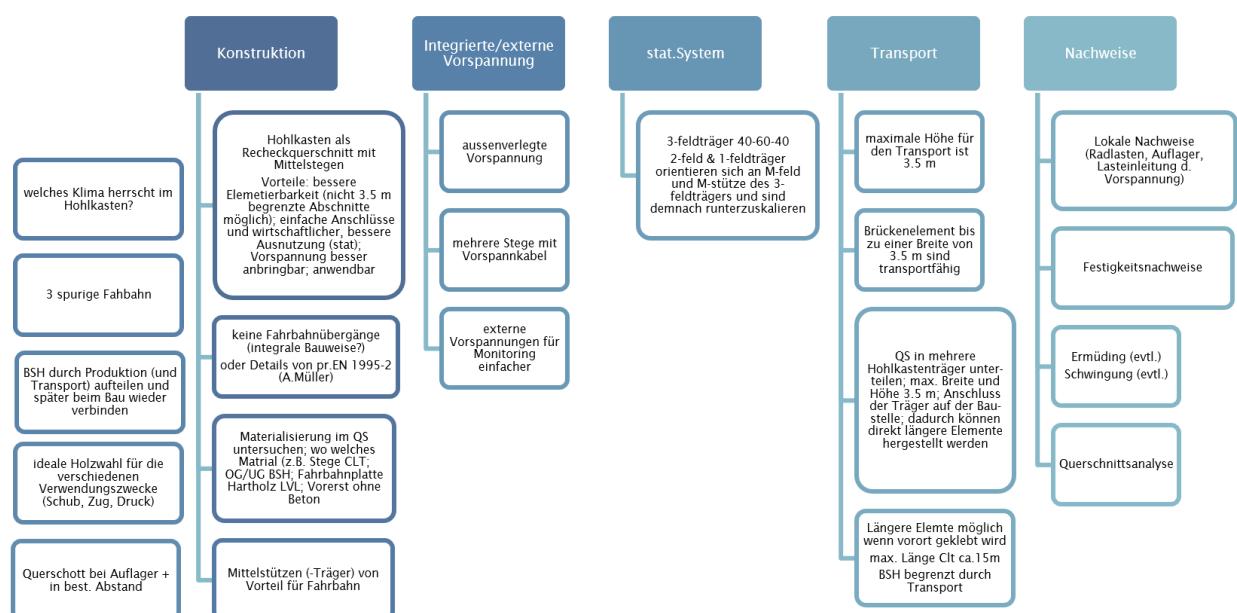


Abb. 12: Mindmap zu den Diskussionspunkten des zweiten Workshops

Das Variantenstudium zum Brückenquerschnitt wird anhand von Spannungs- und Verformungsanalysen fortgesetzt. Die ebenfalls wichtigen Nachweise zu Erdbeben, Ermüdung und das Schwingungs- wie Brandverhalten werden innerhalb dieser Machbarkeitsstudie noch ausgeschlossen. Die erreichten Ergebnisse werden erneut den begleitenden Experten zur vertiefenden Evaluierung des Querschnittes vorgestellt.

Zusätzlicher zu diesen Arbeiten konnte eine studentische Arbeit lanciert werden.

- Semesterarbeit im Studiengang «Master of Wood Technology». Hier werden 2-3 Querschnittsvarianten innerhalb einer numerischen Simulation auf Spannungssingularitäten-/konzentrationen geprüft. Es werden die Aspekte zur Anpassung von geometrischen Abständen, Winkeln, Höhen auf das Trag-/Verformungsverhalten betrachtet.

3.6 Modell zu den Lastannahmen und Schnittgrößen

3.6.1 Querschnittsdefinition

Die Lastannahmen zur Ermittlung der Schnittgrößen wurden gemäss SIA 260:2013 bzw. SIA 261:2020 definiert. Vertiefende Angaben zu den einzelnen aufgeführten Lasten sind im Anhang A aufgeführt.

In Abb. 13 ist der, für die statischen Nachweise, definierte Regelquerschnitt zu sehen.

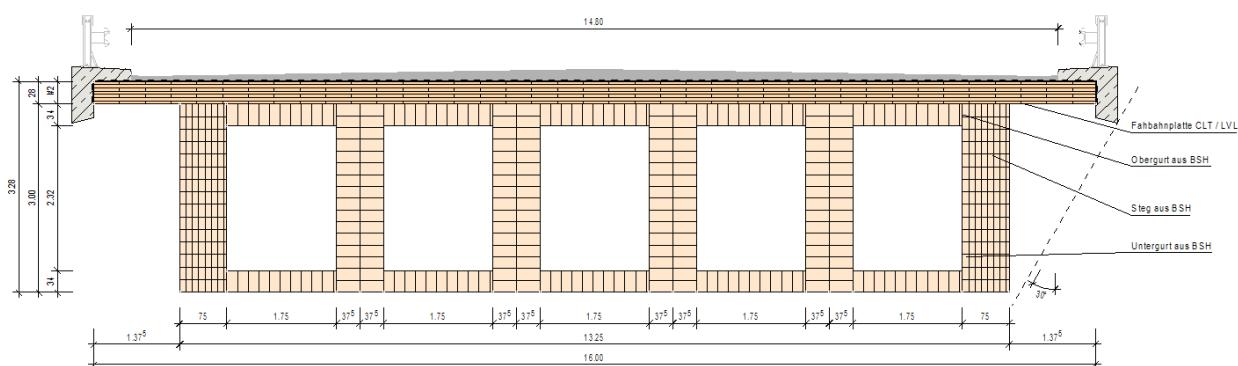


Abb. 13: Definierter Regelquerschnitt für die Machbarkeitsstudie von Schwerlastbrücken in Holz

3.6.2 Ständige Einwirkungen

Das Eigengewicht der Hohlkastenstruktur wurde mit 6,2 kN/m² angenommen (siehe Anhang A).

Für die Auflast wurden zwei Varianten mit Gussasphalt bzw. UHFB (Ultrahochleistungsfaserverbundbaustoff), anhand eines repräsentativen Schichtenaufbaus für Holzbrücken nach SIA 261:2020, berechnet (vgl. Abb. 14). Der schwerere Aufbau resp. der Aufbau mit UHFB ergibt eine Auflast von 7,1 kN/m² (vgl. Anhang A) und wurde bei den Nachweisen angenommen.

Mastic Gussasphalt
Deckschicht >35 mm
Schutzschicht >35 mm
Dichtungsschicht (Bitumenbahnen)

UHFB 150 mm
Dichtungsschicht (Bitumenbahnen)

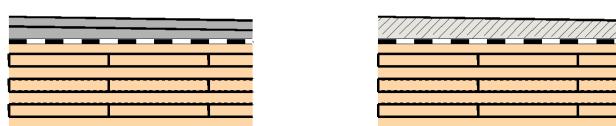


Abb. 14: Repräsentativer Schichtenaufbau für Holzbrücken mit Aufbau v.l.n.r. aus Gussasphalt bzw. UHFB

3.6.3 Verkehrslasten

Die Verkehrslasten wurden nach SIA 261:2020 + NA (NPD 4.3.2(3)) bestimmt. In Abb. 15 ist das Lastmodell 1 (LM1) zu sehen. Die Fahrbahn wurde in 4 «rechnerischen Fahrstreifen» à 3 m breit aufgeteilt. Eine Restfläche wurde dazu berücksichtigt (2.72m breit). Die fiktive Fahrbahnstreife 1 wurde direkt an die Kappe gelegt, was dem ungünstigsten Lastfall entspricht.

Die Lasteinwirkungen bzw. die Lastanordnung des Lastmodells 1 sind in Tab. 2 bzw. Abb. 16 dargestellt. Flächenlast und Achslast sind zusammen anzusetzen und symbolisieren eine Stausituation. Die Einwirkungen auf Tragwerke für Straßen sind von der Verkehrszusammensetzung, von der Verkehrs dichte und von der Staufrequenz abhängig. Diese Einflüsse können bei Lastmodell 1 durch die Bei werte α_{qi} , α_{Qi} , α_{qr} erfasst werden. Im Normalfall sind diese Bei werte mit dem Wert 0.9 in Rechnung zu stellen.

Die Achslastgruppen wurden in verschiedenen ungünstigen Laststellungen positioniert (u.a. direkt am Brücken anfang, direkt hinter dem Auflager, exzentrisch zur Bauwerksmitte, an Fahrbahnübergängen).

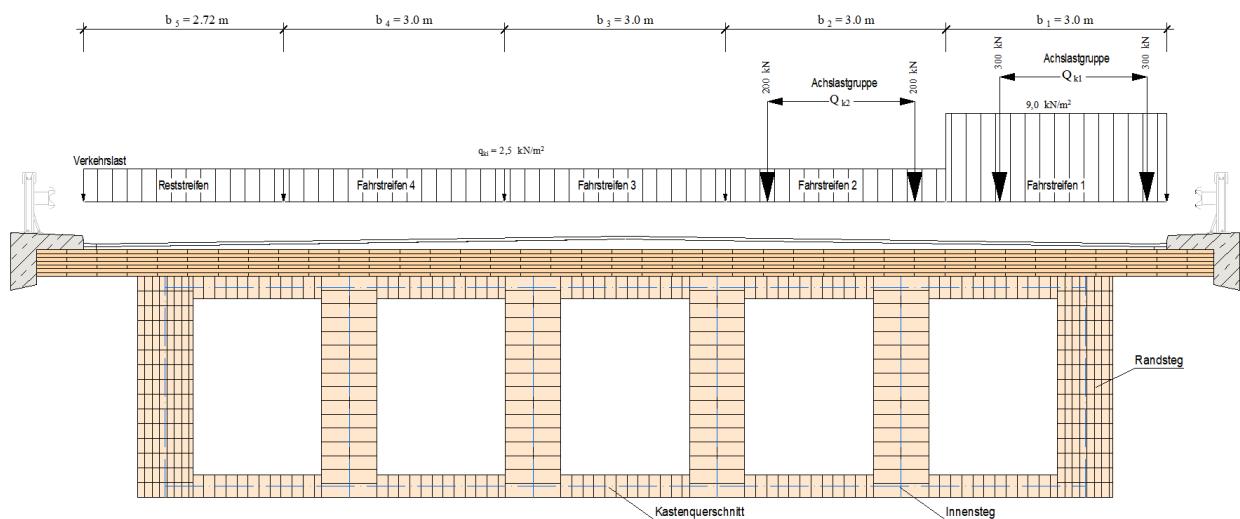


Abb. 15: Verteilung der Verkehrslasten LM1 gem. SIA 261:2020

Tab. 2: Charakteristische Werte der Lasten Q_{ki} , und q_{ki} vom Lastmodell 1 (SIA 261:2020, Tab. 1)

Laststellung		Q_{ki} in kN	q_{ki} in kN/m ²
Fahrstreifen 1	($i = 1$)	300	9,0
Fahrstreifen 2	($i = 2$)	200	2,5
Fahrstreifen 3	($i = 3$)	—	2,5
Übrige Fahrstreifen	($i > 3$)	—	2,5
Restfläche	($i = r$)	—	2,5

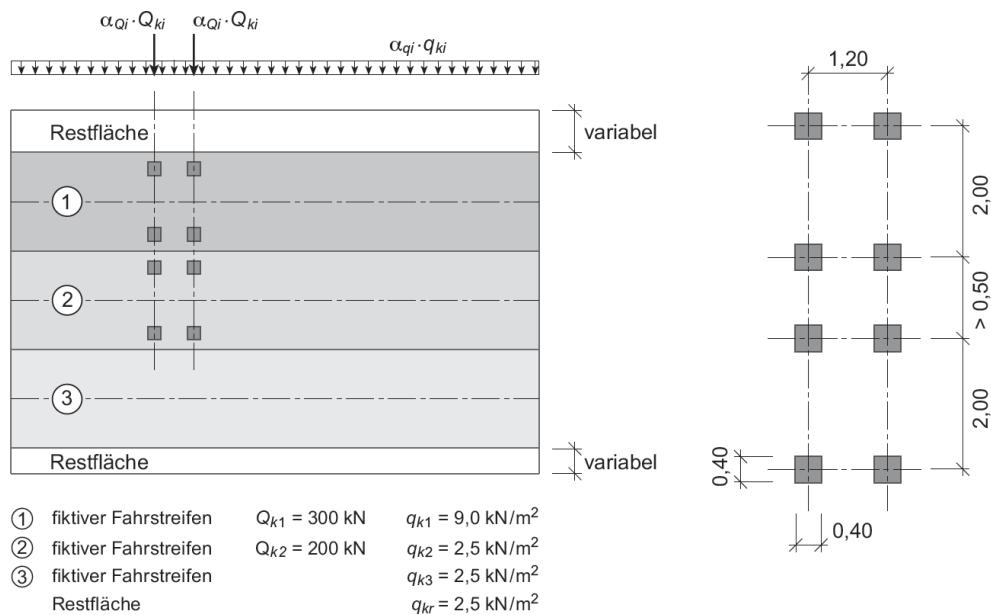


Abb. 16: Mögliche Lastanordnung des Lastmodells 1 (SIA 261:2020, Fig.11)

3.6.4 Brems- und Beschleunigungs Kräfte

Als horizontale Kräfte sind folgende Brems- und Beschleunigungs Kräfte nach SIA 261:2020 anzusetzen:

$$QA_k = QB_k = 1.2 \cdot \alpha_{Q1} \cdot Q_{k1} + 0.1 \cdot \alpha_{q1} \cdot q_{k1} \cdot b_1 \cdot l \leq 900 \text{ kN} \quad \text{SIA 261:20, (20)}$$

Dabei b_1 und l bezeichnen die Breite des fiktiven Fahrstreifens und die Länge des Tragwerks bzw. die Distanz zwischen den Dilatationsfugen des untersuchten Tragwerksabschnitts. Die Brems- und Beschleunigungs Kräfte sind ausschliesslich entlang der Mittellinie des fiktiven Fahrstreifens 1 an der Oberkante des Fahrbahnbelags anzusetzen und wurden daher auf eine Linienlast umgerechnet und demnach durch l geteilt. Zentrifugalkräfte dürfen vernachlässigt werden, da mit einer vorgespannten Bauweise geplant wird. Die Lasten infolge militärischen Strassenverkehrs sind durch Lastmodell 1 abgedeckt (SIA 261/1:2020, 14.1.6).

3.6.5 Windlasten

Da es sich im Vergleich zu anderen Bauweisen um eine leichte Konstruktion handelt spielen durch Wind induzierte Kräfte eine wichtige Rolle. Diese können gem. SIA 261:2020, Kap. 6 + Anhang C bestimmt werden. In Abb. 17 ist zu erkennen, dass die Windkräfte in y Richtung einmal mit «Verkehrsverband» (simulierte Angriffsfläche bei Stausituation) und einmal ohne anzusetzen sind. Wenn sich die Resultierende der Windlast nicht in der Trägerachse befindet, entsteht ein Versatzmoment was zu einer Torsionsbeanspruchung führt.

Die Windkräfte in y Richtung betragen (für die detaillierte Berechnung siehe Anhang A):

$$q_{wy} = 1.07 \text{ kN/m}^2$$

SIA 261:20

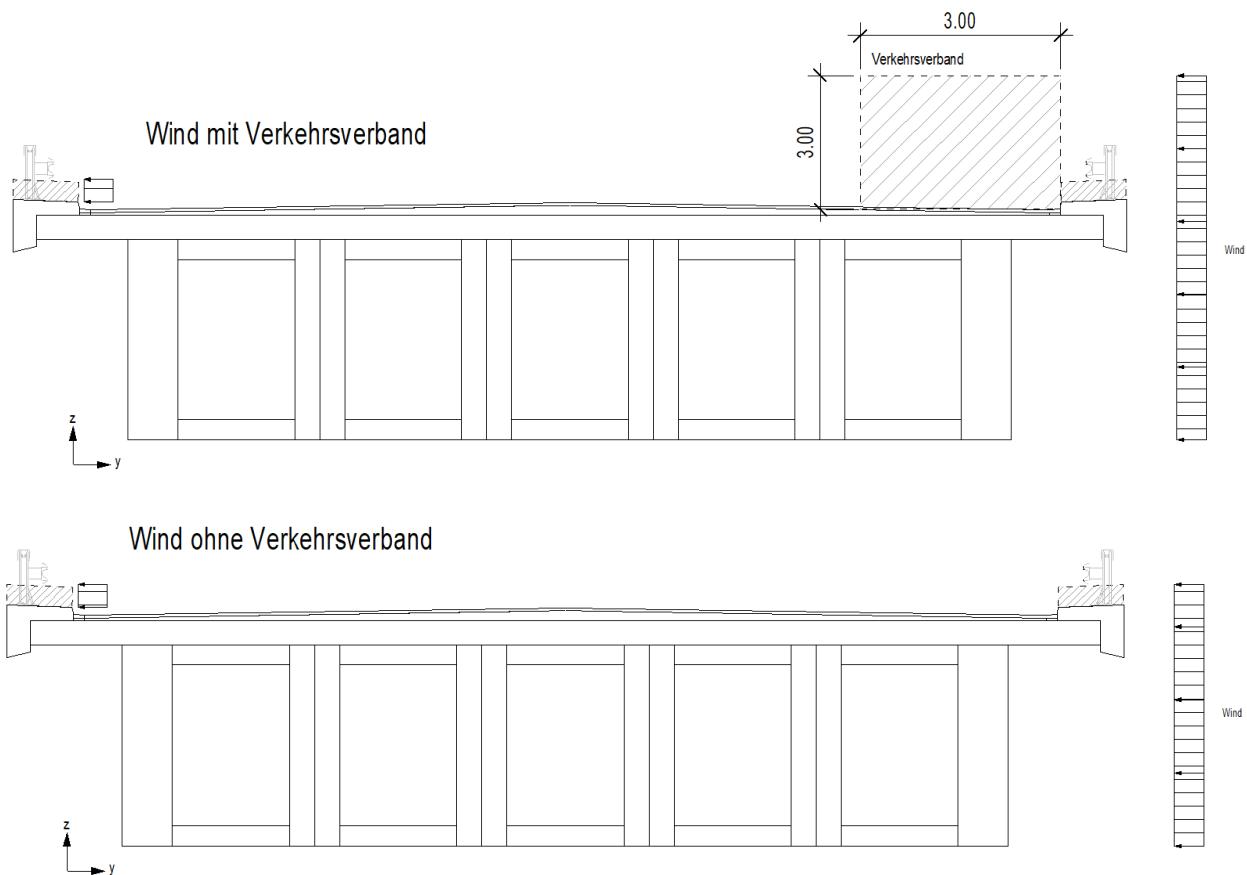


Abb. 17: Windkräfte in y Richtung v.o.n.u mit bzw. ohne Verkehrsverband

3.6.6 Erdbebenlasten

Lasten infolge eines Erbebens wurden nicht untersucht.

3.6.7 Lasten aus Hochwasserereignis

Es ist auf den einzuhaltenden Freibord zu achten.

3.6.8 Schneelast

Da es sich nicht um eine gedeckte Brücke handelt, dürfen Schneelasten vernachlässigt werden (SIA 260, Tab.6):

3.6.9 Lastkombinationen und Schnittgrößen

Es wurde sich auf die in Abb. 18 gezeigten Laststellungen für das globale System beschränkt. Die Achslastgruppen sind möglichst exzentrisch zur quer Fahrbahnachse positioniert (vgl. Abb. 15), was ein erhöhtes Torsionsmoment zur Folge hat. Die in Abb. 18 gezeigten Laststellungen führen v.o.n.u. zu dem max. Feldmoment, der maximalen Querkraft bzw. der max. Auflagerpressung des globalen Systems.

Die auftretenden Schnittgrößen infolge der eben beschriebenen Lastgrößen wurden mithilfe des Stabwerkprogramms DLUBAL RFREM®5 bestimmt. Die maximal auftretenden Schnittgrößen je statisches System sind im Anhang A zu enthalten. In Abb. 19 ist beispielsweise die Ergebnissumhüllende für die Laststellung, die zum max. Feldmoment führt, dargestellt.

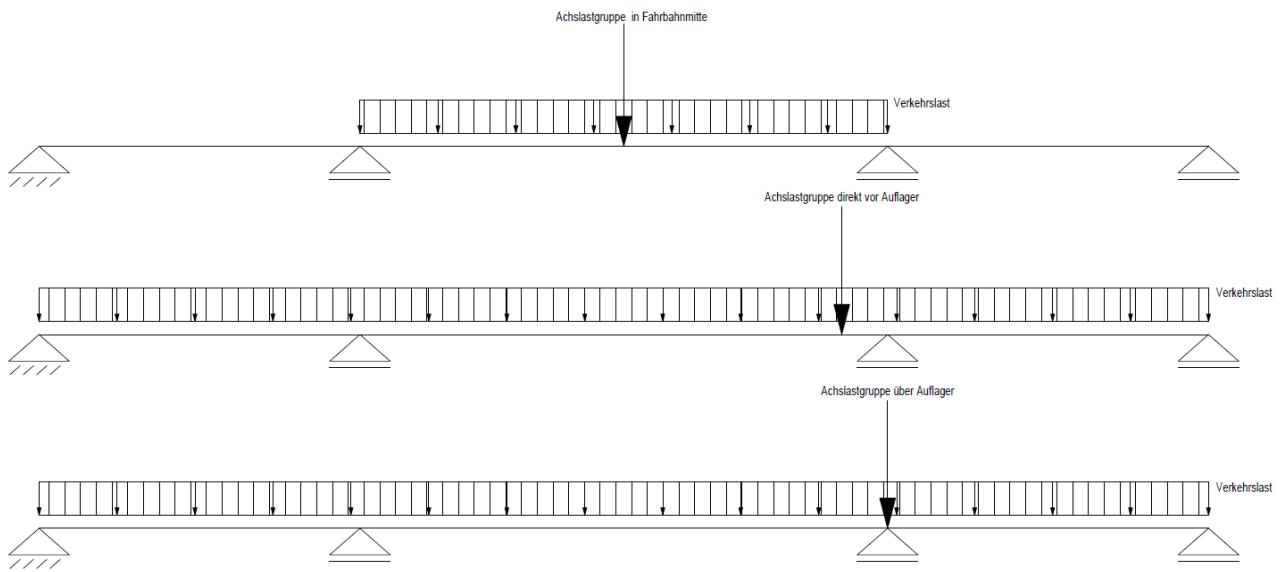


Abb. 18: Seitensicht der Laststellungen der vertikalen Verkehrslasten für v.o.n.u. das max. Feldmoment, die max. Querkraft bzw. die max. Auflagerpressung

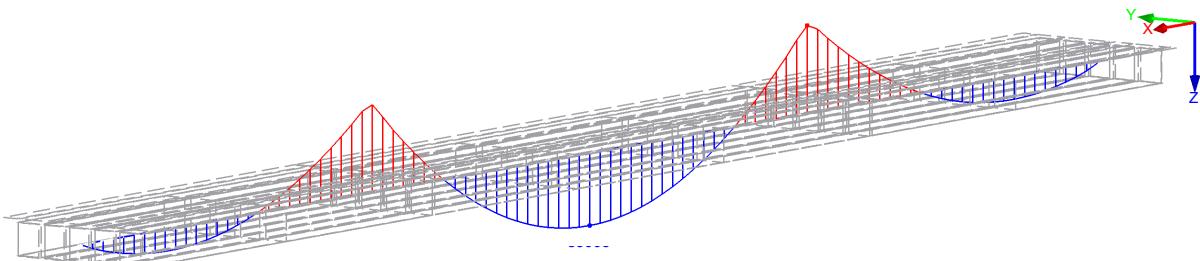


Abb. 19: Ergebnisumhüllenden für das Moment des globalen Systems

3.7 Nachweis der Tragfähigkeit des Querschnitts – Niveau Vorbemessung

Den genauen Bemessungen vorausgehend wurden mit Hilfe von Excel (MS) Vorbemessungstabellen erstellt, um verschiedene Variablen untersuchen zu können. Als zweiter Schritt wurden genauere Nachweise geführt.

3.7.1 Materialkenngroßen

Für den Kastenquerschnitt wurde Brettschichtholz GL28h mit folgenden Festigkeitswerten gewählt:

$$f_{m,d} = \eta_w \cdot \eta_t \cdot 28 \text{ MPa} = 0.8 \cdot 1,0 \cdot 28 \text{ MPa} = 22.40 \text{ MPa} \quad \text{SIA 265:21, Tab.9}$$

$$f_{v,d} = \eta_w \cdot \eta_t \cdot 1.8 \text{ MPa} = 0.8 \cdot 1,0 \cdot 1.8 \text{ MPa} = 1.44 \text{ MPa} \quad \text{SIA 265:21, Tab.9}$$

$$f_{t,d} = \eta_w \cdot \eta_t \cdot 14.9 \text{ MPa} = 0.8 \cdot 1,0 \cdot 14.9 \text{ MPa} = 11.92 \text{ MPa} \quad \text{SIA 265:21, Tab.9}$$

$$f_{c,d} = \eta_w \cdot \eta_t \cdot 18.7 \text{ MPa} = 0.8 \cdot 1,0 \cdot 18.7 \text{ MPa} = 14.96 \text{ MPa} \quad \text{SIA 265:21, Tab.9}$$

3.7.2 Berechnungsansatz und Materialisierung

Der Vorbemessungsansatz wurde mit der Theorie der «Zusammengesetzte Biegestäbe aus Holz mit nachgiebigem Verbund» (SIA 265, 5.3) durchgeführt. Da Verbindungen mit mechanischen

Verbindungsmittern im Vergleich zu einer geklebten Verbindung eine erhebliche Nachgiebigkeit aufweisen, kann dieser Effekt mithilfe der obengenannten Theorie bei der Berechnung von Schnittgrößen und Verformungen berücksichtigt werden. Die Schnittgrößen werden jeweils im Anfangs- und im Endzustand berechnet, um den Nachweis der Tragfähigkeit zu führen.

Die Vorbemessung wurde auf die einzelnen Kastenträger des Brückenquerschnitts fokussiert (vgl. Abb. 20). Die Kastenträger aus BSH sind alle miteinander verklebt angenommen und somit als starr verbunden anzusehen. Zwischen der Fahrbahnplatte aus CLT und den Kastenträgern kann konstruktiv keine Verklebung gewährleistet werden. Die Fahrbahnplatte dient hauptsächlich zur Querverteilung der Vertikallasten und besitzt somit eine geringe Steifigkeit längs zur Brücke. Aus diesem Grund spielt sie eine untergeordnete Rolle bei der Tragwirkung und wurde vernachlässigt.

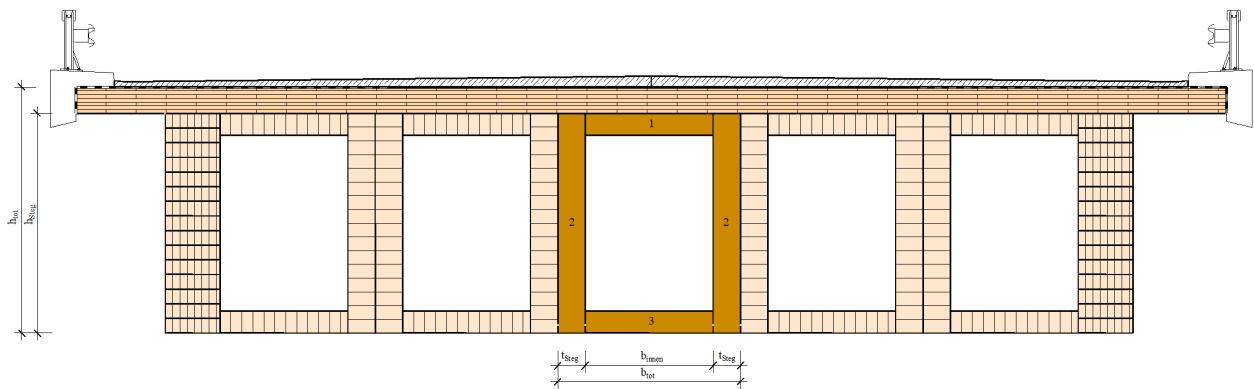


Abb. 20: Aufteilung des Brückenquerschnitts in Kastenträgern

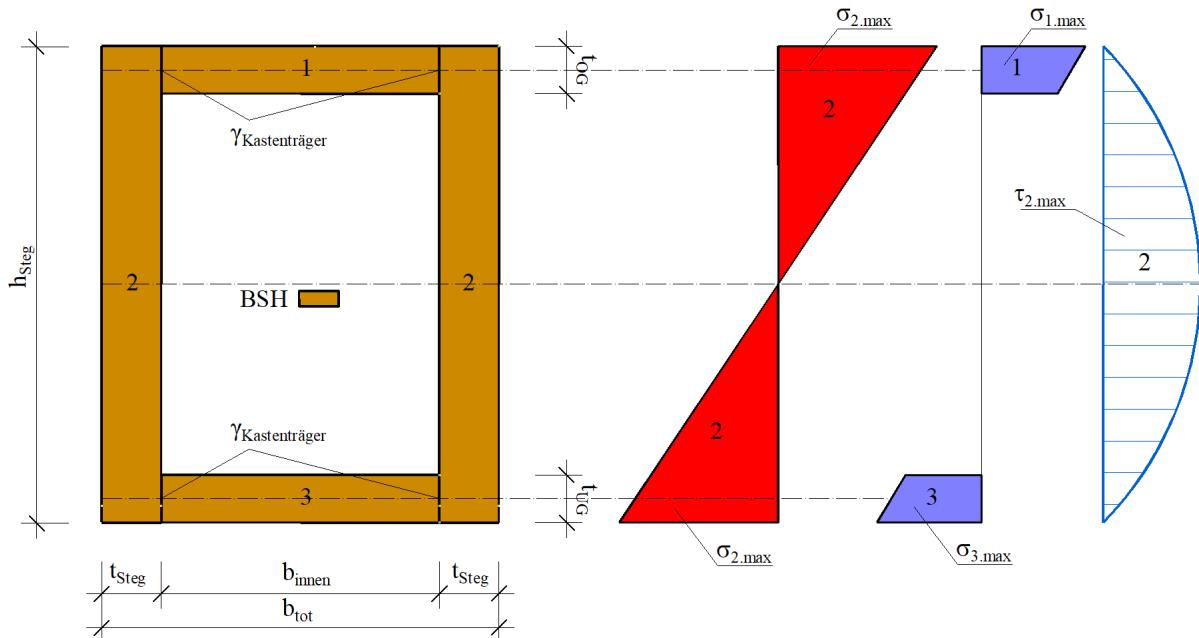


Abb. 21: Kastenquerschnitt mit Verteilung der Biege- und Schubspannungen im Steg (2), Ober- bzw. Untergurt (1,3)

Die folgenden Vorbemessungsdiagramme dienen als grobe Abschätzung zur Dimensionierung der Querschnitte. Als Schnittgrößen dienen das maximale Feldmoment sowie die maximale Querkraft.

In Abb. 22 sind die Biegespannungen im Schwerpunkt des Untergurts in Abhängigkeit zur Dicke des Obergurts / Untergurts (t_{OG} / t_{UG}) und der Steghöhe (h_{Steg}) für eine Stegdicke (t_{Steg}) von 375mm

dargestellt. Aus dem Diagramm lässt sich ablesen, dass bei einer Dicke des Untergurts / Obergurts (t_{OG} / t_{UG}) von 300 mm (orange Kurve) eine Steghöhe (h_{Steg}) von ca. 3000 mm erforderlich ist.

In Abb. 23 sind die auftretende Schubspannungen im Steg in Abhängigkeit zur Stegdicke (t_{Steg}) und Steghöhe (h_{Steg}) zu sehen. Darin lässt sich erkennen das bei einer Stegdicke (t_{Steg}) von 600 mm (2x300 mm) eine Steghöhe (h_{Steg}) von 3600 mm (hellblaue Kurve) erforderlich ist.

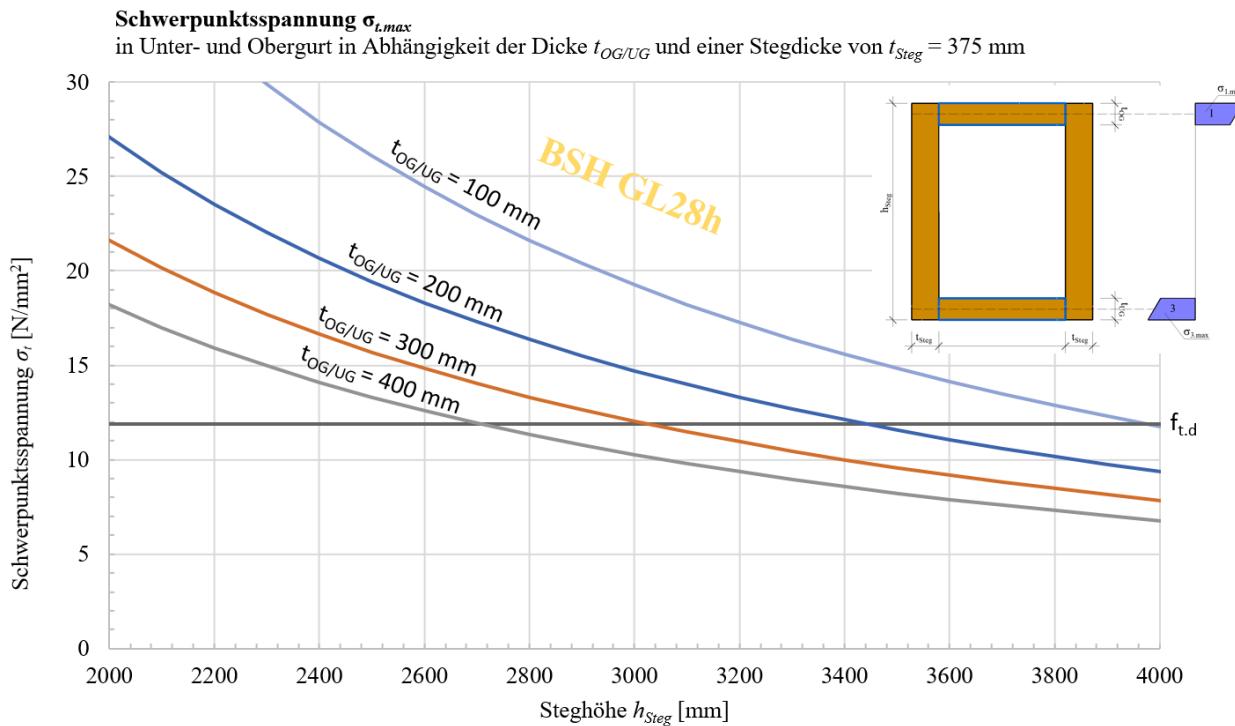


Abb. 22: Vorbemessungsdiagramm für die Schwerpunkt-Biegespannung im Untergurt des Kastenträgers in Abhängigkeit zur $t_{OG/UG}$ und h_{Steg} ($t_{Steg}=375$ mm, GL28h)

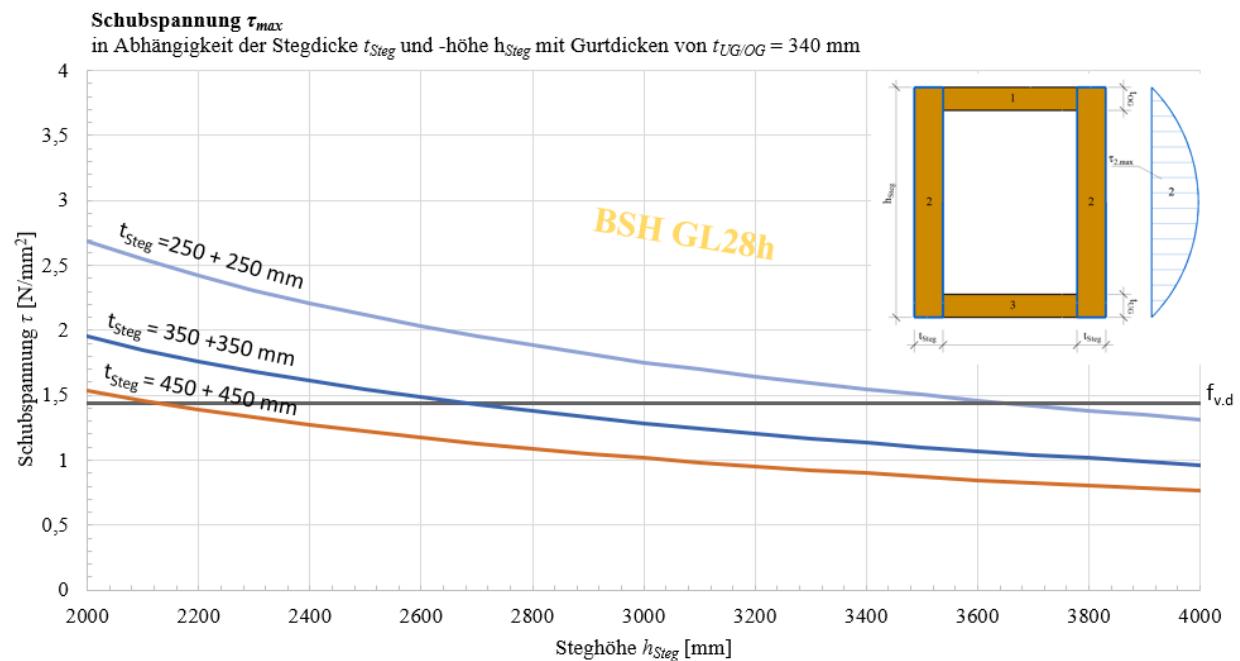


Abb. 23: Vorbemessungsdiagramm Schubspannung im Steg des Kastenträgers in Abhängigkeit zur t_{Steg} und h_{Steg} ($t_{OG/UG}=340$ mm, GL28h)

3.7.3 Nachweise: Biege- und Schubnachweis

Bei der Bemessung spielen verschiedene Spannungen eine entscheidende Rolle. Jede Art von Belastung führt zu spezifischen Spannungen in unterschiedlichen Richtungen. In diesem Kapitel werfen wir einen Blick auf die verschiedenen Nachweise, die bei Spannungsinteraktionen auftreten.

Die Wechselwirkung dieser Spannungen ist entscheidend für das Verständnis der Gesamtbelastung und der daraus resultierenden Beanspruchung eines Querschnitts. In Abb. 24 sind beispielsweise die Spannungen, die im Steg des Kastenquerschnitts und aufgrund der verschiedenen Belastungen auftreten können, qualitativ dargestellt.

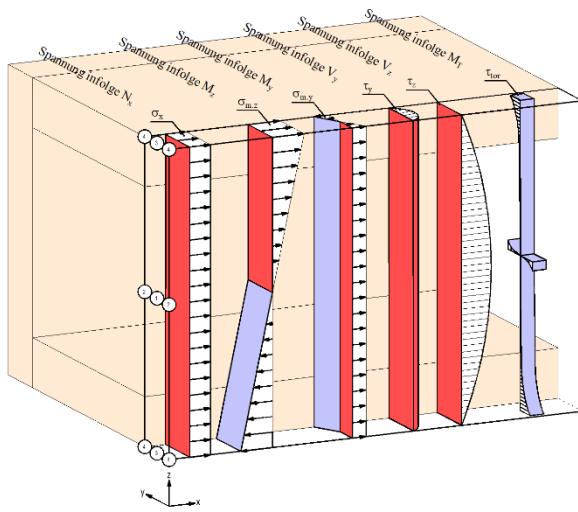


Abb. 24: Qualitative Darstellung der auftretenden Spannungen im Steg des Kastenquerschnitts

In Abb. 25 ist der Verlauf der Biegespannungen aufgrund des max. Feldmoments dargestellt. Es ist zu erkennen, dass, aufgrund der exzentrischen Positionierung der Achslastgruppen, die max. Biegespannungen beim Randkastenträger auftreten. Die kombinierten Spannungsnachweise sind an den Stellen der max. Biegespannungen dargestellt.

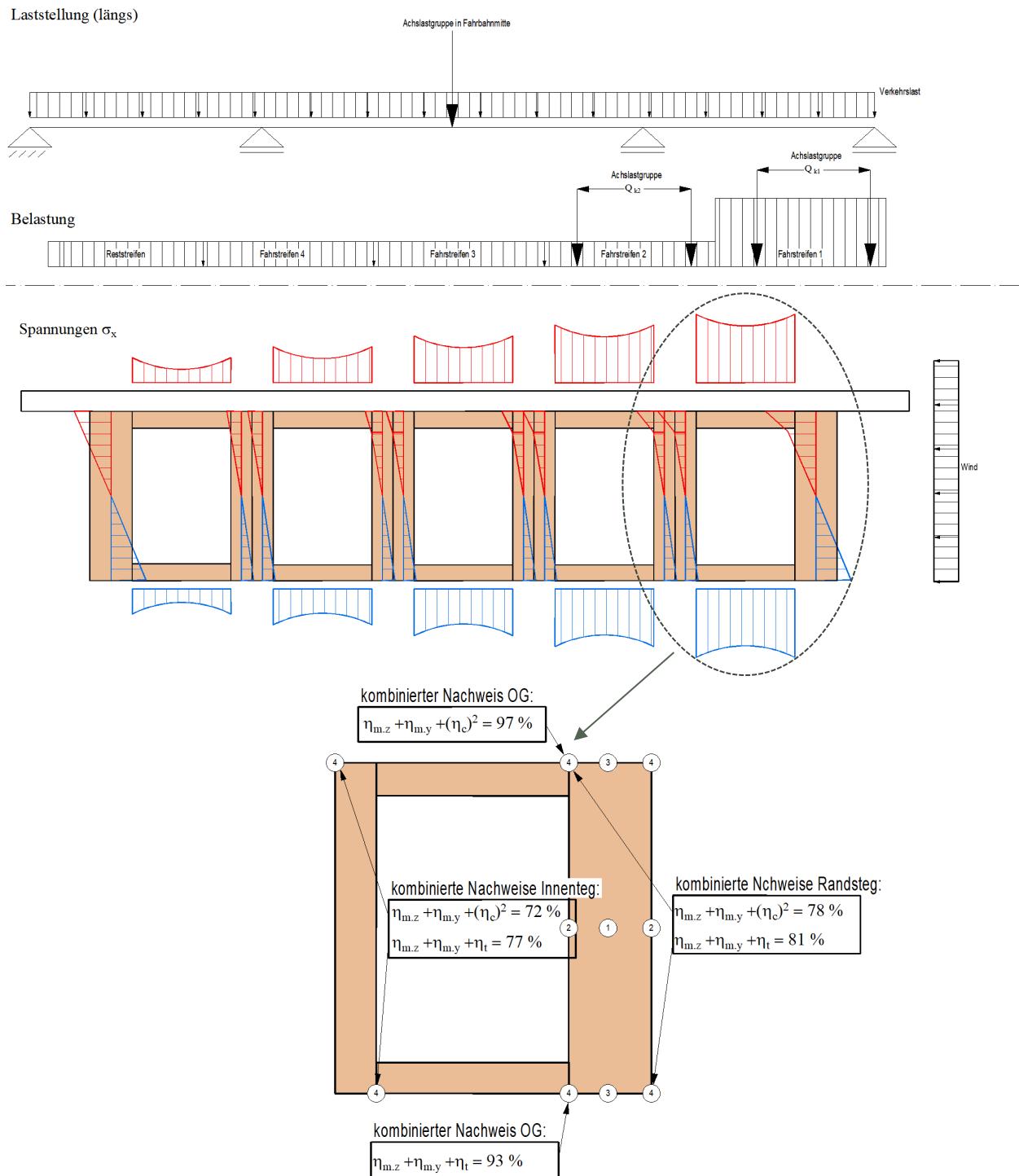


Abb. 25: Normalspannungsverlauf und Spannungsnachweise an den Stellen der max. Biegespannungen

In Abb. 26 ist der Verlauf der Schubspannungen beim Steg des Kastenquerschnitts aufgrund der max. Querkraft dargestellt. Es ist zu erkennen, dass, aufgrund der exzentrischen Positionierung der Achslastgruppen, die max. Schubspannungen beim Randkastenträger auftreten. Die kombinierten Spannungsnachweise sind an den Stellen der max. Schubspannungen (Mitte vom Steg) dargestellt.

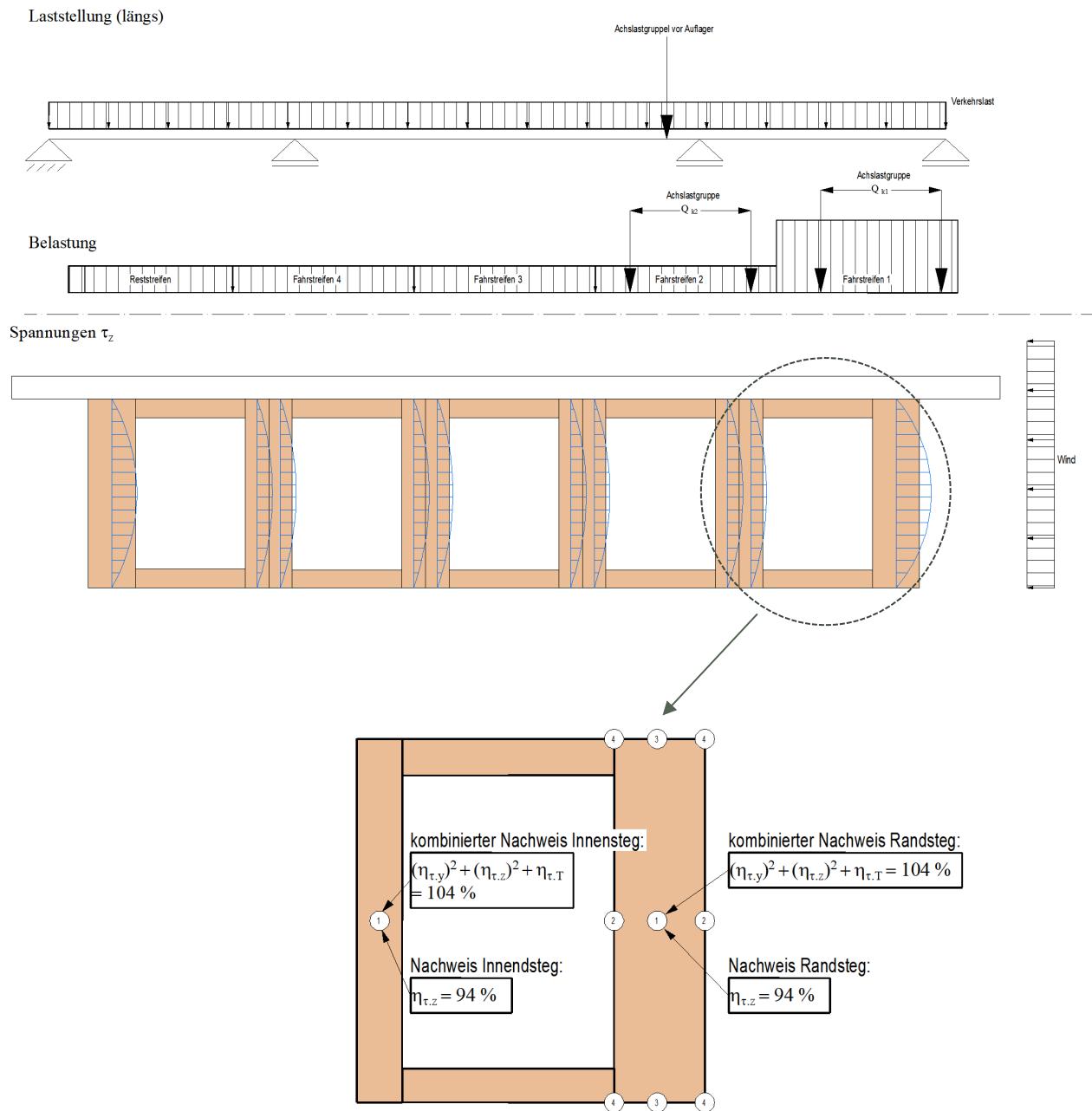


Abb. 26: Schubspannungsverlauf und Spannungsnachweise in den Kastenträgern infolge der maximalen Querkraft

Um bspw. der hohen Schubspannung nahe dem Auflager vorzubeugen hat Brettschichtholz den grossen Vorteil liegend blockverleimt zu werden. Somit besteht eine hohe Flexibilität des Stegquerschnitts (vgl. Abb. 27).

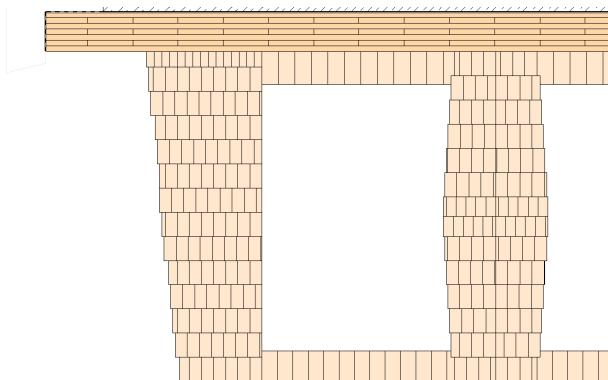


Abb. 27: Hohe Anpassungsfähigkeit der Stege durch liegende blockverklebte BSH-Träger

3.7.4 Auflagerpressung

In Abb. 28 ist die max. Auflagerspannung aufgrund der massgebenden Laststellung über dem Auflager dargestellt. Der Nachweis führt zur einen Auflagerlänge von mindestens $L_{\text{erf}} = 1400$ mm.

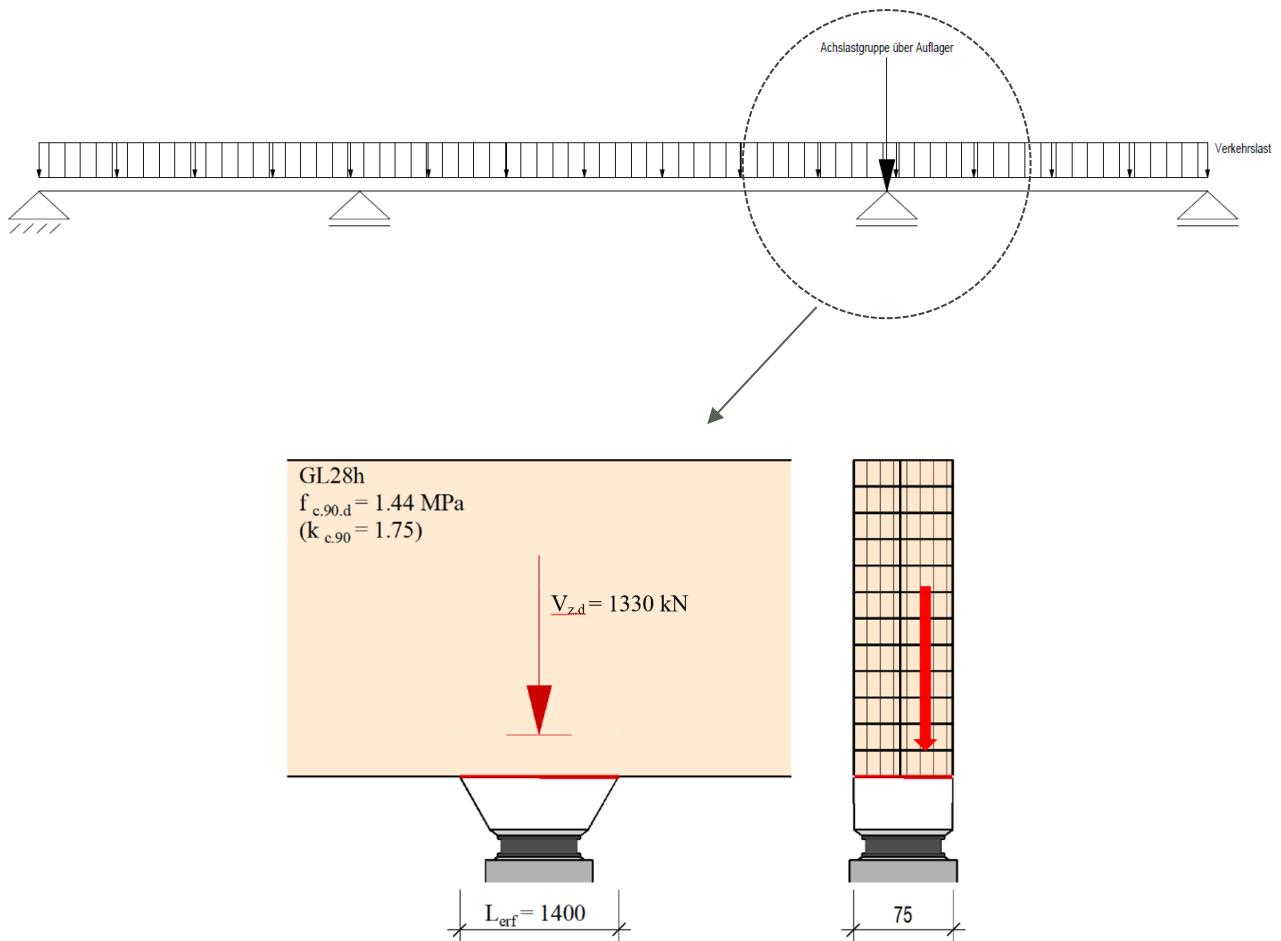


Abb. 28: Max. Auflagerpressung und Tragwiderstandsnachweis infolge der massgebenden Laststellung

3.8 Gebrauchstauglichkeit

Nach SIA 260 Tab.7 ist der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit von Strassenbrücken auf eine Durchbiegung von $w \leq l/500$ festgelegt. Es ist ausschliesslich der Durchbiegung infolge des häufigen Werts des Lastmodells 1 zu nehmen (SIA 260, Tab.7). Die Steifigkeitswerte sind mit dem Faktor 0.9 zu reduzieren da die Tragkonstruktion zwar im Außenbereich ist, kann jedoch als geschütztes Tragwerk eingestuft werden:

$$E_{0,d} = \eta_w \cdot E_0 = 0.9 \cdot 12600 \text{ MPa} = 11340 \text{ MPa}$$

Folgende Lastkombination führt zur grössten Durchbiegung in Feldmitte:

$$\text{LK5: } E_d = \psi_{11} \cdot Q_{k1} = 0.75 \cdot Q_{k1} \quad (\text{SIA 260.21})$$

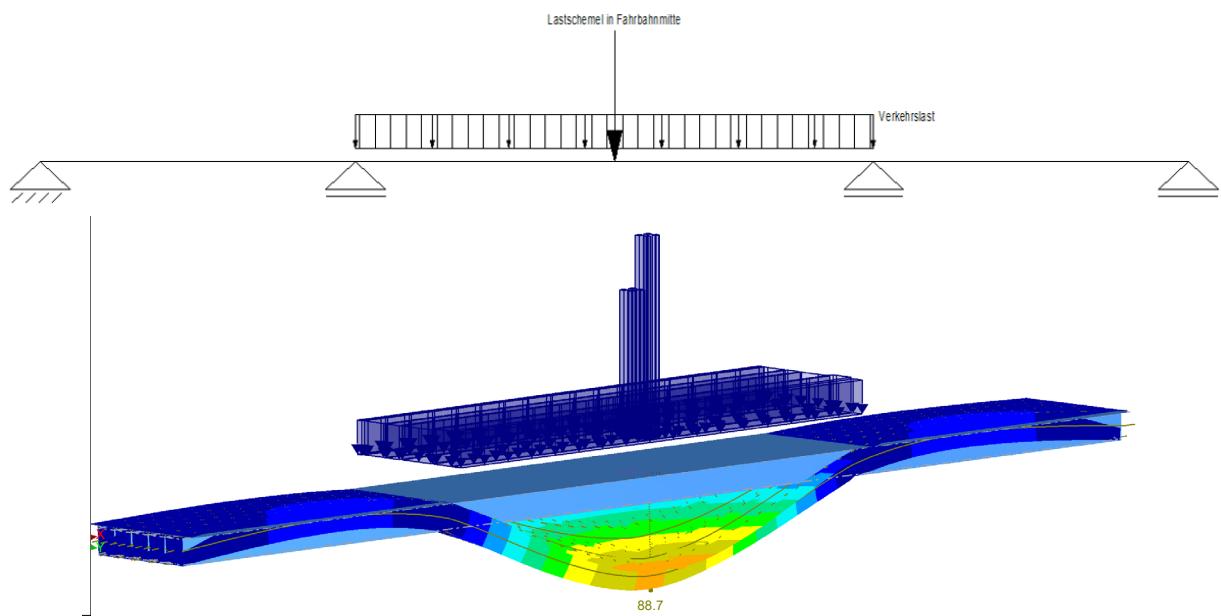


Abb. 29: Max. Durchbiegung infolge der massgebenden Laststellung in der Feldmitte

Anforderung: $L/500 = 60 \text{ m} / 500 = 120 \text{ mm} > 89 \text{ mm} \rightarrow$ Anforderung erfüllt

Folgende Parameter und ihrer Einwirkung auf die Verformung des Tragwerks waren nicht Bestandteil dieser Untersuchung und benötigen weitere Forschung:

- Einfluss anfallender Längsstöße
- Schwingungsnachweis
- Einfluss der Ermüdung und Kriechen
- Einfluss der Vorspannung.

3.9 Vorspanntechnologie

Im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie soll unter anderem untersucht werden, wie die existierende Vorspanntechnologie aus dem Stahlbetonbau auf Schwerlastbrücken aus Holz übertragen werden kann. Vorspannkabel werden dem Verlauf der Biegemomente entsprechend eingebracht. Dabei werden zur Abdeckung der hohen Stützmomente oder negativen Momente in den Randfeldern zusätzliche, kurze Kabel eingebaut. Die Anordnung der Kabel über die Länge und über die Querschnitthöhe, in Abb. 30 wird ein Layout der Vorspannung für eine Betonbrücke als Beispiel dargestellt, sowie die Wahl der Kabelgrößen stellen eine erste Herausforderung dar.

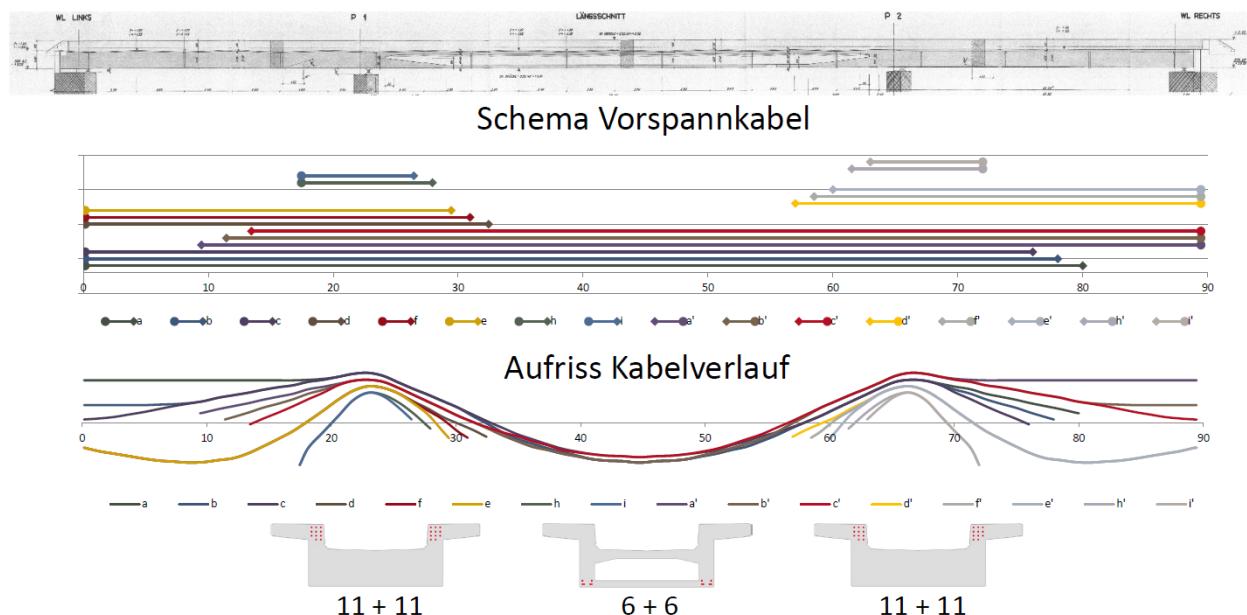


Abb. 30: Beispiel Layout der Vorspannung für eine Betonbrücke (Quelle: Ladon, 2022)

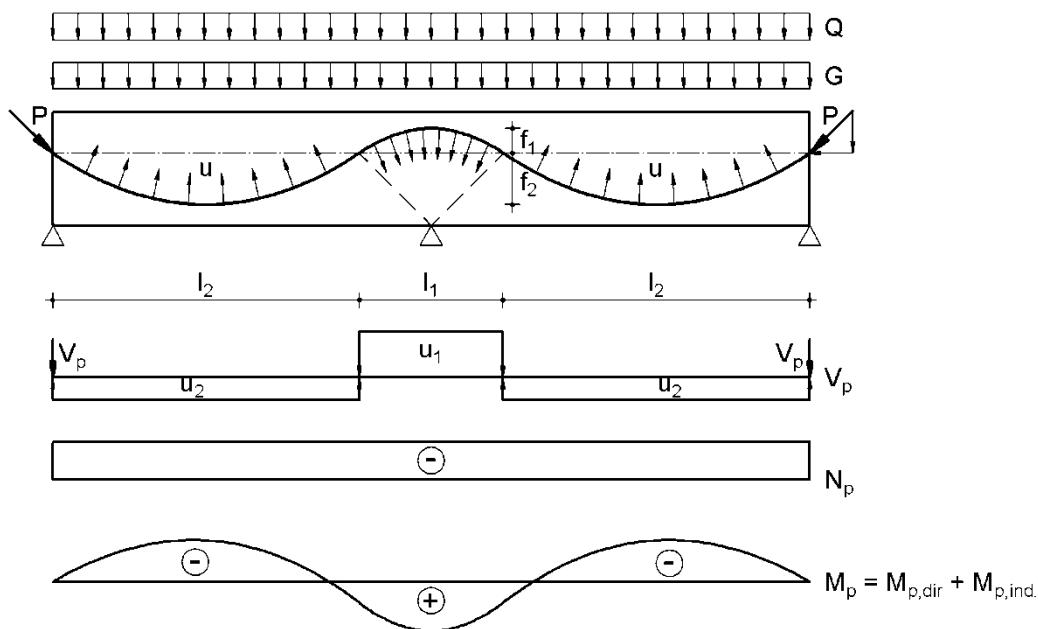


Abb. 31: Wirkung der Umlenkkräfte u auf die Schnittkräfte (Quelle: Dokumentation VSL)

In Abb. 31 ist die Wirkung der Vorspannung als Umlenkkräfte und die daraus resultierenden Schnittkräfte dargestellt. Aufgrund der Unterschiede der Materialien Beton und Holz können die gewonnenen Kenntnisse aus dem Betonbau nicht ohne weiteres 1:1 auf den Holzbau übertragen werden. Das differenzielle Schwind- und Kriechverhalten der zwei Materialien bzw. die Unterschiede in den Steifigkeiten und dem Eigengewicht sind zu beachten. Im Beton - im Gegensatz zu Holzquerschnitten - stellt noch die Rissbildung ein wichtiges Thema dar.

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurde versucht den Einfluss der Vorspannung auf ein Brückentragswerk aus Holz zu untersuchen, um folgende prinzipiellen Fragen zu beantworten:

- Ist eine interne bzw. externe Vorspannung zu bevorzugen?
- Wie gross ist der Vorspanngrad zu wählen?
- Bringt die Vorspannung eine Verbesserung des Tragwiderstands?
- Können Durchbiegungen vermindert werden?
- Was ist bei der Verankerung der Spannglieder zu beachten?

Bezüglich Vorspannung ist abzuschätzen, wie gross die Umlenkkraft (50% / 80% / 100% / 120% der permanenten Lasten) sein könnte. Im Unterschied zum Beton kann der Holzquerschnitt sowohl Zug- als auch Druckspannungen aufnehmen und es ist festzulegen, für welche Parameter eine Vorspannung welchen Nutzen bringt.

Grundsätzliche Fragen zum Spanngliedverlauf und die Umsetzung in Bezug auf Herstellung und Ausführung in Längs- und Querrichtung für Einlitzen- oder Mehrlitzensysteme mit oder ohne Verbundwirkung sind zu beleuchten. Eine besondere Herausforderung stellt die Lasteinleitung bezüglich Druckeinleitung, Spaltwirkung, und Armierung respektive Ertüchtigung dar.

Die obengenannten Punkte wurden im Rahmen des Workshops 3 zusammen mit den Experten betrachtet. Weiterhin verfasste im Frühlingssemester 2022 Xavier Ladon eine Projektarbeit, die sich mit einem Teil dieser Fragenstellungen befasst. Voruntersuchungen zum Thema Verankerungen wurden im Rahmen von Vorstudien durch Xuezha Zhang durchgeführt.

3.9.1 Interne versus externe Vorspannung

Der Einfluss der unterschiedlichen Kabelführung (intern bzw. extern) wurde im Rahmen der Projektarbeit vom Xavier Ladon untersucht. In Abb. 32 ist die Möglichkeit einer externen bzw. internen Vorspannung und deren Position im gewählten Brückenquerschnitt gezeigt.

Es ist ersichtlich, dass die interne Vorspannung (Kabel sind in den Querschnitt eingelegt) deutlich weiter aussen platziert werden kann, was aufgrund der grösseren statischen Höhe einen positiven Einfluss auf die resultierenden Umlenkkräfte hat. Diese bietet auch einen besseren Witterungsschutz (Dauerhaftigkeit) und Schutz gegen Vandalismus. Als Nachteil der internen Vorspannung kann die Querschnittsschwächung aufgeführt werden.

Auf der anderen Seite resultieren aus der externen Vorspannung (die Kabel liegen in den Hohlräumen des Kastens) kleineren statischen Höhe und führt damit zu höheren Spannkräften. Sie ist jedoch kontrollierbar, austauschbar und ergänzbar.

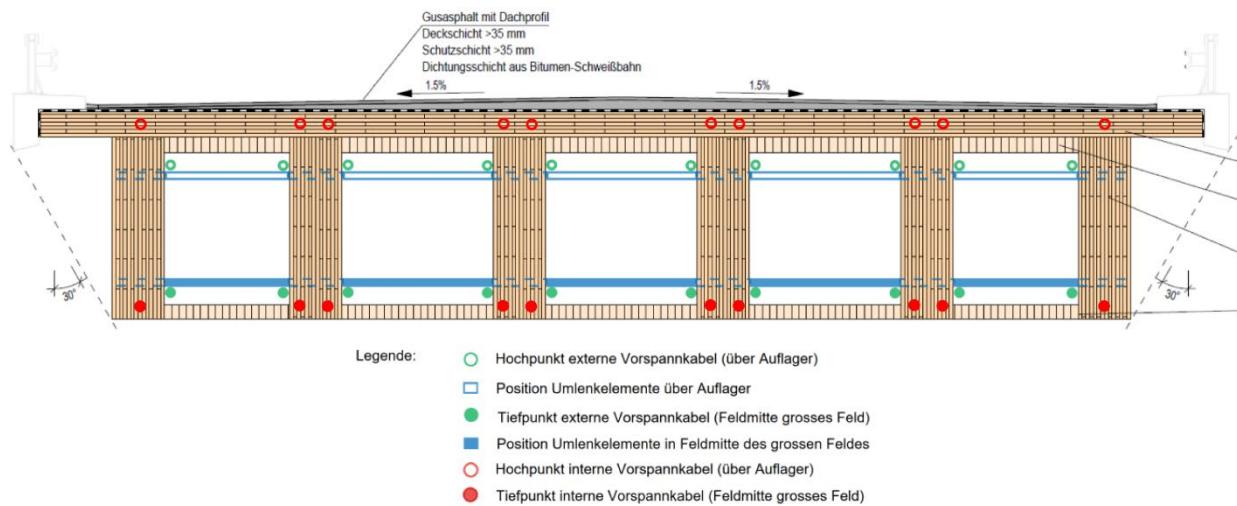


Abb. 32: Querschnitt mit externer bzw. interner Vorspannung (Quelle: X. Ladon, 2022)

Dank neuster CNC-Technologie können freie Kabelverläufe auch im Holzquerschnitt vorgesehen werden. Dies bedingt jedoch Doppelquerschnitte, die anschliessend blockverleimt werden. Auch die Ankerköpfe können dank präziser Fräsmaschinen passgenau eingelegt werden.

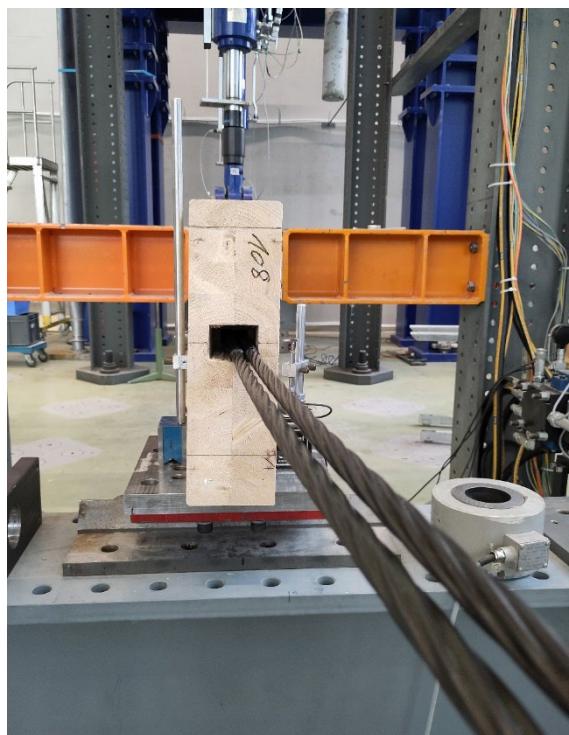
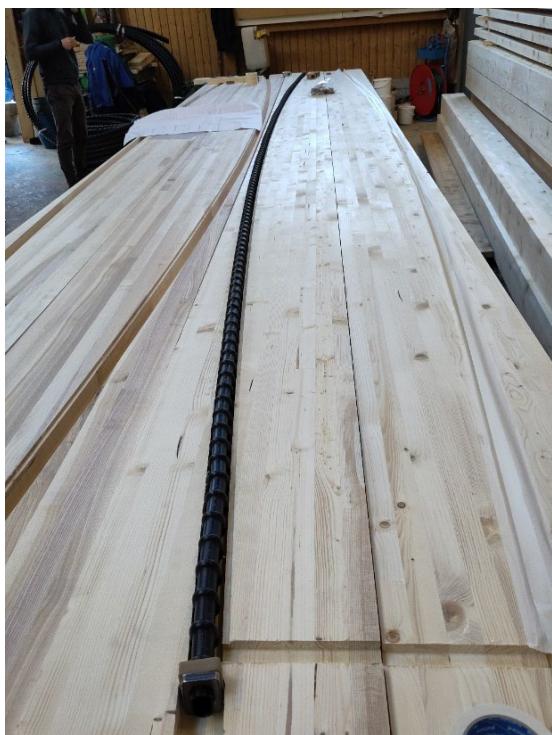


Abb. 33: Fräsen zum Verlegen der Vorspannung (Quelle: Muster, ETHZ 2022)

3.9.2 Vorspanngrad

Wie oben erwähnt stellt der Vorspanngrad eine wichtige Frage dar. Wie viel % der permanenten Lasten oder sogar der Nutzlasten / veränderlichen Lasten sollen umgelenkt werden? Das untersuchte Vorspannkonzept (Ladon 2022) hat das Ausgleichen von 80% der ständigen Einwirkungen durch Umlenkkräfte erzielt. Diese Annahme ist auf Erfahrungen aus dem Betonbau basiert, eine präzise Betrachtung erfordert jedoch weiteren Forschungsbedarf.

Holz plus Vorspannung: eine volle Übernahme der Zugkräfte ist nicht erforderlich wie im Beton, der keine oder eine nur sehr geringe Zugfestigkeit aufweist. Die Konsequenz ist, dass im Holzquerschnitt wesentlich kleinere Kabel erforderlich wären. Dies könnte zudem die Thematik der Verankerung entschärfen.

3.9.3 Einfluss der Vorspannung auf die Tragsicherheit bzw. Gebrauchstauglichkeit

Die Tragsicherheit bzw. die Gebrauchstauglichkeit des Systems ohne bzw. mit Vorspannung wurde vergleichsweise untersucht. Diese Untersuchung wurde für die oben vorgestellte Brückengeometrie (siehe Abb. 13) und für einen Dreifeldträger mit 40m (Randfeld) – 60m (Mittelfeld) – 40m (Randfeld) durchgeführt (siehe Abb. 8, Var.1). Da es sich um eine, im Laufe des Projekts fortlaufend entwickelte Arbeit handelt, sind die Querschnittsgrößen qualitativ und nicht quantitativ zu betrachten.

Die Annahme einer externen Vorspannung bildet in diesem Fall die geometrische Grundlage für einen Spanngliedverlauf. Durch die Überlagerung der Schnittkräfte aus Vorspannung mit den Schnittkräften der Ergebnisumhüllenden aus dem Grenzzustand der Tragsicherheit resultieren kleinere Querschnittskräfte auf das Tragwerk (siehe Abb. 35 bzw. Abb. 36). Zusammenfassend sind folgende Auswirkungen zu beachten:

- Mittelfeld: ca. 33 % kleineres Feldmoment.
- Randfelder: ca. 20 % kleinere Feldmomente.
- Bei den Auflagern: ca. 40 % kleinere Stützmomente und ca. 35 % kleinere Querkräfte.

Der Berechnung wurden 10 VSL-Kabel 6-19 zu Grunde gelegt. Die charakteristische Bruchkraft beträgt $P_k=53'000\text{kN}$ und bewirkt eine Umlenkkraft von $u=122\text{kN/m}$. Die Vorspannkraft zum Zeitpunkt $t=0$ beträgt 75% der charakteristische Bruchkraft.

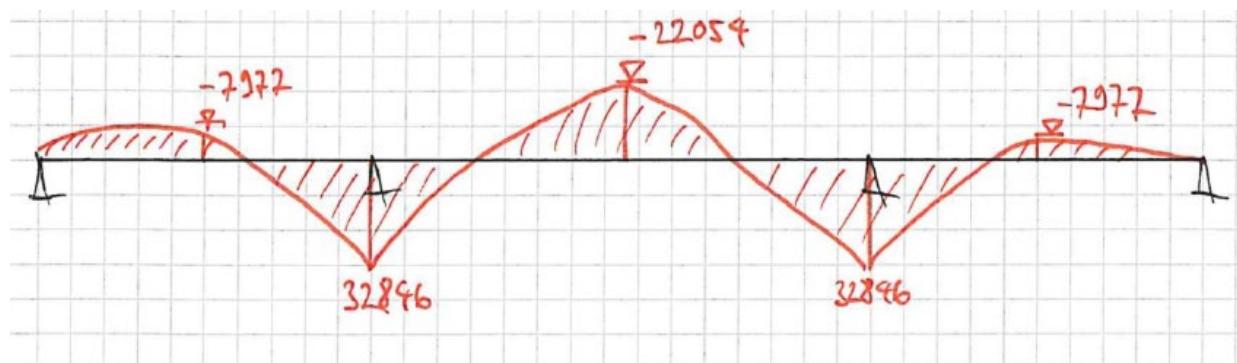
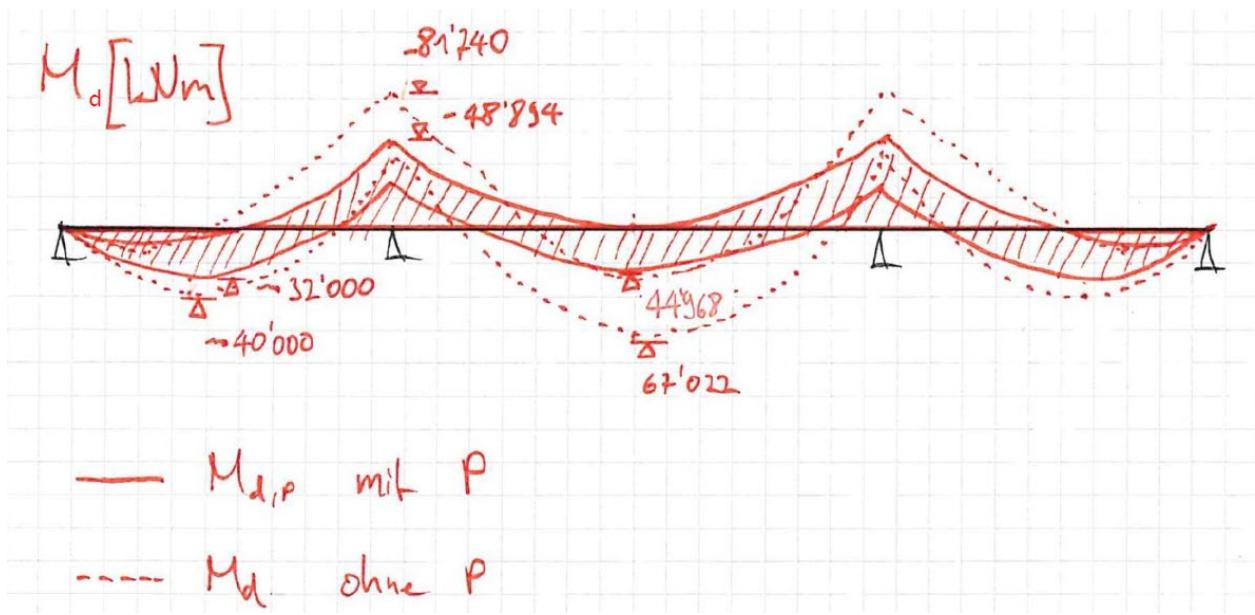
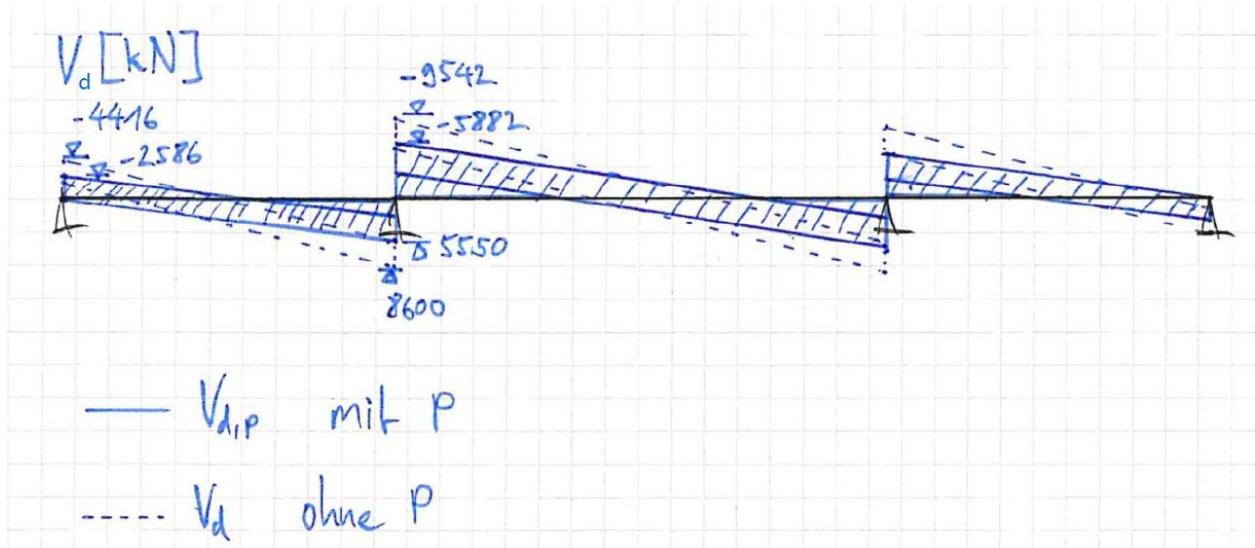


Abb. 34: Biegemoment M_d infolge der generierten Umlenkkräfte (Quelle: X. Ladon, 2022)

Abb. 35: Biegemoment M_d ohne (gestrichelte Linie) bzw. mit (durchgehende Linie) Vorspannung (Quelle: X. Ladon, 2022)

Die Vorspannung erlaubt auch Querkräfte abzutragen. Dies ist nicht ausser Acht zu lassen, denn die Schubfestigkeit von Holz ist relativ gering. Infolge Vorspannung resultieren rund 35% kleinere Querkräfte. Gemäss Berechnungsmodell (Ladon, 2022) wird die Vorspannung nur bei der Ermittlung der Schubspannungen infolge Querkraft berücksichtigt. Der Anteil der Schubspannungen infolge Torsion ist erheblich und wurde in beiden Fällen ohne bzw. mit Vorspannung gleich gerechnet.

Abb. 36: Querkraft V_d ohne (gestrichelte Linie) bzw. mit (durchgehende Linie) Vorspannung (Quelle: X. Ladon, 2022)

Da die Vorspannung 80% der ständigen Einwirkungen durch Umlenkkräfte kompensiert, wirkt sie sich logischerweise positiv auf die auftretenden Verformungen des Tragwerks (siehe Abb. 37) aus.

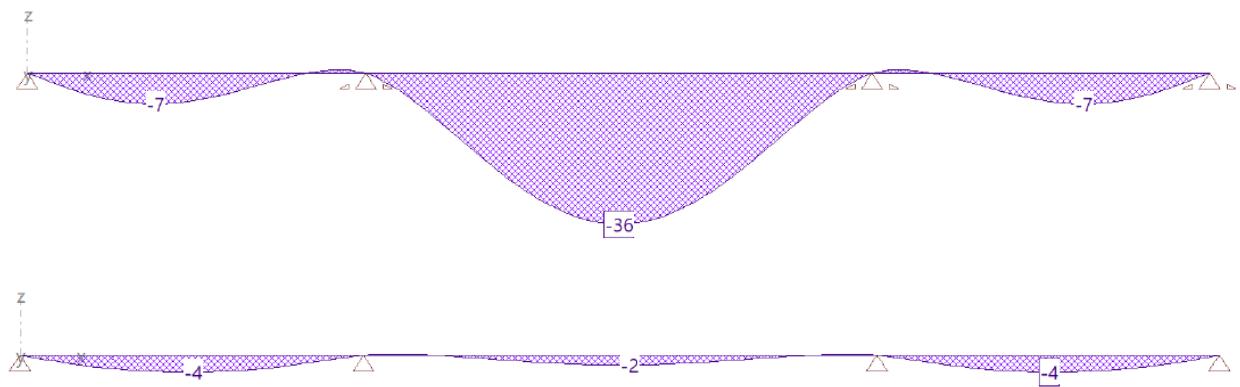


Abb. 37: Verformung v.o.n.u. ohne bzw. mit Vorspannung (Quelle: X. Ladon, 2022)

Die Normalspannungen im Querschnitt ohne bzw. mit Vorspannung sind an drei Stellen in der Längsrichtung des Trägers in Abb. 38 im Vergleich dargestellt.

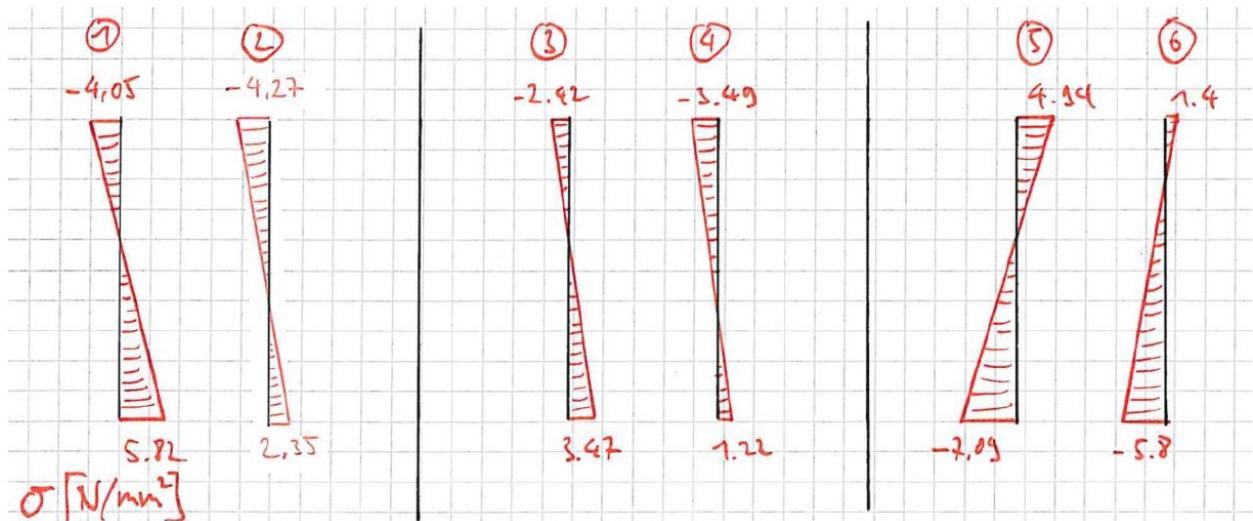


Abb. 38: Normalspannungen ohne bzw. mit Vorspannung v.l.n.r. in Mitte des Mittelfelds, in Mitte der Randfelder, über den Auflagern (Quelle: X. Ladon, 2022)

Zusammenfassend hat die Vorspannung folgenden Einfluss auf die Normalspannungen:

- Mittelfeld: ca. 33% kleinere Zugspannungen, etwa gleiche Druckspannungen.
- Randfelder: ca. 65% kleinere Zugspannungen, ca. 40% grössere Druckspannungen.
- Über den Auflagern: ca. 70% kleinere Zugspannungen, ca. 20% kleinere Druckspannungen.

3.9.4 Verankerung der Spannglieder im Holzbau

Die Verankerung der Vorspannkraft bei Einzellitzen von rund 200kN bis zu mehreren Tausend kN bei 20, 30 oder mehr Litzen bei grossen Vorspannkabeln stellt auch im Betonbau eine grosse Herausforderung dar. Die Verankerung von Vorspannkabeln setzt sich aus verschiedenen Einzelteilen zusammen: dem Ankerkopf wo mit Klemmen die Litzen verankert werden, dem formoptimierten Casting aus Guss-eisen, und den verschiedenen Teilen, um den Anschluss an die Hüllrohre und die Dauerhaftigkeit sicherzustellen. Auf der Seite der beweglichen Anker wird die Vorspannkraft aufgebracht. Feste (passive) Verankerungen werden direkt in den Stahlbeton eingegossen. Um die riesigen Kontaktpressungen aufnehmen zu können wird die Verankerungszone lokale verstärkt. Eine spiralförmige Spezialarmierung unter der Ankerplatte erlaubt durch die Behinderung der freien Dehnung («confinement») lokal die Druckfestigkeit vom Beton um Faktor 3 zu erhöhen. Die Länge der Spiralarmierung wird so festgelegt, dass nach erfolgter Lastausbreitung die «normalen» Betonfestigkeiten ausreichen, um die Druckspannungen aufnehmen zu können. Eine zusätzliche Spreizarmierung dient der Übernahme der Querzugspannungen.

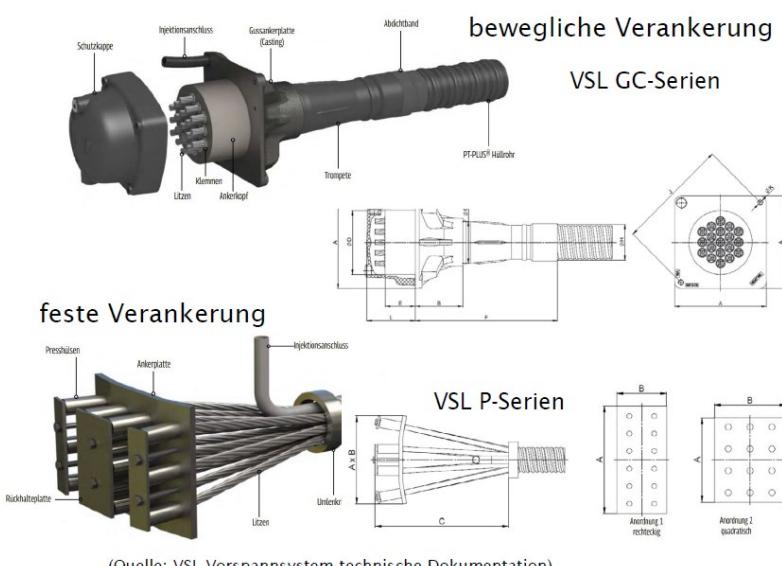


Abb. 39: Darstellung einer Spannverankerung und einer festen Verankerung (Quelle: Dokumentation VSL)

Es wurde untersucht, wie eine Endverankerung für Spannlitzen an einem Holzquerschnitt verankert werden können. Bestehende passive Verankerungen eignen sich nicht für den Holzbau und würden zusätzliche Beton-Spezialteile erfordern. In einem ersten Schritt wurde überlegt, wie eine aktive Verankerung aussehen könnte. Die Verankerung einer Einzel-Litze mit $0.75 \times 279 = 209$ kN ist relativ unproblematisch, hier sind dicke Stahlplatten mit relativ geringen Abmessungen ausreichend. Die Verankerung eines kleineren Vorspannkabels mit 5 Litzen ($0.75 \times 1395 = 1046$ kN) bis 7 Litzen ($0.75 \times 1953 = 1465$ kN) erfordert schon spezielle Massnahmen. Es ergeben sich folgende Fragestellungen:

- Wie können solche Verankerungskräfte lokal im Holzquerschnitt (Brettschichtholz / Brettsperrholz) verankert werden? Die lokale Druckspannungen sind riesig. Der VSL-Ankerkopf in Stahl für 5 oder 7 Litzen weist einen Durchmesser von 135 mm auf, das Gussteil für den Beton eine Fläche von 180mm x 180mm was zu Kontaktpressungen von bis zu 45N/mm^2 führt. Kein Standardsortiment in Holz ist in der Lage solche Druckspannungen aufnehmen zu können.
- Es sind in jedem Fall Verstärkungsmaßnahmen erforderlich um a) die Kontaktpressung und b) die Querzugspannungen aufnehmen zu können - wie könnten diese aussehen?

- Die Grösse der Querzugspannungen infolge von Spreizkräften, die Anhand vom Fachwerkmodell schön dargestellt werden können, hängen von der Möglichkeit der Lastausbreitung vom Werkstoff ab. Im parallelfaserigen Brettschichtholz liegt die Lastausbreitung über die Länge parallel zur Faserrichtung (gute Festigkeit) bei lediglich $\approx 10-15^\circ$, bei Belastungen senkrecht zur Faserrichtung (geringe Festigkeit) bei $\approx 30-45^\circ$. Die Lastausbreitung ist im Brettsperrholz infolge Absperrung deutlich besser, wobei bei regulärem Aufbau (könnte angepasst werden) nur jede zweite Schicht eine hohe Festigkeit aufweist.
- Besteht die Möglichkeit Verankerungen aus dem VSL-Sortiment «1:1» zu übernehmen? Oder wie müssten diese angepasst werden, um die Verankerungskräfte möglichst sanft in den Holzquerschnitt einzuleiten?
- Was würde dies bedeuten im Hinblick auf die Bearbeitung der Holzquerschnitte im Bereich der Verankerung?
- Wie kann eine Lastausbreitung längs des Brückenträgers garantiert oder verbessert werden?

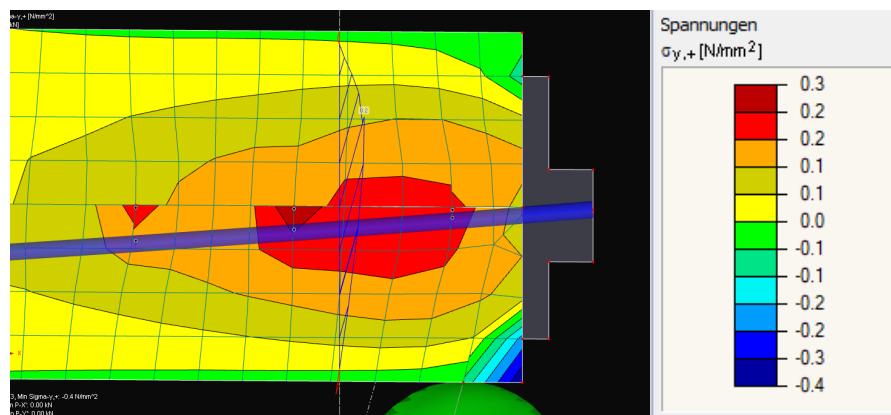
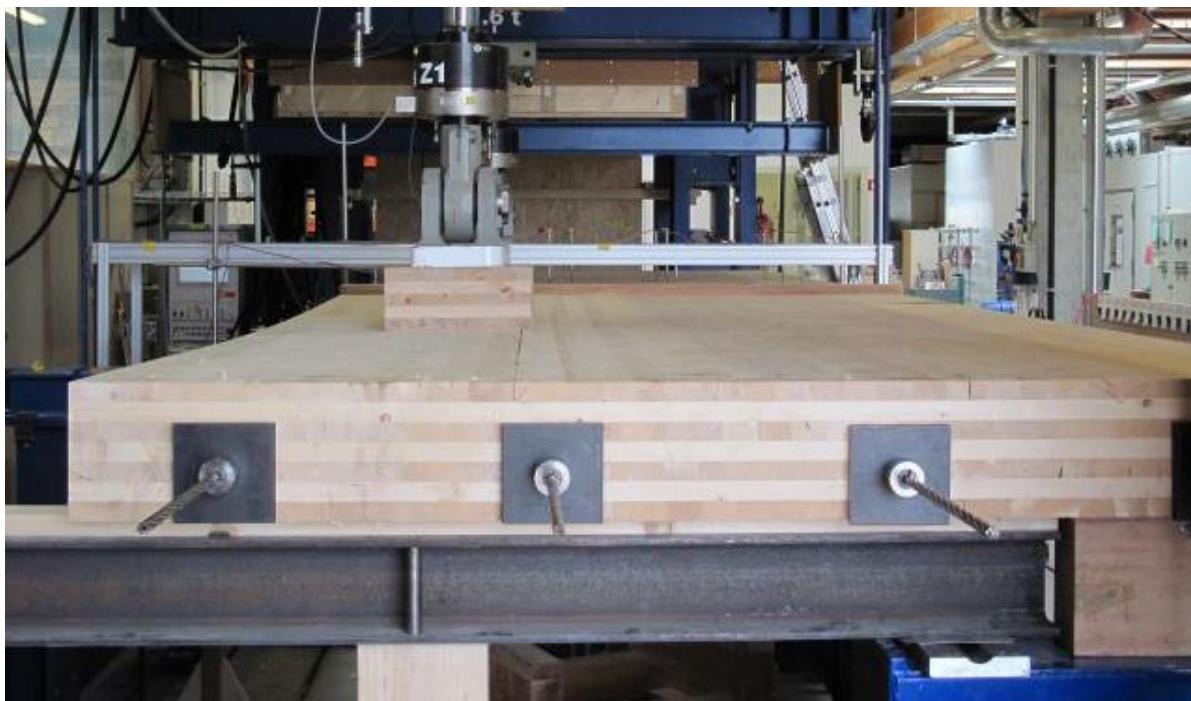


Abb. 40: Querzugspannungen unter der Ankerplatte (Quelle: M. Muster, ETHZ, 2022)



Manufacturing Concept

Hybrid Timber Panel System

Plant Scope

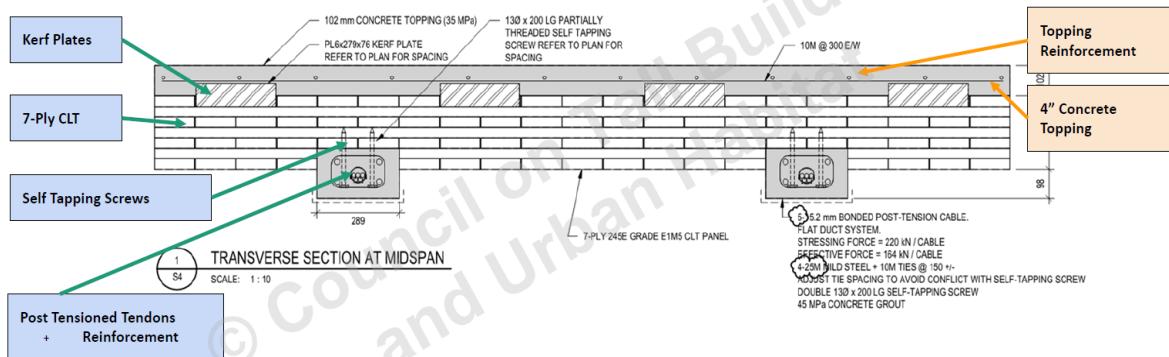


Abb. 41: Anwendungsbeispiele für vorgespannte CLT-Platten (Quellen: C. Sigrist, 2012 und Craig Applegath / DIALOG 2022)

Brettsperrholz eignet sich gut, um Litzen (mit oder ohne Hüllrohr) einzulegen. Durch Verschieben oder Weglassen einzelner Bretter können dazu erforderliche Hohlräume geschaffen werden. Prinzipiell sollte es möglich sein, die Litzen direkt mit dem umhüllenden Holz zu vergießen. Versuch dazu sind noch ausstehend. Um eine Durchlaufwirkung von längeren Litzen oder Kabel über mehrere Bauteile zu erzielen sind Hüll- oder Führungsrohre erforderlich. Auch diese sind, sofern eine Vorspannung mit Verbund erreicht werden möchte, mit dem Holz zu verbinden. Bei der oben gezeigten Anwendung für den mehrgeschossigen Wohnungsbau oder Decken für Hochhäuser werden die Hüllrohre mechanisch mit dem Brettsperrholz verbunden.

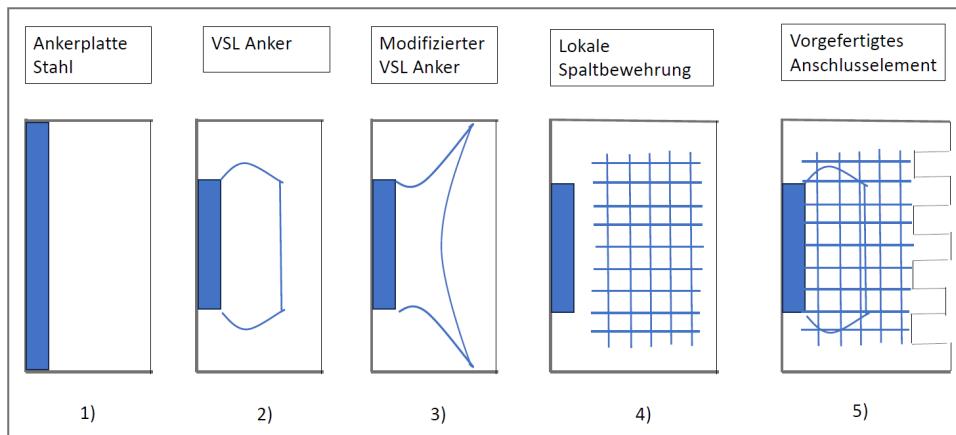


Abb. 42: Piktogramme, um die Möglichkeiten der Modifikation der Geometrie und Materialisierung bestehender VSL-Ankerköpfe darzustellen

Bei der vorliegenden Untersuchung zur Geometrie der Verankerung ging es darum, bestehende Hardware vom Forschungspartner VSL direkt zu verwenden, oder diese geringfügig so anzupassen, damit die grossen Druckkräfte in die Bauteile aus Holz eingeleitet werden können. Folgende Strategien wurden verfolgt:

1. Verankerung mittels übergrosser und dicker Stahlplatte
2. Verwendung bestehender Ankerköpfe von VSL und dazugehörige Gussteile (mobile Verankerungen), allenfalls vorsehen von Verstärkungsmassnahmen
3. Modifikation der Geometrie von bestehenden Ankerköpfen und Gussteilen von VSL, Spezial-Anker durch VSL entwickeln, herstellen lassen und prüfen
4. Entwickeln von lokalen Verstärkungsmassnahmen im Holz, limitierte Ankerzone mit Verstärkungen ausbilden und mit Holzquerschnitt «vergiessen», einleiten der Kräfte über eine grössere Länge, um Querzugspannungen infolge Lasteinleitung zu minimieren
5. Verankerungsblock aus Hartholz, gekreuzten Lagenhölzer oder Beton zur Schaffung einer Übergangszone, aufgesetzte Verankerungszone ausbilden und konventionell mit Holzquerschnitt verbinden, Übergabe der bereits verteilten Verankerungskräfte auf den gesamten Holzquerschnitt (Lastausbreitung erfolgt).

Lokale Zwischenstücke sind auch in Holz / Hartholz möglich und können spezifisch gefertigt werden. Um die Zwischenstücke oder die modifizierte Verankerung mit dem Bauteil zu verbinden sind freie Fräseigometrie mit flexibler Geometrie und absoluter Passgenauigkeit dank dem Einsatz von CNC-Maschinen möglich.

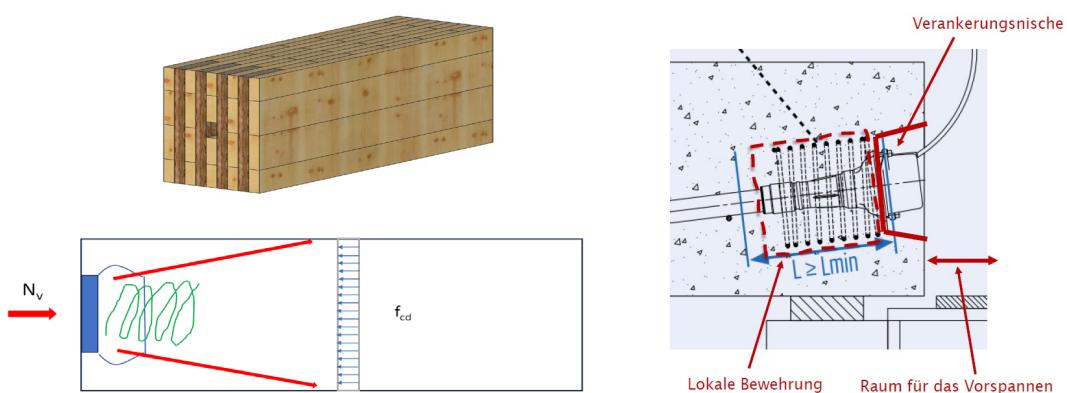


Abb. 43: Lastausbreitung, Spiralmierung, Zwischenstücke oder Ankerblöcke

Auch im Betonbau können die lokalen Pressungen unter der Ankerplatte und dem dazugehörigen Casting mit spezieller Geometrie nicht übernommen werden. Gleich nach der Verankerung wird eine spiralförmige Armierung eingebracht mit dem hauptsächlichen Ziel die Druckfestigkeit durch dieses «confinement» um Faktor 3 zu erhöhen. Im Beton können so lokale Druckfestigkeiten $f_{c,d}$ von bis über 60 N/mm² erreicht werden. Die Länge dieser Armierung wird so festgelegt, dass sich gleichzeitig die Last mit einem Winkel von etwa 30° ausbreiten kann.

Im Holzbau die Lastausbreitung bei parallelfaserigem Holz (Vollholz, BSH) mit $\approx 10-15^\circ$ deutlich geringer. Die Lastausbreitung senkrecht zur Faserrichtung ist mit $\approx 30-45^\circ$ deutlich besser, kann aber nicht genutzt werden da Holz senkrecht zur Faserrichtung keine nennenswerten Festigkeiten aufweist. Baustoffe mit Schichtaufbau mit jeweils 30° (Sternsperrholz) bis 90° gedrehten Schichten (Sperrholz, Mehrschichtplatten) weisen eine bessere Lastausbreitung und eine verminderte Spaltgefahr bei Spannungen senkrecht zur Haupttragrichtung auf. Zusätzlich eingeklebte Gewindestangen, mechanische Verbindungsmitte und / oder Verstärkungselemente könnten eine seitliche Lastausbreitung begünstigen. Die Frage, wie mittels eines holzspezifischen «confinements» (es können keine spiralförmigen Armierungen eingebaut werden) eine annähernd grosse Erhöhung der Druckfestigkeit erzielt werden könnte ($f_{c,d} \times 2$ bis 3) wurde bislang nicht geprüft oder untersucht.

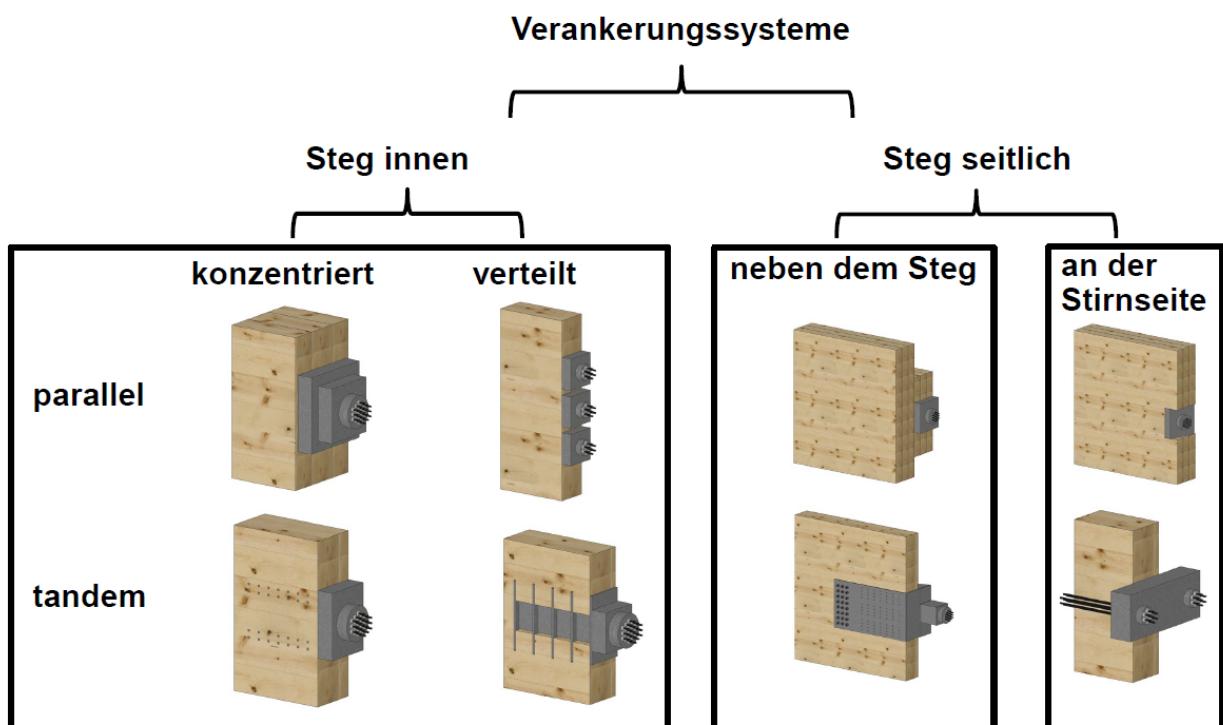


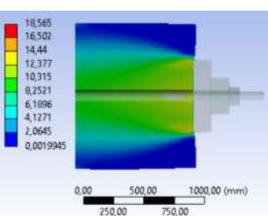
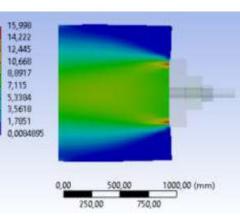
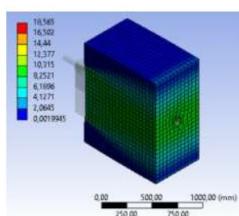
Abb. 44: Spannverankerungen punktuell, aufgeteilt an innenliegenden oder seitlichen Stegen (Quelle Zhang, 2022)

Die «Tandem» Lösung hat zum Ziel, Spannungskonzentration durch anteilige Lastabtragung einerseits über Kontaktpressung und anderseits über lasteinleitende Massnahmen in Distanz zur Kontaktfläche zu verringern. Dies könnte über eingeklebte Gewindestangen, mehrfache querliegende und steife Bleche oder Stabdübel-Verbindungen erfolgen. Das Ziel wäre die Lastausbreitung zu verbessern und Spannungen zu reduzieren.

1-a. Konzentrierte Lasteinleitung



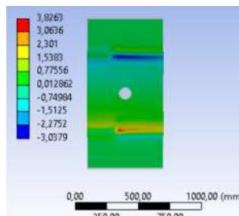
Druckspannung in Ankerzone (MPa):



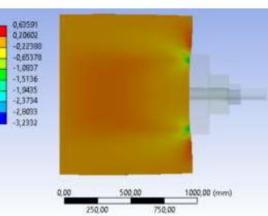
(Oberfläche)

(Schnitt Mittellinie)

Schubspannung in Ankerzone (MPa):



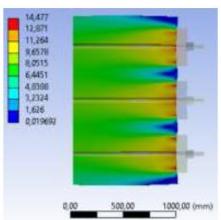
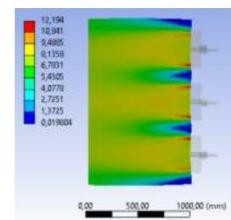
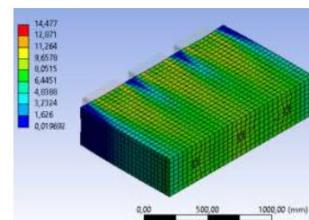
Querzug hinter dem Lasteinleitungsbereich (MPa):



2-a. Verteilte Lasteinleitung



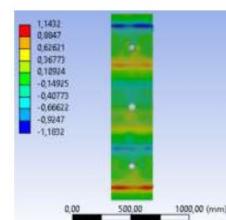
Druckspannung in Ankerzone (MPa):



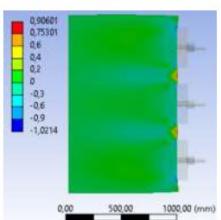
(Oberfläche)

(Schnitt Mittellinie)

Schubspannung in Ankerzone (MPa):



Querzug hinter dem Lasteinleitungsbereich (MPa):

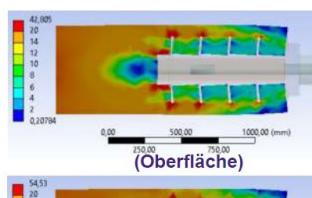
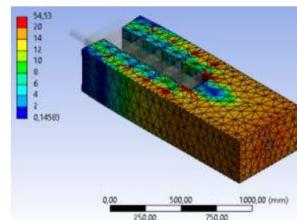


7.09.2022

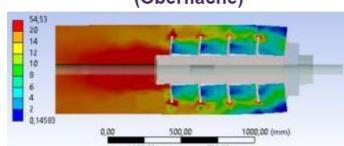
3. Verteilte Lasteinleitung (Tandem)



Druckspannung in Ankerzone (MPa):

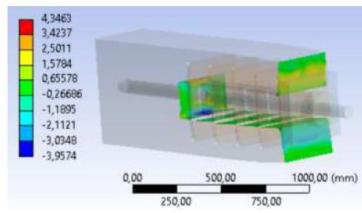


(Oberfläche)

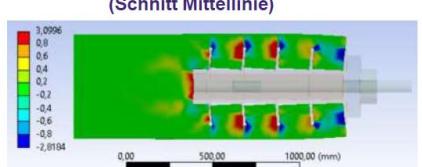


(Schnitt Mittellinie)

Schubspannung in Ankerzone (MPa):



Querzug hinter dem Lasteinleitungsbereich (MPa):



27.09.2022

16

Abb. 45: Modellierung verschiedener Möglichkeiten der Verankerung von grossen Spannkräften (Quelle Zhang, 2022)

Im Rahmen der studentischen Vorarbeit wurden Voruntersuchungen zur Modellierung des Bereiches unter der Verankerung vorgenommen. Im Fokus standen insbesondere die Ausbildung grosser Querzugsspannungen infolge der Lastausbreitung (siehe Fachwerkmodell) und der Möglichkeit der Aufsplitzung der Spannkräfte in einen Teil unter der Kontaktfläche und in einen Teil mit kontinuierlichem Lasteintrag über eine festgelegte Verankerungslänge. Die daraus resultierenden Spannungen im Holz sind dann durch geeignete Verstärkungsmassnahmen zu übernehmen und die Stahlteile den Belastungen entsprechend zu dimensionieren. Die oben dargestellten Ergebnisse sind vorerst rein qualitativer Natur, denn die Modellierung der Holzeigenschaften, der Geometrie der Verankerung und die Länge des modellierten Bereiches beeinflussen wesentlich die Ergebnisse und bedürfen einer vertieften (theoretischen) Analyse. Die Modelle wären in einem weiteren Schritt durch entsprechende Versuche zu validieren.

3.9.5 Zusammenfassung – Ausblick

Die Vorspannung ist bei einem Holztragwerk solcher Wichtigkeit, Grösse und Masse als «second line of defence» zu betrachten. Schon aus diesem Grund lohnt es sich ein Brückentragwerk vorzuspannen. Wie dargestellt wurde, reduzieren sich mit der Vorspannung in Folge der Umlenkkräfte die Querschnittskräfte und die Biegemomente. Die zusätzlich eingebrachte Normalkraft hat einen positiven Einfluss auf die Querschnittsspannungen und reduziert generell die Zugspannungen, die kritisch in Bezug auf das spröde Versagen sind. Die Reduktion der Verformungen ist ein weiteres Argument, um eine Vorspannung einzusetzen. Ihre Wirkung als permanente «Schraubzwinge» sollte zudem zu weniger Rotationen (in den Fugen) führen. Eine positive Wirkung in Bezug auf Schwingungen ist jedoch weniger offensichtlich und Fragen bezüglich der Langzeitwirkung und Ermüdung sind zu klären. Infolge des geringen Eigengewichtes von Holztragwerken sind die Spannungsänderungen aus den Nutzlasten in den Spannkabeln im Vergleich zum Betonbau deutlich höher. Eine Vorspannung ist auf jeden Fall günstig und sollten in Verbindung mit Fertigung und Montage entwickeln werden.

Mit einer internen Vorspannung wird eine höhere statische Höhe im Vergleich zur externen Vorspannung erzielt und führt somit zu kleineren Vorspannkräften. Die Dauerhaftigkeit steigt bei einer internen Vorspannung, diese ist jedoch deutlich aufwändiger zu fertigen. Eine externe Vorspannung ist auf der anderen Seite kontrollierbar, austauschbar und ergänzbar.

Bezüglich der Voruntersuchungen zu den Verankerungen, deren Einsatz und Ausführung konnten weniger Arbeiten als ursprünglich geplant durchgeführt werden. Es kann jedoch klar gezeigt werden, dass die riesigen Vorspannkräfte in Bauwerken mit so grossen Spannweiten nur mit viel Aufwand verankert werden können. Die grössten Knackpunkte sind dabei die extremhohen Druckspannungen direkt unter der Ankerplatte und die Querzugsspannungen, die infolge der Lastausbreitung im Holzquerschnitt auftreten.

Der Baustoff Holz ist in der Lage sowohl Zug- als auch Druckspannungen aufzunehmen. Das Tragverhalten im Vergleich zum Beton, der im Endzustand als gerissen angenommen wird, ist deshalb nicht zu vergleichen. Dazu kommt das grosse Eigengewicht, was dazu führt, dass bei Betontragwerken mindestens die Gesamtheit oder bis maximal 130% der permanenten Lasten umgelenkt werden. Dies ist im Holzbau nicht wirklich erforderlich. Generell könnte der Ansatz verfolgt werden «so viel vorzuspannen, wie man Kräfte verankern kann».

Folgende Punkte erfordern weiteren Forschungsbedarf:

- Der Vorspangrad muss sehr gut überlegt werden. Wie viel % der permanenten Lasten oder sogar der Nutzlasten sollen umgelenkt werden?
- Auf welchem «Niveau» soll die Grundauslastung der Litzen liegen?
- Die Ermüdung bzw. die Auswirkung von grossen Spannungswechseln sind zu betrachten.
- Eine geschickte Wahl der Länge des Lasteinleitungsbereiches ist gefordert. Was ist der Einfluss auf Lastausbreitungswinkel und demzufolge Querzugsspannungen in diesem Bereich? Welche Verstärkungsmassnahmen sind in diesem Bereich möglich (zweiachsig)?

- Vorspannung mit Verbund erhöht den Tragwiderstand, es sollte abgeklärt werden, wie der Verbund zwischen Holz und Hüllrohr erreicht werden kann.
- Bislang wurde keine Queranalyse der möglichen Brückenquerschnitte durchgeführt. Die Kabelführung quer in der Fahrbahnplatte könnte zu interessanten und kostengünstigen Ergebnissen führen. Die Hohlkästen müssen auf der Unterseite in Querrichtung vorgespannt werden, damit die auftretenden Querzugsspannungen bei nicht symmetrischen und nicht vollflächigen Belastungen übernommen werden können.
- Bezuglich der Verankerungen sind noch keine Lösung entwickelt, um die grossen, lokalen Pressungen (Effekt «confinement» im Holzbau) und Querzugsspannungen übernehmen zu können. Auch in Bezug auf die Geometrie der Verankerungen sind grundsätzliche Fragen noch nicht gelöst.

3.10 Ausführung und Herstellung

Das Workshop 4 war auf die Brückenmodularisierung, sowie die Möglichkeiten bezüglich des Abbunds und Transports der Brückensegmente fokussiert. Die Teilnehmenden haben in zwei Arbeitsgruppen gearbeitet und folgende Varianten für die Modularisierung evaluiert:

- Variante A: Modulares Röhrenmodell
- Variante B: Segmentmodell
- Variante C: Einzelelemente

Der Kostenaspekt wurde in dieser Evaluierung nicht berücksichtigt.

3.10.1 Varianten

Variante A: Modulares Röhrenmodell

Die Variante A ist ein modulares Röhrenmodell (vgl. Abb. 46). Im Werk werden die einzelnen Brettschichtholzträger als Kastenträger «blockverklebt».

Röhre sowohl auch Fahrbahnplatte sind somit modular. Die Fahrbahnplatte aus Brettsperrholz wird in situ kraftschlüssig mit den Röhren verbunden.

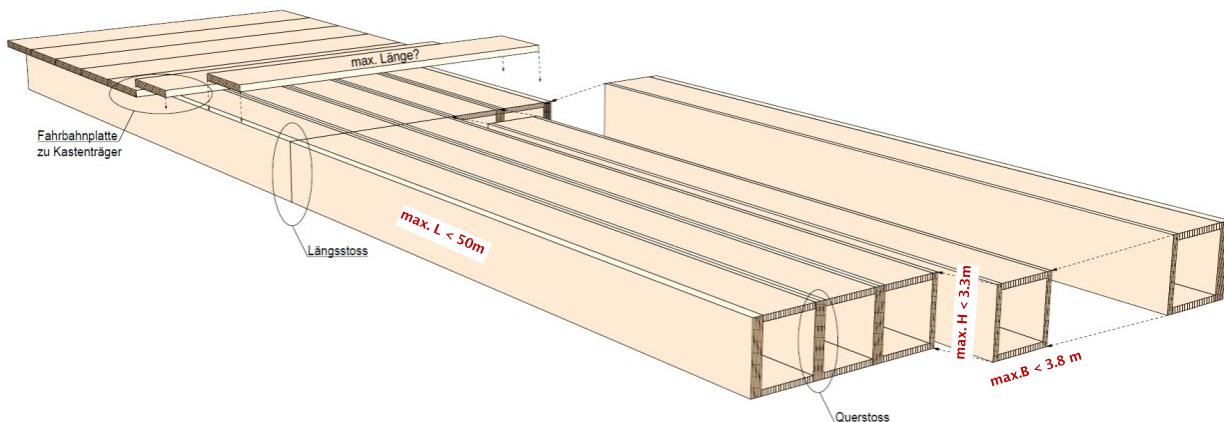


Abb. 46: Variante A, modulares Röhrenmodell

Die Variante A wurde folgendermassen evaluiert:

- Die Herstellung wurde als gut möglich betrachtet mit versetzten Generalkeilzinkenstössen innerhalb der Elemente.
- Die Ausbildung/Entwicklung von zwei Stosspunkten ist erforderlich, und zwar Stoss in Längs- und Querrichtung der Röhren.
- Die Modulgrösse kann, aufgrund des Transports und der Begrenzung der möglichen Produktionsgrössen der Hersteller (Länge Pressbett, Hallenkran, usw.), bis 50m in der Länge ange setzt werden.
- Vorbehalt gegenüber Schweizer Produktion: die Dimensionen übersteigen die Grenzen der Schweizer Produzenten, dies sollte bedacht werden.
- Die Ausführung des biegesteifen Längsstosses ist von grosser Wichtigkeit.
- Die Realisierung einer freien Linienführung könnte Schwierigkeiten ergeben.
- Montage/Positionierung der Röhren und Ausführbarkeit einer Quervorspannung des Brücken decks sind zu prüfen.
- Integration der Vorspannung ist als realisierbar betrachtet.

Variante B: Segmentmodell

Bei der Variante B wird der ganze Querschnitt als ein Segment im Werk produziert. Anschliessend werden die Segmente auf die Baustelle transportiert und in Längsrichtung miteinander verbunden.

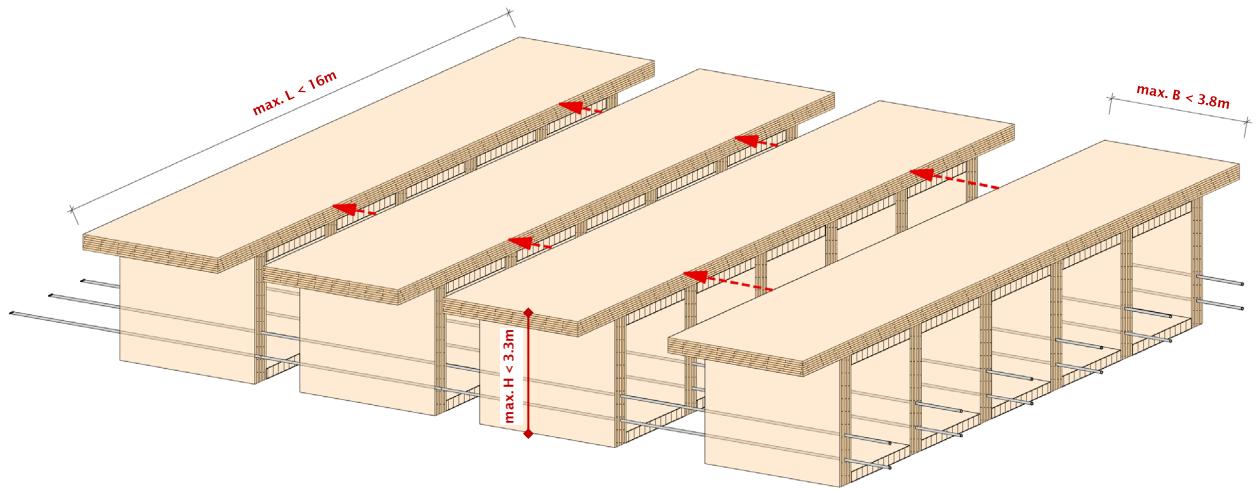


Abb. 47: Variante B, Segmentmodell

Die Variante B wurde folgendermassen evaluiert:

- Gute Vorproduktion im Werk, realistische Grössen für Schweizer Holzproduzenten, Wertschöpfung liegt in der Schweiz.
- Freie Linienführung und variable Querschnittshöhen sind realisierbar.
- Montage zwingend in Kombination mit Vorspannung, da rein mechanische Verbindungen im Zuggurt nicht umsetzbar sind.
- Erarbeitung eines Stosspunktes in Längsrichtung.
- Die Ausführung der Quervorspannung des Brückendecks in Vorproduktion ist möglich.
- Es muss beachtet werden, dass die Zugfestigkeit im Holz nicht genutzt werden kann, da es viele Stösse mit weniger Tragfähigkeit gibt.
- Freivorbau ist möglich, leichtere Montage (vgl. Brücken Stahlbeton).

Variante C: Einzelelemente

Bei der Variante C werden die Einzelelemente im Werk produziert und sind auf der Baustelle zusammenzukleben (vgl. Abb. 48).

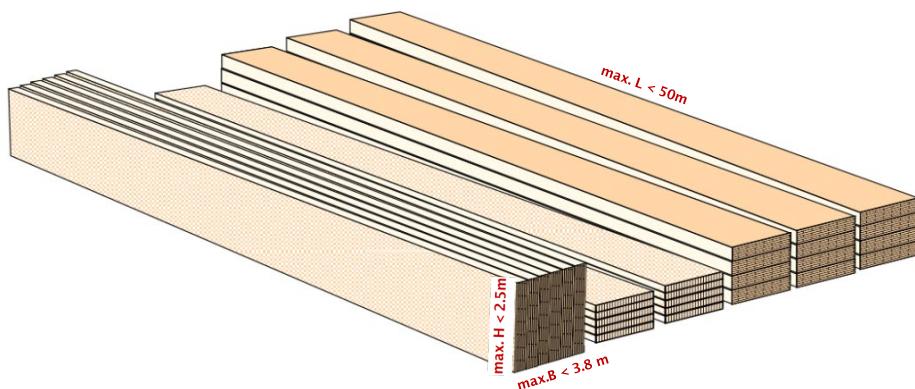


Abb. 48: Variante C, Einzelplatten

Die Variante C wurde folgendermassen evaluiert:

- Diese Variante ist ab Werk komplett bis Baustelle möglich.
- Relevanzsteigerung bei Einrichtung eines Taktschiebeverfahrens mit Produktionszelt vor Ort, aber eher nein aufgrund der hohen Anzahl an Vorortstößen und das Ziel zur Vermeidung von «Kleben auf der Baustelle».
- Einfacher, kostengünstiger Transport.

3.10.2 Empfehlung

Aus der Evaluierung der 3 Varianten hat sich ergeben, dass Varianten A und B, als Ansatzlösung mit weiterem Forschungsbedarf, weiterzuverfolgen sind. Bei Variante C stellt das «Kleben auf der Baustelle» eine Herausforderung dar, die mit vielen Unsicherheiten verbunden ist.

Folgende Punkte werden empfohlen bei der Ausführung der Varianten A bzw. B zu beachten:

- Das Taktschiebeverfahren mit gesamter Querschnittsbreite mit Produktionszelt wäre eine sehr gute Option, da hier in «geschützter Umgebung» wichtige Abdichtungen und Anschlüsse wie Schrammbord/Geländer ausgebildet werden können.
- Varianten mit Nocken, Zapfen, Kerven für die Lagesicherung der Elemente untereinander während der Montage sind noch zu prüfen.
- Der Fokus muss auf mechanische Verbindungen, die auf dem Markt üblich sind (Bolzen, Schrauben, Stabdübel) liegen. Der Schlupf der Verbindung muss beachtet werden.
- Der Verguss von Verbindungen und Bolzen ist zu berücksichtigen, um höhere Steifigkeit bzw. weniger Schlupf zu erzielen.
- Schrammbordüberstand ist durch Streben und Schotte zu unterstützen.

3.11 Detailausbildung

Im Rahmen des Workshops 5 und des Brainstormings der Abschlussitzung wurde die Problematik der Detailausbildung betrachtet. Der Fokus wurde auf folgende Details gerichtet:

- Fahrbahnaufbau.
- Schrammbord & Rückhaltesystem / Entwässerung.
- Fahrbahnübergang.
- Querstoss der einzelnen Kastenträger.

3.11.1 Fahrbahnaufbau

Die Diskussion hat sich auf folgende Fahrbahnvarianten konzentriert:

- Var. 1: Fahrbahnplatten in Holz-Beton-Verbundbauweise / Gussasphalt.
- Var. 2: Fahrbahnplatte in Holz / Gussasphalt.
- Var. 3: Fahrbahnplatte in Holz / UHFB / Gussasphalt.

Bei der Var. 1 sind grundsätzlich die Details bekannt und erprobt. Eine Fahrbahnplatte aus Stahlbeton, welche mit dem Holztragwerk im Verbund wirkt, agiert als Druckkomponente und schützt zugleich das Holztragwerk vor Witterungseinflüssen.

Der Fokus dieser Machbarkeitsstudie liegt jedoch auf einem möglichst «reinen» Holztragwerk. Aus diesem Grund wurde eine Fahrbahnplatte aus Holz / Gussasphalt (Var. 2) unter die Lupe genommen. Diese Variante wurde grundsätzlich als realistisch beurteilt, jedoch besteht dort noch Forschungsbedarf. Die Feuchtigkeit und Ablagerungen von Schmutz etc. sind Aspekte, die bei einer reinen Holzfahrbahnplatte kritisch werden können. Es existieren aber Lösungen, dass Schmutz und Schlagregen vom Brückenquerschnitt nicht an das Tragsystem gelangen.

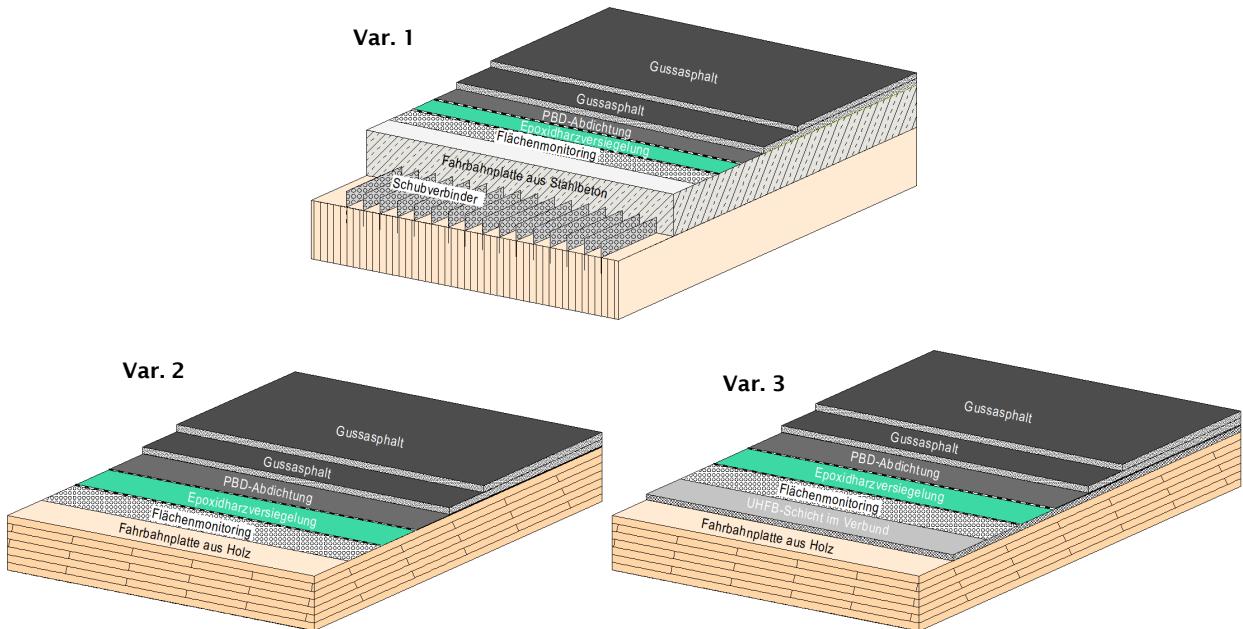


Abb. 49: Fahrbahnaufbau v.o.n.u. bzw. v.l.n.r. im Holz-Beton Verbund / Gussasphalt (Var. 1), in Holz / Gussasphalt (Var.2), in Holz / UHFB / Gussasphalt (Var.3)

Var.2 ist in Anlehnung an die zukünftige «VSS 40 451 – Abdichtungssysteme und bitumenhaltige Schichten auf Brücken mit Fahrbahnplatten aus Holz» aufgebaut (vgl. Abb. 49). Der Aufbau in Var. 3 stellt einen robusteren Aufbau dar. Eine zusätzliche Schicht aus UHFB dient als «steife» und dichte

Schicht, welche die Fahrbahnplatte aus Holz schützt. Man denke auch an eine Sanierung der Asphaltdeckschicht, wobei der alte Belag abgefräst wird.

Der wichtigste Punkt ist, dass die Fahrbahnabdichtung durchgängig ist und durch keine Verbindungsmitte oder Entwässerungssysteme durchdrungen wird. UHFB könnte eventuell eine Abdichtung ersetzen (lt. Normenkommission ist es, gemäss dem heutigen Stand, nicht als Abdichtungsebene anerkannt). Die verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten bzw. -differenzen von Holz, Asphalt etc. könnten zu Schäden an Abdichtungssystem (Fahrbahnübergängen, etc.) führen. Diese Problematik erfordert weitere Forschung.

Das Flächenmonitoring stellt, bei einem Holztragwerk solcher Wichtigkeit, ein sehr entscheidender Bestandteil des Sicherheitskonzepts dar. Die Realisierung bzw. die Überwachung eines solchen Monitoringsystems stellt eine Herausforderung dar, und verlangt weiteren Forschungsbedarf.

3.11.2 Schrammbordanschluss & Rückhaltesystem

Während des 5. Workshops hat man sich auf eine robuste Lösung geeinigt, welche folgende Punkte einschliesst:

- Dichtheitsebene darf in keiner Weise durchdrungen werden.
 - o Demnach ist die Entwässerung durch die Kappe zu führen.
 - o Die Kappe kann von der Fahrbahnplatte entkoppelt oder (wenn vorhanden) monolithisch aus der UHFB-Schicht realisiert werden.
- Schutzschicht vor Fräsmaschinen auf der Fahrbahnplatte (Holz) kann aus UHFB (zusätzliche Dichtheitsebene und Steifigkeit) realisiert werden.

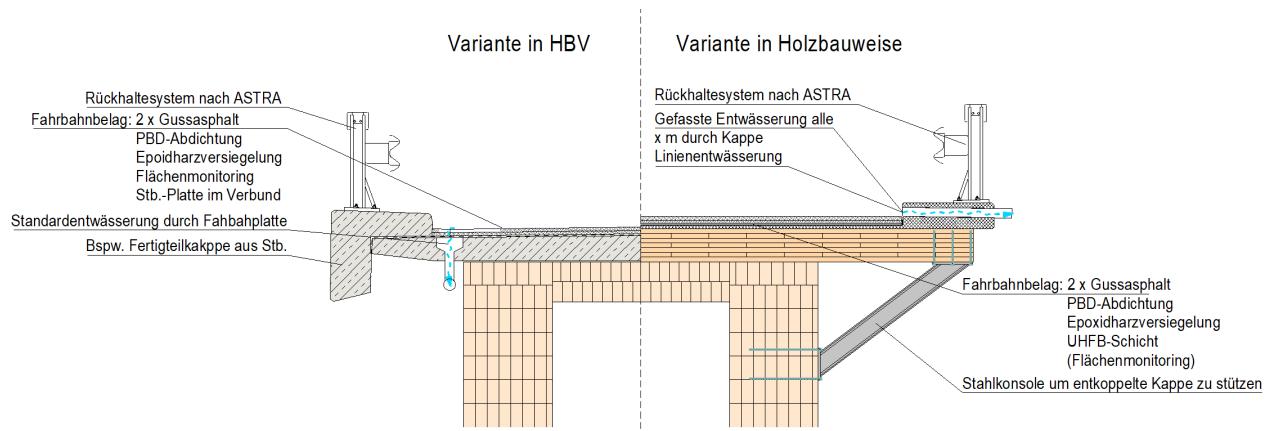


Abb. 50: Schematische Detaillösung eines Schrammbordanschlusses und Fahrbahnentwässerung, mit der Fahrbahnplatte v.l.n.r. im Holz-Beton Verbund (Var. 1), Holz (Var. 2, Var. 3)

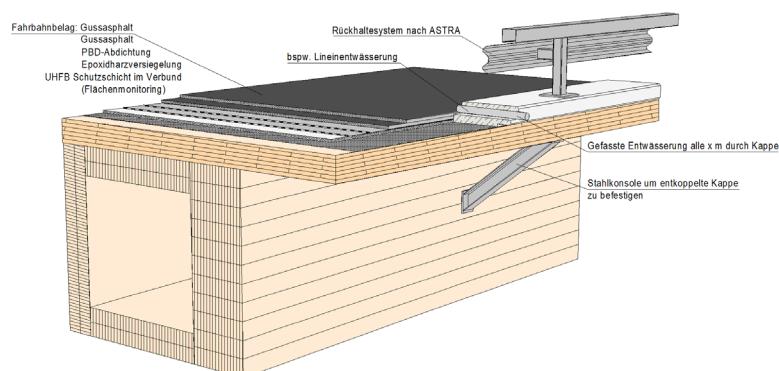


Abb. 51: Schematische Axonometrie (Var. 2, Var. 3)

3.11.3 Fahrbahnübergang

Beim Fahrbahnübergang sind integrale Lösungen anzustreben. Folgende Aspekte sind in Betracht zu ziehen zu werden:

- Vorteil besteht in fugenlosem Fahrbahnübergang.
- Beim Fahrbahnübergang sind erforderliche Vorspannungskräfte bzw. ihrer Verankerung zu beachten.
- Hohe Beanspruchung sind zu erwarten und die Auflagerung ist entsprechend zu lösen bzw. zu bemessen.

In Abb. 52 ist ein Beispiel eines Querschnitts und des Momentenverlaufs bei integraler Bauweise (Quelle: «Die Stuttgarter Holzbrücken im Remstal», Informationsdienst Holz (2020)).

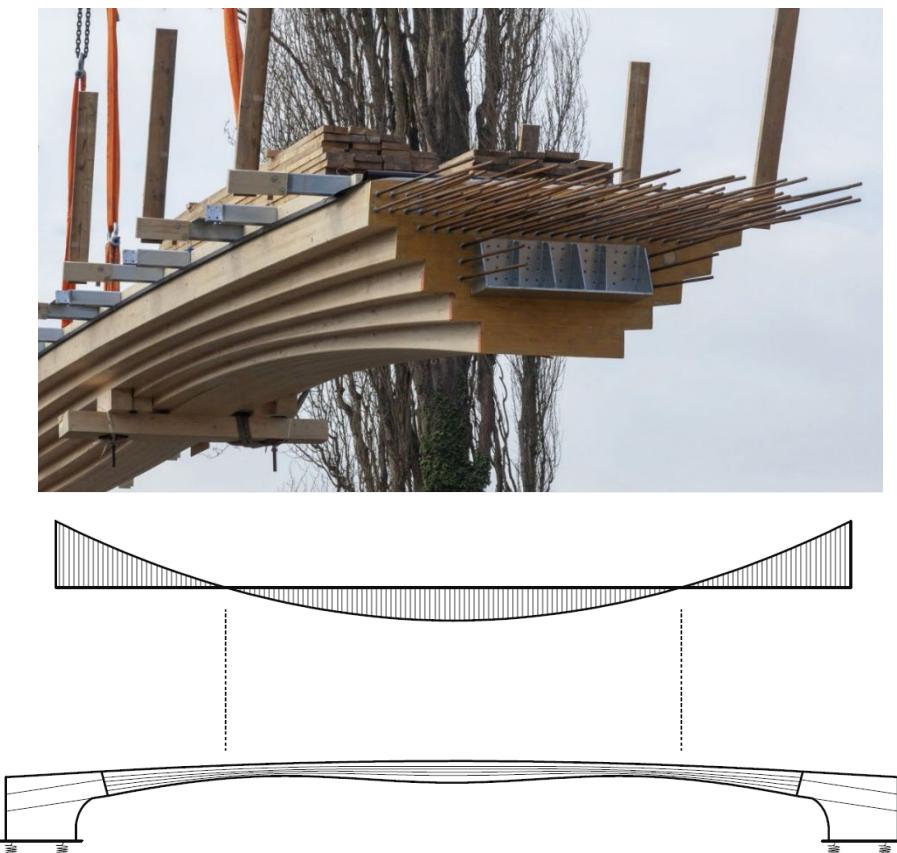


Abb. 52: Querschnitt und Momentenverlauf bei integraler Bauweise (Quelle: «Die Stuttgarter Holzbrücken im Remstal», Informationsdienst Holz (2020))

3.11.4 Querstoss der Stege

Dieses Unterkapitel behandelt Ideen bzw. Ansatzlösungen für die Querstossausbildung der Stege. Die Querstossproblematik der einzelnen Kastenträger stellt ein sehr wichtiges Thema dar, das weitere Forschung verlangt.

Als erster Ansatz stehen Klebeverbindungen, die Verwendung von «Schubhölzern» sowie verschiedene Varianten verzahnter Stege im Fokus.

- Klebeverbindung

Durch die Anwendung von Klebstoffen wird nicht nur eine starke, sondern auch eine gleichmäßige Übertragung von Schubkräften ermöglicht. Die Auswahl des geeigneten Klebstoffs in Abhängigkeit von den spezifischen Anforderungen und Umgebungsbedingungen ist dabei von entscheidender Bedeutung. Eine weitere grosse Herausforderung bleibt das Herstellen und Gewährleisten einer Kraftschlüssigen Klebefuge.

- Schubhölzer

Die Verwendung von Schubhölzern stellt eine einfache, aber dennoch wirksame Methode zur Querkraftübertragung dar. Diese Hölzer können in regelmässigen Abständen in die eingefrästen Nuten in den Stegen platziert werden, um eine Schubübertragung zu gewährleisten.

- Versetzte / verzahnte Stege

Versetzte oder verzahnte Stege sind eine innovative Lösung zur Verbesserung der Querkraftübertragung. Durch die Versetzung der Stege zueinander entsteht eine Art Verzahnung, die die Übertragung von Schubkräften effizient leistet. Dieser Ansatz ermöglicht eine erhöhte Steifigkeit und Belastbarkeit der gesamten Struktur.

- Vergleich und Kombination der Verbindungsmechanismen

Die Wahl zwischen Klebeverbindungen, Schubhölzern und versetzten Stegen hängt vor allem von Machbarkeit der Herstellung und Montage ab. In einigen Fällen kann auch eine Kombination dieser Verbindungsmechanismen eine optimale Lösung bieten, um eine hohe Tragfähigkeit und Stabilität zu erreichen.

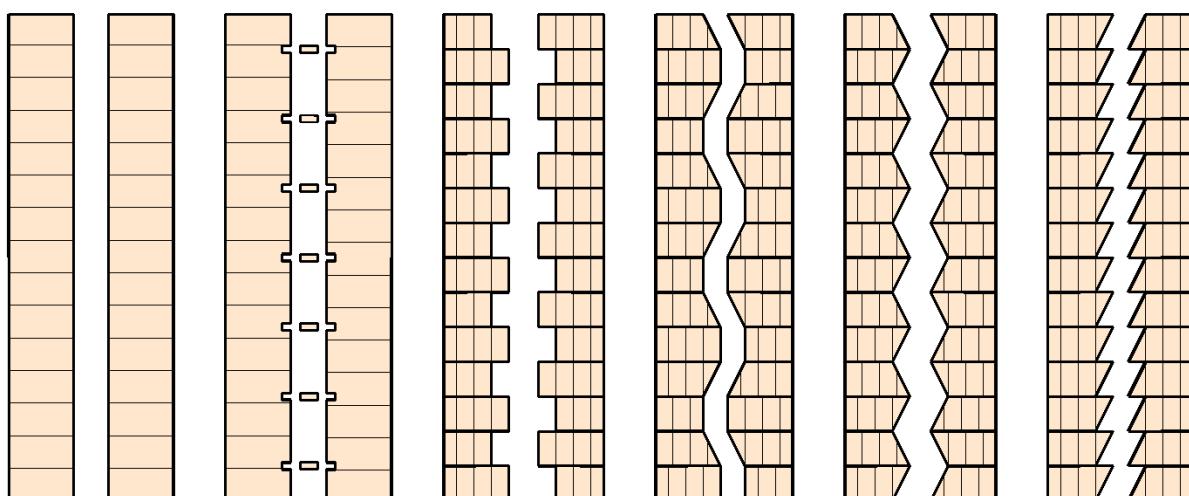


Abb. 53: Ansatzlösungen für die konstruktive Realisierung eines Schubverbunds zwischen den Innenstegen (v.l.n.r. Klebeverbindung, Schubhölzer, Varianten Verzahnung)

3.12 Wissenstransfer

Erster Wissenstransfer erfolgte und hat sich auf die Lancierung des Projektes und die Bekanntgabe der Errichtung des Arbeitsmodells konzentriert. Folgende Publikationen konnten erfolgen:

- *Zwei Brücken je Kilometer - viel Potenzial für Holzbau.* Holzkurier 21, S. 24, 27.05.2022
- *Nach Wildtierüberführung kommt Autobahnbrücke aus Holz.* Holzzentralblatt, Nr. 26, 01.07.2022
- Schmid S. (2022) *Brücken aus Holz: Forschung für Verkehrsinfrastruktur intensiviert.* Baublatt, <https://www.baublatt.ch/baupraxis/bruecken-aus-holz-forschung-fuer-verkehrsinfrastruktur-intensiviert-31627>
- Müller A. (2022) *Holz hat im Brückenbau wieder einen neuen Stellenwert erreicht.* Strasse und Verkehr Nr 7-8, S. 4ff.
- Franke B., Franke S. (2022) *Holzbrücken für die nächste Generation von Infrastrukturwegen.* Strasse und Verkehr Nr. 7-8, S. 6-13

4 Zusammenfassung

Die Realisierung von weitspannenden und mehrspurigen Schwerlastbrücken in Holz wurde im Rahmen dieses Projekts in Zusammenarbeit mit den Wirtschaftspartnern erforscht. Diese Machbarkeitsstudie sollte ein wichtiger Beitrag in Richtung der Klimaneutralität der Schweiz im Jahr 2050 leisten.

Im Projektablauf konnten insgesamt sechs Workshops mit den Partnern aus der Praxis zielführend umgesetzt werden. In der Methodik wurden jeweils die thematischen Fragen in Gruppen bearbeitet, Lösungsansätze skizziert und Ergebnisse anschliessend gemeinsam diskutiert.

Als erste Priorität und direkt beim Projektanfang wurde gemeinsam mit den Wirtschaftspartnern entschieden, ein realitätsnahe Arbeitsmodell annähernd Originalgrösse zu konstruieren. Das Exponat diente als gute Diskussionsbasis bzw. ein gutes Hilfsmittel zur Erarbeitung von Lösungen und zur Bewertung praxisrelevanter Fragen zur Ausführung.

Primäres Ziel der Machbarkeitsstudie war ein Entwurf des Brückenquerschnittes in Holz zu erstellen, welches Anforderungen, die zukunftsweisend gedacht sind, entspricht. Für die Realisierung der Brücke in Längsrichtung wurden folgende Aspekte betrachtet:

- Anforderungen und Profilquerschnitt.
- Entwurf und Evaluierung der Schwerlastbrücke in Längs- bzw. in Querrichtung. Zur Erarbeitung des optimalen Trag- und Verformungsverhaltens in Brückenquer- und -längsrichtung des Hohlkastenquerschnittes wurde ein parametrisiertes Modell erarbeitet.
- Nachweis der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit auf Niveau Vorbemessung.
- Die Anwendung und Wirkungsweise der Vorspanntechnologie in Längsrichtung, Spanngliedführung und Verankerung der Spannglieder.
- Herstellung, Modularisierung und Transport des definierten Brückenquerschnittes.
- Ansatzdiskussion zur Ausbildung von Details, u.a. Fahrbahnaufbau, Schrammbordanschluss, Wasserführung.

Im Ergebnis der Machbarkeitsstudie entstand primär der Entwurf eines Brückenquerschnittes in Holz. Sekundär ist eine Variante in Holz-Beton Verbund mitbetrachtet. Der Entwurf umfasste einen Brückenquerschnitt mit drei Fahrspuren plus Pannenstreifen in Fahrtrichtung.

Die Evaluierung in Längsrichtung hat ein Dreifeldsystem mit durchlaufenden konstanten Brückenquerschnitt und Spannweiten von 40-60-40 Meter gezeigt, welches im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie näher nachgewiesen wurde. Andere statische Systeme in Längsrichtung sind nicht generell auszuschliessen. Bezuglich des Querschnittes wurde die Lösung der Hohlkasten mit geraden Stegen in den inneren und äusseren Bereichen als diejenige, die die meisten Vorteile bezüglich Statik und Ausführbarkeit mit sich bringt, evaluiert.

Ein solches Dreifeldsystem mit einem Hohlkastenquerschnitt wurde zunächst statisch und auf Niveau Vorbemessung analysiert. Die massgebenden Einwirkungen wurden unter Berücksichtigung der gültigen Normen definiert. Mithilfe eines numerischen Modells wurden die maximalen Normal- bzw. Schubspannungen im Hohlkastenquerschnitt ermittelt. Durch Vorbemessungsdiagrammen wurde gezeigt, dass, für realisierbare Abmessungen des Querschnitts, die entwickelten Spannungen sich auf einem zulässigen Niveau befinden. Die Gebrauchstauglichkeit wurde ohne Berücksichtigung von Langzeiteffekten (Ermüdung und Kriechen) und allfälligen Längsstößen nachgewiesen und auf Vorbemessungsniveau als erfüllt beurteilt. Eine Schwingungsanalyse wurde im Rahmen dieser Studie nicht durchgeführt. Das dynamische Verhalten bzw. die Beanspruchung durch Erdbeben waren nicht Bestandteil dieser Machbarkeitsstudie.

Die Anwendung der Vorspanntechnologie mit Spanngliedführung bzw. Anzahl der Litzen wurde rechnerisch geprüft. Der Einfluss der Vorspannung auf die Spannungen bzw. die Verformungen wurde als positiv betrachtet. Zusätzlich ist die Vorspannung bei einem Holztragwerk solcher Wichtigkeit als «second line of defence» zu betrachten und trägt zur Robustheit des Tragsystems bei.

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurden zusammen mit den Wirtschaftspartnern Möglichkeiten bezüglich des Abbunds und Transports der Brückensegmente in den Fokus genommen. Drei Varianten für die Brückenmodularisierung wurden bezüglich verschiedener Aspekte (Herstellung, Transport, Ausführung der Stossstellen usw.) evaluiert. Ein Strassentransport der einzelnen Brückenmodule wurde aus der Sicht der Abmessungen und des Gewichts als möglich beurteilt.

Die wichtigsten Details im Brückentragwerk, wie die Befestigung von Schrammbord, der Fahrbahnaufbau, die Fahrbahnentwässerung, der Fahrbahnübergang sowie der Querstoss zwischen den einzelnen Kastenträgern wurden aus dem Machbarkeitsaspekt kritisch angeschaut und evaluiert. Die Wichtigkeit des Flächenmonitorings und das Vorbeugen sämtlicher Durchdringungen der Abdichtung wurden aufgezeigt. Beim Fahrbahnübergang wurden die integralen Lösungen als bevorzugte Variante aufgezeigt.

Die erreichten Ergebnisse zeigen das Potential von Holz in der Realisierung von Schwerlastbrücken in Längsrichtung auf. Die erarbeiteten Lösungen bzw. Resultate sind in experimentellen Prüffreihen zu bestätigen und im Hinblick auf das Langzeittragverhalten zu evaluieren.

5 Ausblick

Bei der Abschlussitzung des Projekts wurden seitens BFH die erreichten Resultate präsentiert und zusammen mit den Wirtschaftspartnern offene Punkte, die weitere Forschung bedürfen, diskutiert.

Zusammenfassend gibt es Forschungsbedarf in folgenden Gebieten:

- Realisierung des Brandschutzes.
- Bezuglich der Tragsicherheit sind die detaillierte Querschnittsanalyse für kritische Stellen der Einzellasten, die Positionierung von Querschotten usw., sowie der Nachweis des dynamischen Verhaltens, Themen, die genauere Untersuchungen erfordern
- Bezuglich Vorspannung in Längsrichtung sind der Vorspannungsgrad, die Realisierung mit oder ohne Verbund, die Verankerung, die Wirkung auf die Schwingungen bzw. die Ermüdung usw. wichtige Themen, die weitere Forschung verlangen. Die Realisierung von Quervorspannung stellt ein weiteres Forschungsthema dar.
- Bezuglich Modularisierung bzw. Ausführung stellen der Schubverbund der einzelnen Module bzw. der Verbund zwischen Fahrbahnplatte und Modulen eine Herausforderung dar, die Untersuchungsbedarf verlangt.
- Bezuglich der Ausführung der Brückendetails gibt es Themen, wie der Abdichtungsschutz, der Oberflächenschutz, das Integrieren der Schrammbordkonsole im Querschnitt usw., die detaillierte Betrachtungen verlangen. Das Monitoring für die Kontrolle der Feuchte, der Luftzirkulation im Hohlkastenquerschnitt usw. stellt eines der wichtigsten Themen dar, welches evtl. durch ein Pilotprojekt bei einer temporären Brücke, kleinerer Dimension, zu erforschen ist. Festgelegte Inspektionsintervalle sind für ein Tragwerk solcher Masse und Wichtigkeit von erster Priorität und können durch Erfahrungssammlung und Datengewinnung ebenfalls durch beispielsweise ein Pilotprojekt gewonnen werden.
- Die Ökobilanz ist bei jeder weiteren Forschungsarbeit im Blick zu behalten. Eine Bilanz zwischen Holzbedarf / Ressourcenknappheit und die Möglichkeit Holz minderer Qualität zu verwenden ist in jeder Forschungsphase in Frage zu stellen. Der Rückbau und die Instandsetzung der Brücke sind ebenfalls hinsichtlich Ökobilanz zu betrachten.

6 Danksagung an die Projektpartner

Seitens BFH bedanken wir uns herzlich bzw. BAFU und WHFF, die als Fördergeber diese Machbarkeitsstudie finanziert haben.

Ein grosses Dankeschön geht an alle Projektpartner, die mit ihren Beiträgen, diese Machbarkeitsstudie ermöglicht haben (vgl. Abb. 54).

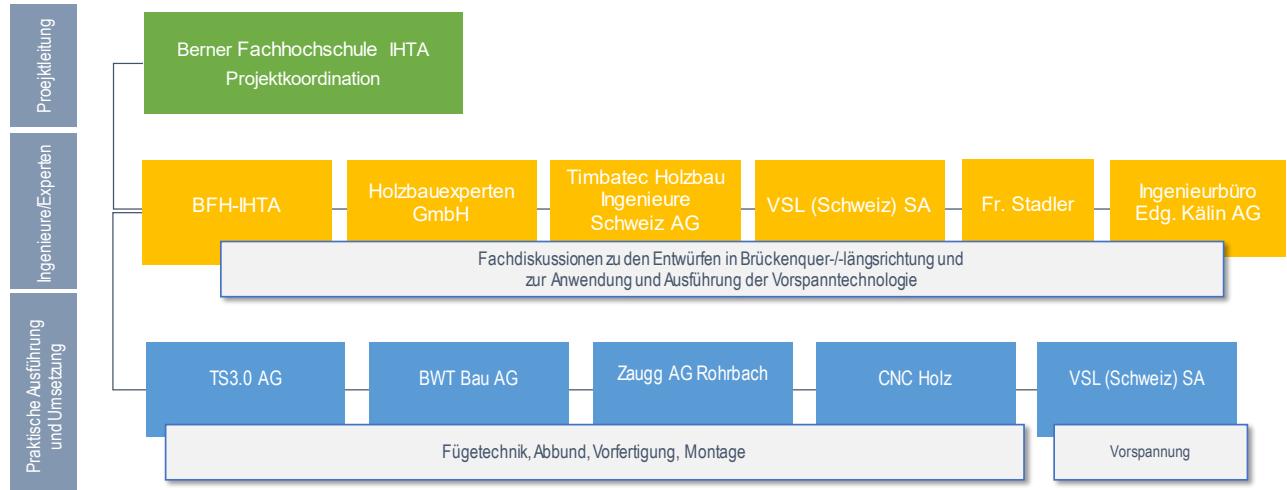


Abb. 54: Organisation des Projektes mit allen Partnern

7 Anhang A

7.1 Einwirkungen - Lastkombinationen

Tabelle 3: Ständige Lasten

Bezeichnung	Anzahl	Länge	Breite	Höhe	Wichte	Eigengewicht	
Obergurt	5	1,0 m	1,75 m	0,30 m	5,0 kN/m ³	13,1 kN/m	>> Automatisch
Steg	6	1,0 m	0,75 m	3,00 m	5,0 kN/m ³	67,5 kN/m	generierte Lasten in
Querschott (Annahme)	20	0,6 m	1,75 m	2,40 m	5,0 kN/m ³	1,8 kN/m	RFEM
Untergurt	5	1,0 m	1,75 m	0,30 m	5,0 kN/m ³	13,1 kN/m	(Tragkonstruktion)
Kappe	2,0	1,0 m	0,20 m	0,20 m	25,0 kN/m ³	2,0 kN/m	
Fahrbahnplatte (UHFB) inkl. Dachprofil (1.5% Steigung)	1	1,0 m	15,50 m	0,15 m	28,0 kN/m ³	85,1 kN/m	>> Auflast auf Tragkonstruktion
Fahrbahnplatte (CLT)	1	1,0 m	16,00 m	0,28 m	5,0 kN/m ³	22,4 kN/m	
				EG Tragstruktur	$g_{k,TS}^*$:	<u>6,2 kN/m²</u>	
				Auflast auf Tragkonstruktion:	$g_{k,Auflast}^*$:	<u>7,1 kN/m²</u>	
				gesamte Flächenlast	$g_{k,tot}^*$:	<u>13,2 kN/m²</u>	
				Auflast auf Tragkonstruktion:	$g_{k,Auflast}^*$:	<u>109,5 kN/m²</u>	
				Linienlast gesamt	$g_{k,tot}^*$:	<u>205,1 kN/m²</u>	

Tabelle 4: Windlasten

Windkraft (y)	$q_{k1} = c_{red} \cdot c_d \cdot c_{fl1} \cdot q_p$	1,07 kN/m ²
Windkraft (z)	$q_{k3} = c_{red} \cdot c_d \cdot c_{fl3} \cdot q_p$	-1,25 kN/m ²

gem. SIA 261 6.1

ze:	50 m	Höhe
GK:	III	[-] Geländekategorie
b:	12,40 m	Fahrbahnbreite
l:	50,0 m	Fahrbahnlänge

gem. SIA 261 6.1ff

z_g :	450 m	Gradientenhöhe
α_r :	0,23	[-] Bodenrauigkeit
q_{po} :	1,30 kN/m ²	Referenzwert Staudruck

c_h :	1,53 kN/m ²	1,6[(z/z_g) ^{αr} + 0,375] ²	Profilbeiwert
q_p :	1,99 kN/m ²	$c_h * q_{p0}$	Staudruck

gem. SIA 261 Anhang C Tab. 63

h_1 :	3,00 m	Höhe VB
h :	2,00 m	Bauwerksabmessung

5,00 m Gesamthöhe

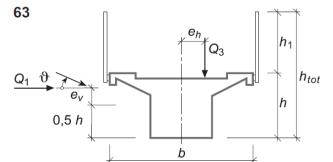
10° Winkel Querneigung

h:b: 0.16 [-]

h*|: 100

h₁ : b 0,24

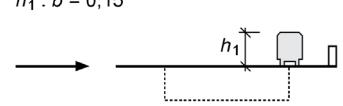
C_d: 1 [-]



C_{red} :	1	[·]	Beiwert für Brücken
C_m :	0,85	[·]	Kraftbeiwert
C_{fl} :	-0,63	[·]	Kraftbeiwert
C_{fl3} :	0,49	[·]	Kraftbeiwert

Windkräfte:

q_{k1} :	<u>1,69 kN/m²</u>	$C_{red} * C_d * C_{fl1} * q_p$	Windkraft (y)
q_{k3} :	<u>-1,25 kN/m²</u>	$C_{red} * C_d * C_{fl3} * q_p$	Windkraft (z)
q_{k3} :	<u>0,98 kN/m²</u>	$C_{red} * C_d * C_{fl3} * q_p$	Windkraft (z)

Umrechnung:

Hohlkastenträger:	3,38 kN/m	Linienlast
h:	2,00 m	Höhe HT

Geländer:	0,60 kN/m	(Linienlast je Geländer)
h:	0,30 m	(gem. SN EN 1991-4 für luftdurchlässige Geländer + Kappe)
Fahrbahnplatte:	0,76 kN/m	Linienlast
h:	0,450 m	(inkl. Kappe)

Verkehrsband:	'2,62 kN/m	Linienlast
h:	1,6 m	2 m - Kappe
b:	3,0 m	Breite FB

<u>Gesamtlast auf HT mit VB:</u>	'6,77 kN/m	Linienlast
$w_{k,mx}$:	6,77 kNm/m	(Moment infolge Exzentrizität bez. auf Trägerachse)
$w_{k,y}$:	3,38 kN/m ²	Flächenlast auf HT
e:	1,0 m	Exzentrizität bez. auf Trägerachse
$h_{ges,VB}$:	4,0 m	Gesamthöhe mit VB

<u>Gesamtlast auf HT ohne VB:</u>	'4,65 kN/m	Linienlast
$w_{k,mx}$:	1,74 kNm/m	(Moment infolge Exzentrizität $e = 1,36$ m bez. auf Trägerachse)
$w_{k,y}$:	2,33 kN/m ²	Flächenlast auf HT
e:	0,38 m	Exzentrizität bez. auf Trägerachse
$h_{ges,ohneVB}$:	2,8 m	Gesamthöhe ohne VB

Da die Resultierende der Windkraft exzentrisch zum Hauptträger angreift, wurde ein Moment in der Trägerachse angesetzt.

Tabelle 5: Lastfälle

LF1	Eigengewicht
LC10	Achslastgruppe mittig Feld 2 an Kappe
LC11	Achslastgruppe mittig Feld 2; 1m von Kappe
LC12	Achslastgruppe mittig Feld 2; 2m von Kappe
LC13	Achslastgruppe direkt über Auflager
LC14	Achslastgruppe direkt vor Auflager
LC20	Verkehrslast auf allen Feldern
LC21	Verkehrslast auf Fahrbahn 1
LC22	Verkehrslast alternierend auf allen Feldern
LC23	Verkehrslast nur auf Feld 2
LC24	Bremslast auf Fahrstreifen 1
LC25	Bremslast auf Fahrstreifen 1
LC30	Wind ohne Verkehrsband
LC31	Wind mit Verkehrsband
LC32	Wind mit Verkehrsband auf Fahrbahn 2

Tab. 6: Massgebende Lastkombinationen

LK1	$1.35*LC1 + 1.5*LC10 + 1.5*LC23 + 1.5*LC24 + 1.5*LC32$	max. Feldmoment / max. Stützmoment / Torsion
LK2:	$1.35*LC1 + 1.5*LC14 + 1.5*LC20 + 1.5*LC24 + 1.5*LC31$	max. Querkraft
LK3:	$1.35*LC1 + 1.5*LC13 + 1.5*LC20 + 1.5*LC24 + 1.5*LC32$	max. Auflagerpressung

Tab. 7: Schnittgrößen für die Ergebnisumhüllenden aus Stabwerksprogramm

Ergebnisumhüllende	max. Stützmoment	max. Feldmoment	max. Querkraft	max. Torsionsmoment
	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kNm]
Global	116'550	106'300	14'160	13'760
Kastenquerschnitt	33'420	32'300	66'960	2'140
Rand-Steg	12'340	11'050	2'250	193
Innen-Steg	6'070	5'120	1'330	118

8 Literaturverzeichnis

- Bachofner, R., Conzett, J. (2013) Brücken in Holz: Möglichkeiten und Grenzen, Forschungsprojekt AGB 2003/012, Bundesamt für Strassen, Schweiz
- Engesser C., Schläpfer D., Schnyder C., Kessler P., Spalinger M., Bieler J. (2022) Auszug aus den Vor-konzepten «Entwurf Brücke Saanenmöser», Projektarbeit im BSc Holztechnik, Berner Fach-hochschule
- DIN 1052:2008, Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken, Deutsche Institut für Normung e.V., Berlin, Deutschland.
- DIN 68800:2019 Holzschutz, DIN-Normenausschuss Holzwirtschaft und Möbel (NHM) & DIN Normen-ausschuss Bauwesen (NABau), Berlin, Deutschland.
- Kleinhanß, K. (2015) Qualitätsgemeinschaft Holzbrückenbau, <http://www.holzbrueckenbau.com/de/holzbrueckenbau/bemessung/>
- Lignitec 1/1995, Holzschutz im Bauwesen EMPA/Lignum-Richtlinie, Lignum Holzwirtschaft Schweiz, Zürich, Schweiz.
- Miebach F., Osterloff L. (2019) Entwurf von Holzbrücken, Informationsdienst Holz, holzbau handbuch. Reihe 1 Teil 9 Folge 1, Februar 2019
- Rili ASTRA 11001:2021 V3.00, Richtlinie Normalprofile Nationalstrassen 1. Und 2. Klasse mit Rich-tungstrennung, Bundesamt für Strassen ASTRA
- SIA 260:2013, Grundlagen der Projektierung von Tragwerken, Schweizerische Ingenieur- und Archi-tektenverein, Zürich, Schweiz.
- SIA 261:2020 Einwirkungen auf Tragwerke, Schweizerische Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, Schweiz.
- SIA 261/1:2020 Einwirkungen auf Tragwerke – Ergänzende Festlegungen, Schweizerische Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, Schweiz.
- Simon, A.; Jahreis, M. G.; Koch, J.; Arndt, R. W. (2020a): „Moderne Holzbrücken planen, bauen, erhalten – Teil 1: Bauwerksentwurf“, Bautechnik, Jg. 97, S. 85–91, DOI: 10.1002/bate.201900047
- Simon, A.; Koch, J.; Jahreis, M. G.; Arndt, R. W. (2020b): „Moderne Holzbrücken planen, bauen, erhalten – Teil 2: Bauausführung und Erhaltung“, Bautechnik, Jg. 97, S. 92–99, DOI: 10.1002/bate.201900048
- Simon, A.; Jahreis, M.; Koch, J., Arndt, R. W. (2019): Musterzeichnungen für Holzbrücken. Informati-onsdienst Holz, holzbau handbuch. Reihe 1 Teil 9 Folge 3, Februar 2019
- Simon, A.; Arndt, R. W.; Jahreis, M. G.; Koch, J.: Hinweise zum Entwurf von Holzbrücken, Forschungs-projekt ProTimB, Fachhochschule Erfurt, 2019.
- Simon, A.; Arndt, R. W.; Jahreis, M. G.; Koch, J.: Muster-Prüfhandbuch für Holzbrücken, Forschungs-projekt ProTimB, Fachhochschule Erfurt, 2019.
- Simon, A.; Arndt, R. W.; Jahreis, M. G.; Koch, J.: Muster-Wartungshandbuch für Holzbrücken, For-schungsprojekt ProTimB, Fachhochschule Erfurt, 2019.
- SN EN 1995-1-1:2004, Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General and rules for build-ings. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, Schweiz.
- Ladon, X.: Der Einfluss von Längsvorspannung auf Schwerlastbrücken aus Holz, Projektarbeit, Berner Fachhochschule, Oktober 2022