

Dissertation

Zum Trag- und Verformungsverhalten neuartiger Vollholz-Beton-Verbunddecken mit kombinierten Schubverbindern

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads
Doktor der technischen Wissenschaften
eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

PhD Thesis

Load-bearing and deflection behavior of novel solid wood-concrete-composite floors with combined shear connectors

submitted in satisfaction of the requirements for the degree
Doctor of Science in Civil Engineering
of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

Dipl.-Ing. **Alex Müllner**, BSc

Matr.Nr.: 1026339

- Betreuung: Associate Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Alireza Fadai**
Institut für Architekturwissenschaften
Forschungsbereich Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/259-02, 1040 Wien, Österreich
- Begutachtung: Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. BSc **Benjamin Kromoser**
Institut für Hochbau, Holzbau und kreislaufgerechtes Bauen
Universität für Bodenkultur Wien
Peter-Jordan-Straße 82, 1190 Wien, Österreich
- Begutachtung: Prof. Dr.-Ing. habil. **Jörg Schänzlin**
Institut für Holzbau
Hochschule Biberach
Karlstraße 8, 88400 Biberach, Deutschland

Wien, im März 2025

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner mehrjährigen Tätigkeit als Universitätsassistent am Forschungsbereich Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau im Zuge des Auftragsforschungsprojekts *Timber Hybrid 2.0 - Entwicklung von Vollholz Hybriddecken*. Wie aus diesem Umstand heraus vielleicht erkannt werden kann, bzw. wie so manch einer sich generell denken kann, stellt das Verfassen einer solchen Arbeit hierbei demgemäß ein entsprechend langwieriges Prozedere mit vielen Höhen und Tiefen dar, die vorhandene Unterstützung von außen ist demnach umso wichtiger. In diesem Sinne ist die Liste an Menschen denen hierfür Dank gebührt grundsätzlich lang und wurde mit der Zeit darüber hinaus auch immer länger, falls in der folgenden Auflistung demnach irgendjemand vergessen wurde, bitte ich das demgemäß zu entschuldigen.

Speziellen Dank möchte ich an erster Stelle natürlich meinem Betreuer und Doktorvater Prof. Alireza Fadai aussprechen, nachdem er mich für diese Arbeit motiviert, und mich im Zuge der Erstellung von ebendieser auch immer bestmöglich unterstützt hat. Größter Dank gebührt in diesem Sinne entsprechend auch dem Projektinitiator des genannten Auftragsforschungsprojekts Klaus Engelhart, der nicht nur die der Forschungsarbeit zugrundeliegende Konzeptidee konkret formuliert, sondern das gesamte Projekt auch demgemäß finanziell unterstützt hat.

Darüber hinaus ebenso großer Dank gebührt darüber hinweg gleichermaßen meinen weiteren Institutsangehörigen, wobei ich hier im Besonderen Prof. Peter Bauer hervorheben möchte, der die Rahmenbedingungen dieser Arbeit in für mich idealer Weise gesetzt hat und mir auch immer mit einem offenen Ohr zur Seite stand. Besonders bedanken möchte ich mich überdies hinweg auch bei unseren ehemaligen StudienassistentInnen und DiplomandInnen Maximilian Stehmer, Marie-Theres Brunauer und Pol Weiler die im Speziellen die experimentellen Untersuchungen maßgeblich unterstützt und somit wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Gebührender Dank gilt darüber hinaus auch Christoph Hackspiel und dem gesamten Team der Camillo Sitte Versuchsanstalt, ohne die die Abwicklung der experimentellen Untersuchungen nicht möglich gewesen wäre, sowie sei in diesem Sinne auch Klaus Schober, Sylvia Polleres und dem beteiligten Team der Holzforschung Austria gedankt, als diese ebenso eine wesentliche Stütze bei der Durchführung der experimentellen Untersuchungen darstellten.

Nicht zuletzt bedanken möchte ich mich darüber hinaus natürlich auch bei meiner Familie und meinen Freunden, die mir während der gesamten Arbeit nicht nur aufbauend zur Seite standen, sondern teilweise überdies hinweg auch bei der tatsächlichen Projektarbeit tatkräftig mitwirkten. Und an abschließender Stelle gebührt natürlich größter Dank meiner Freundin Sandra, welche nicht nur immer für die nötige Zuversicht gesorgt, sondern mir auf diesem langen Weg auch immer wieder die nötige Kraft gegeben hat.

Kurzfassung

Diese Dissertation befasst sich mit dem Trag- und Verformungsverhalten eines neuartigen Vollholz-Beton-Verbunddeckensystems unter dem expliziten Einsatz von dabei in kombinierter Form applizierten, typologisch divergenten Schubverbindern, wobei sich diese im näheren Detail hierbei einerseits als linienförmige ballistisch vernagelte Puzzle Strip Schubleche, sowie andererseits als punktuelle ausgerundete Kerven ohne zusätzliche mechanische Verbindungsmittel zur Abhebesicherung definieren. Wesentliches Ziel der Arbeit soll es dabei sein, das genannte systemcharakteristische Trag- und Verformungsverhalten der Verbundstruktur unter der Berücksichtigung von sowohl Kurz-, als auch Langzeiteinflüssen zu identifizieren, weiterführend zu evaluieren und darüber hinaus im Kontext einer gegebenen Normungslage überdies zu beurteilen bzw. ebendiese in ihrem aktuellen Entwicklungsprozess gleichermaßen zu unterstützen.

Hierzu werden zu Beginn kontextuell repräsentative bzw. ebenso artverwandte Schubverbindersysteme mit Hinblick auf ihre strukturelevanten Charakteristiken entsprechend analysiert und daraus maßgebliche projektrelevante Systemeigenschaften, sowie demgemäß damit in Verbindung stehende Randbedingungen abgeleitet. Basierend auf diesen einleitend dargebrachten Forschungsinhalten, können nächst notwendigen konzeptbedingten Voruntersuchungen schlussfolgernd die maßgeblichen Hauptuntersuchungen durchgeführt werden, wobei sich diese, neben allgemeinen experimentellen materialkundlichen Untersuchungen an den Verbundkomponenten Holz und Beton, hierbei im näheren Detail durch entsprechende experimentelle, sowie auch analytische und numerische Untersuchungen zum expliziten Verbundverhalten der maßgeblichen Tragstruktur auf demgemäß zeitlich, als darüber hinweg auch maßstäblich multiplen Skalenebenen darstellen.

Auf Grundlage dieser Untersuchungen wird es folglich nicht nur möglich detaillierte Aussagen zum generellen Trag- und Verformungsverhalten des repräsentativen Struktursystems zu geben, sondern ebendieses gleichermaßen auf Basis kontextuell relevanter mechanischer Entitäten weiterführend zu beschreiben, sowie auch zu bewerten. Überdies können die Forschungsergebnisse im Sinne einer demgemäßen komparativen Beurteilung literarischen und normativen Vergleichsbetrachtungen zugeführt und folglich entsprechend eingeordnet werden. In diesem Sinne zeigen sich die Untersuchungsergebnisse im Kontext einer komparativen literarischen Betrachtung durch einen grundsätzlich verifizierenden Charakter bestimmt, eine strukturelle Einordnung des untersuchten Verbunddeckensystems wird demnach schlussfolgernd möglich. Auch mit darüber hinaus vorliegendem Hinblick auf eine normative Vergleichsbetrachtung der vorliegenden Untersuchungsergebnisse resultieren aus dieser repräsentativ maßgebende Schlussfolgerungen, welche zu größten Teilen zu einer demgemäßen Verifikation der jeweils gegebenen normativen Zusammenhänge führen, ebendiese teilweise aber zeitgleich auch in entsprechend berichtiger Form darstellen.

Abstract

This dissertation deals with the load-bearing and deflection behavior of a novel solid wood-concrete-composite floor system under the explicit use of typologically divergent operating shear connectors applied in a combined form, whereby, defined in a more detailed way, they can be described as linear ballistically nailed puzzle strip shear plates on the one hand, as well as punctual rounded notches without additional mechanical fasteners for lift-off protection on the other hand. The main objective of the work thereby is to identify and furthermore to evaluate the aforementioned system-characteristic load-bearing and deflection behaviour of the composite structure, taking into account both short-term and long-term influences, and, moreover, to assess it in the context of a given standardization concept as well as to support this standardization concept in its current development process.

For this purpose, at the beginning, contextually representative or similar shear connector systems are analyzed with regard to their structurally relevant characteristics and furthermore decisive project-relevant system properties as well as associated boundary conditions are derived thereof. Based on these introductory research contents, and next to necessary concept-related preliminary explorations, the associated main investigations can be carried out, whereby, in addition to general experimental material related investigations on the composite components wood and concrete, these can be described by corresponding experimental, as well as analytical and numerical investigations on the explicit composite behavior of the relevant load-bearing structure on multiple scale levels, both in terms of time and size.

On the basis of these investigations, it is therefore not only possible to make detailed statements on the general load-bearing and deflection behavior of the representative structural system, but also to describe and evaluate it further on the basis of contextually relevant mechanical entities. In addition, the research results can be used for literary and normative comparative considerations in the sense of an appropriate comparative assessment as well as an related classification. In this sense, the research results in the context of a comparative literary consideration are determined by a fundamentally verifying character; a structural classification of the investigated composite system becomes therefore possible as a conclusion. Moreover, when normatively comparing the findings of this study, the results yield representative conclusions. These predominantly confirm the respective normative relationships, while in some cases also offering corrective perspectives.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	13
1 Einleitung	20
1.1 Motivation und Zielsetzung	20
1.2 Methodik und Aufbau	21
2 Konzeptidee und Eigenschaften des untersuchten Verbunddeckensystems	25
2.1 Struktureller Aufbau	25
2.2 Maßgebende Eigenschaften der einzelnen Strukturkomponenten	27
2.2.1 Hölzerne Basisschicht	28
2.2.2 Aufgebrachte Aufbetonschicht	28
2.2.3 Applizierte Schubverbinder	29
3 Stand der Forschung und Entwicklung	33
3.1 Allgemeiner Überblick zu Schubverbindersystemen	33
3.2 Idealisierter Trag- und Verformungsverhalten einer Schubverbindung	37
3.2.1 Tragfähigkeit und Steifigkeit einer Verbindung	38
3.2.2 Duktilität einer Verbindung	41
3.3 Auftretende Schädigungs- und Versagensmechanismen	43
3.3.1 Punktförmige Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln	44
3.3.2 Linienförmige Verbindungen mit Schublechen und stiftförmigen Verbindungsmitteln	45
3.3.3 Punktförmige Verbindungen mit Kerfen und eventuell vorhandenen stiftförmigen Verbindungsmitteln	47
3.4 Systemrelevante Ausführungsvarianten	49
3.4.1 Stiftförmige glattschaftige/profilierete VM - 90°	51
3.4.2 Stiftförmige geschraubte VM - 90°	53
3.4.3 Stiftförmige geschraubte VM - 45°	55
3.4.4 Nagelplatten	57
3.4.5 Schubleche mit geschraubten VM - 90°	59
3.4.6 Kerfen ohne VM spröde	61
3.4.7 Kerfen ohne VM duktil	63
3.4.8 Kerfen mit stiftförmigen geschraubten VM - 90°	65
3.4.9 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen aus den Versuchsergebnissen	67
4 Voruntersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung	71
4.1 Auswahl eines geeigneten stiftförmigen Verbindungsmittels	71
4.1.1 Versuchskonzeption der vorauswertenden Slip Block Bruchversuche	72
4.1.2 Versuchsergebnisse der vorauswertenden Slip Block Bruchversuche .	73

4.2	Weiterführende Eigenschaften des gewählten stiftförmigen Verbindungsmittels	76
4.2.1	Versuchskonzeption der Slip Block Bruchversuche	76
4.2.2	Versuchsergebnisse der Slip Block Bruchversuche	77
5	Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung	81
5.1	Umfang und Aufbau der Untersuchungen	81
5.2	Untersuchungen an Materialprobekörpern	83
5.2.1	Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Betonproben	83
5.2.2	Untersuchungen an großmaßstäblichen Holzproben	86
5.3	Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern	88
5.3.1	Versuchskonzeption und normative Grundlagen	88
5.3.2	Darstellung der Versuchsergebnisse	92
5.3.3	Interpretation der Versuchsergebnisse	95
5.4	Untersuchungen an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern	99
5.4.1	Versuchskonzeption und normative Grundlagen	100
5.4.2	Darstellung der Versuchsergebnisse	104
5.4.3	Interpretation der Versuchsergebnisse	108
5.5	Numerische Untersuchungen	113
5.5.1	Numerische Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern	113
5.5.2	Numerische Untersuchungen an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern	126
5.5.3	Zusammenfassung der numerischen Untersuchungsergebnisse	142
6	Untersuchungen unter Langzeitbeanspruchung	145
6.1	Umfang und Aufbau der Untersuchungen	145
6.2	Untersuchungen an Materialprobekörpern	147
6.2.1	Versuchskonzeption und normative Grundlagen	147
6.2.2	Darstellung und Interpretation der Versuchsergebnisse	148
6.3	Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern	149
6.3.1	Dauerlastversuche	150
6.3.2	Bruchversuche	161
6.4	Untersuchungen an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern	172
6.4.1	Dauerlastversuche	173
6.4.2	Bruchversuche	186
7	Vergleichsbetrachtungen der Versuchsergebnisse	199
7.1	Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern	199
7.1.1	Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern	199
7.1.2	Dauerlastversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern	207
7.2	Untersuchungen an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern	210
7.2.1	Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern	210
7.2.2	Dauerlastversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern	219
8	Zusammenfassung und Ausblick	229

Quellenverzeichnis	235
Abbildungsverzeichnis	239
A Anhang Stand der Forschung und Entwicklung	251
B Anhang Voruntersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung	255
C Anhang Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung	257
D Anhang Untersuchungen unter Langzeitbeanspruchung	267
E Anhang Vergleichsbetrachtungen der Versuchsergebnisse	273

Symbolverzeichnis

Abkürzungen

HBV	Holz-Beton-Verbund
VM	Verbindungs mittel
BSH	Brettschichtholz
BST	Brettstapelholz
FSH	Furnierschichtholz
ULS	Grenzzustand der Tragfähigkeit (Ultimate limit state)
SLS	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (Serviceability limit state)

Variablen und Indizes

a	Jahre
a	Abstand der Schwerpunkte der beiden Einzelquerschnitte Holz und Beton
a_{Beton}	Abstand des Schwerpunkts des Betonquerschnitts zur Verbundfuge
a_{Holz}	Abstand des Schwerpunkts des Holzquerschnitts zur Verbundfuge
b	Breite, Einflussbreite
b_n	Kerfenbreite
c	Fugensteifigkeit
$C_p(t)$	Lastkoeffizient zur Berücksichtigung des Schwindens des Betons zum Zeitpunkt t
CV	Variationskoeffizient
d	Tage
d	Verbindungsmitteldurchmesser

d_n	Kervendurchmesser
D_s	Duktilitätsmaß
$D_{s,mean}$	Mittelwert des Duktilitätsmaßes
E	Elastizitätsmodul
E_0	lokaler Biege-Elastizitätsmodul des Holzes
$E_{0,mean}$	Mittelwert des lokalen Biege-Elastizitätsmoduls des Holzes
E_{Beton}	Elastizitätsmodul des Betons
$E_{Beton}(t)$	Elastizitätsmodul des Betons zum Zeitpunkt t
$E_{Bewehrung}$	Elastizitätsmodul der Bewehrung
E_d	Bemessungswert der Auswirkungen von Einwirkungen der ständigen und veränderlichen Lastkombination
$E_{d,qs}$	Bemessungswert der Auswirkungen von Einwirkungen der quasi-ständigen Lastkombination
E_{Holz}	Elastizitätsmodul des Holzes
$E_{Holz}(t)$	Elastizitätsmodul des Holzes zum Zeitpunkt t
E_L	Elastizitätsmodul des Holzes in longitudinaler Richtung
E_{PSS}	Elastizitätsmodul des Puzzle Strip Schublechs
E_R	Elastizitätsmodul des Holzes in radialer Richtung
E_T	Elastizitätsmodul des Holzes in tangentialer Richtung
E_{VM}	Elastizitätsmodul der ballistischen Glattschaftsnägel
EA_{Beton}	Dehnsteifigkeit des Betons
$EA_{Beton}(t)$	Dehnsteifigkeit des Betons zum Zeitpunkt t
EA_{Holz}	Dehnsteifigkeit des Holzes
$EA_{Holz}(t)$	Dehnsteifigkeit des Holzes zum Zeitpunkt t
EI_{Beton}	Biegesteifigkeit des Betons
EI_{eff}	effektive Biegesteifigkeit
EI_{Holz}	Biegesteifigkeit des Holzes
EI_{VM}^*	Ersatzbiegesteifigkeit der Verbindungsstäbe der Modellbildung nach <i>Rautenstrauch</i>
f	Funktion, Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, Verhältnis von biaxialer und uniaxialer Druckfließspannung
f_c	Druckfestigkeit des Betons

$f_c(t)$	Druckfestigkeit des Betons zum Zeitpunkt t
f_{ck}	charakteristische Druckfestigkeit des Betons
f_{cm}	Mittelwert der Druckfestigkeit des Betons
$f_{cm}(t)$	Mittelwert der Druckfestigkeit des Betons zum Zeitpunkt t
f_{ctm}	Mittelwert der Zugfestigkeit des Betons
$f_{c,0,k}$	Druckfestigkeit des Holzes in Faserrichtung
$f_{c,90,k}$	Druckfestigkeit des Holzes quer zur Faserrichtung
$f_{h,1}$	Lochleibungsfestigkeit Bauteil 1 (Holz)
$f_{m,k}$	Biegezugfestigkeit des Holzes
$f_{t,0,k}$	Zugfestigkeit des Holzes in Faserrichtung
$f_{t,90,k}$	Zugfestigkeit des Holzes quer zur Faserrichtung
$f_{R,k}$	Rollschubfestigkeit des Holzes
f_u	Zugfestigkeit des Metalls
$f_{v,k}$	Schubfestigkeit des Holzes
f_y	Streckgrenze des Metalls
F	Last, Einwirkung (punktförmig)
$F_{ax,R}$	Ausziehwiderstand des Verbindungsmittels
F_{est}	geschätzte Höchstlast
F_{max}	Höchstlast
$F_{max,mean}$	Mittelwert der Höchstlast
F_u	Bruchlast
F_{vR}	Schubtragfähigkeit
$F_{vR,k}$	charakteristische Schubtragfähigkeit
$F_{vR,mean}$	Mittelwert der Schubtragfähigkeit
F_y	Fließlast
g_k	charakteristische ständige Einwirkung
G_{LR}	Schubmodul des Holzes in der longitudinal-radialen Ebene
G_{LT}	Schubmodul des Holzes in der longitudinal-tangentialen Ebene
G_{RT}	Schubmodul des Holzes in der radial-tangentialen Ebene
$G\tilde{A}_{Beton}$	Schubsteifigkeit des Betons
$G\tilde{A}_{Holz}$	Schubsteifigkeit des Holzes
h	Höhe

h_{Beton}	Höhe des Betonquerschnitts
h_{Holz}	Höhe des Holzquerschnitts
h_n	Kerventiefe
k	Steigung, Federsteifigkeit
k_{mean}	Mittelwert der Steigung
k_{cr}	Rissfaktor
k_{def}	Verformungsbeiwert des Holzes
k_{def}'	Verformungsbeiwert der Schubverbindung
K	Verhältnis der zweiten Spannungsinvarianten des Zugmeridians zu der des Druckmeridians
K_i	Anfangsverschiebungsmodul der Gebrauchstauglichkeit
K_{ser}	Verschiebungsmodul der Gebrauchstauglichkeit
$K_{ser}(t)$	Verschiebungsmodul der Gebrauchstauglichkeit zum Zeitpunkt t
$K_{ser,mean}$	mittlerer Verschiebungsmodul der Gebrauchstauglichkeit
K_u	Verschiebungsmodul der Tragfähigkeit
l	Spannweite
l_b	Einbindetiefe
l_n	Kervlänge
l_s	Zwischenholzlänge der Kerne bzw. des Verbindungsmittels
l_v	Vorholzlänge der Kerne bzw. des Verbindungsmittels
L	Bauteillänge
$M_{y,R}$	Fließmoment des Verbindungsmittels
p	Last, Einwirkung (flächenförmig)
$p_{s,Beton}(t)$	fiktive Ersatzlast zur Berücksichtigung des Schwindens des Betons zum Zeitpunkt t
q_k	charakteristische veränderliche Einwirkung
R_{ij}	Spannungsverhältnis des Fließkriteriums nach <i>Hill</i> in der i - j Ebene
RH	Relative Luftfeuchtigkeit
s	Verbindungsmittelabstand
s_{eff}	effektiver Verbindungsmittelabstand
s_{max}	maximaler Verbindungsmittelabstand
s_{min}	minimaler Verbindungsmittelabstand

t	Zeit(punkt), Betonalter
t_1	Höhe des Querschnittsteils 1
t_2	Höhe des Querschnittsteils 2
T	Temperatur
u	Verschiebung, Holzfeuchte
u_{01}	Verschiebung bei Zykluspunkt 01
u_{04}	Verschiebung bei Zykluspunkt 04
$u_{0.6}$	Verschiebung bei 60% F_{est}
u_h	horizontale Verschiebung
$u_{h,li}$	horizontale Verschiebung links
$u_{h,re}$	horizontale Verschiebung rechts
u_i	Anfangsverschiebung
$u_{i,mod}$	modifizierte Anfangsverschiebung
u_u	maximal erreichbare Grenzverschiebung
u_v	vertikale Verschiebung
$u_v(t)$	vertikale Verschiebung zum Zeitpunkt t
$u_{v,el}$	elastische vertikale Verschiebung
$u_{v,gr}$	vertikale Verschiebung aufgrund von Grundkriechen
$u_{v,ms}$	vertikale Verschiebung aufgrund von mechanosoprtivem Kriechen
$u_{v,l/2mi}$	vertikale Verschiebung mittig bei $l/2$ (in Feldmitte)
$u_{v,l/3li}$	vertikale Verschiebung links bei $l/3$ (im Felddrittel)
$u_{v,l/3re}$	vertikale Verschiebung rechts bei $l/3$ (im Felddrittel)
u_{vR}	Verschiebung bei F_{vR}
u_y	Fließverschiebung
v	Viskositätsparameter
x	Variable, Zufallsvariable
x_1	Erste Koordinate des kartesischen Koordinatensystems
x_2	Zweite Koordinate des kartesischen Koordinatensystems
x_3	Dritte Koordinate des kartesischen Koordinatensystems
α_n	Flankenneigung der Kerne
γ	Abminderungsfaktor der Steineranteile des γ -Verfahrens
γ_g	Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen

γ_q	Teilsicherheitsbeiwert für veränderliche Einwirkungen
δ	Abminderungsfaktor der Dehnsteifigkeit des γ -Verfahrens
Δu	Holzfeuchtegradient
ε	Dehnung, Exzentrizität der plastischen Potentialfläche
$\varepsilon_{pl,ij}$	plastische Dehnung in der i - j Ebene
$\varepsilon_{s,Beton}$	Schwinddehnung des Betons
μ	Mittelwert, Reibungskoeffizient
ν_{Beton}	Poissonzahl des Betons
$\nu_{Bewehrung}$	Poissonzahl der Bewehrung
ν_{LR}	Poissonzahl des Holzes in der longitudinal-radialen Ebene
ν_{LT}	Poissonzahl des Holzes in der longitudinal-tangentialen Ebene
ν_{PSS}	Poissonzahl des Puzzle Strip Schublechs
ν_{RT}	Poissonzahl des Holzes in der radial-tangentialen Ebene
ν_{VM}	Poissonzahl der ballistischen Glattschaftnägel
ρ	Rohdichte
ρ_k	charakteristische Rohdichte
ρ_{mean}	mittlere Rohdichte
σ	Spannung, Standardabweichung
σ_{ij}	Normalspannung in der i - j Ebene
$\sigma_{ij,max}$	Maximum der Normalspannung in der i - j Ebene
$\sigma_{ij,min}$	Minimum der Normalspannung in der i - j Ebene
$\sigma_{v,M}$	von Mises Vergleichsspannung
τ_{ij}	Schubspannung in der i - j Ebene
φ	Kriechzahl am Ende des Lebenszyklus (Dauer 50 Jahre)
$\varphi(t)$	Kriechzahl zum Zeitpunkt t
φ_{Beton}	Endkriechzahl des Betons
φ_{gr}	Grundkriechzahl am Ende des Lebenszyklus (Dauer 50 Jahre)
$\varphi_{gr}(t)$	Grundkriechzahl zum Zeitpunkt t
φ_{ms}	mechanosorptive Kriechzahl am Ende des Lebenszyklus (Dauer 50 Jahre)
$\varphi_{ms}(t)$	mechanosorptive Kriechzahl zum Zeitpunkt t
Θ_n	Druckstrebenwinkel der Kerne
ψ	Dilationswinkel

Ψ_0	Kombinationsbeiwert einer veränderlichen Einwirkung
Ψ_2	Kombinationsbeiwert für den quasi-ständigen Wert einer veränderlichen Einwirkung
$\Psi_{\text{Beton}}(t)$	Koeffizient für die Berücksichtigung der Auswirkung der Verbundwirkungen auf die Kriechzahl des Betons zum Zeitpunkt t
$\Psi_{\text{Holz}}(t)$	Koeffizient für die Berücksichtigung der Auswirkung der Verbundwirkungen auf den Verformungsbeiwert des Holzes zum Zeitpunkt t
$\Psi_{VM}(t)$	Koeffizient des Verformungsbeiwerts der Schubverbindung zum Zeitpunkt t

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung

Der moderne Ingenieurholzbau kennzeichnet sich zunehmend durch den Einsatz optimierter Struktur- und Materialkombinationen zur Steigerung der technischen, als auch der ökonomischen, Leistungsfähigkeit. Eine wesentliche Möglichkeit stellt hierbei der Einsatz von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen für unterschiedliche Formen von Tragstrukturen dar. Speziell die Applikation von hybriden Konstruktionen in Form von Verbunddeckensystemen für den Einsatz in Hochbauten und deren technische und normative Charakterisierung kann als maßgebender aktueller Forschungs- und Entwicklungsansatz festgehalten werden [1, 2, 3].

In Abhängigkeit der jeweiligen strukturellen Eigenschaften der einzelnen Verbundkomponenten, sowie der dabei angewendeten Schubverbindersysteme, liegt für diese Form von Tragstruktur ebenfalls ein bis zum heutigen Zeitpunkt bereits breites Spektrum an ausführungsrelevanten Konstruktionstypologien vor. Die dabei angewendeten Schubverbindersysteme reichen grundsätzlich von mechanischen formschlüssigen, über mechanische form- und kraftschlüssige, bis hin zu stoffschlüssigen Verbindungen, wobei in der Regel nur einzelne, für sich alleinstehende, Formen von Verbundsystemen appliziert werden. Im Zuge dieser Arbeit soll demgegenüber eine adaptierte Form von Holz-Beton-Verbunddecken mit einem neuartigen Strukturaufbau und einer kombinierten Assemblierung von typologisch unterschiedlichen Schubverbindern vorgestellt, und hinsichtlich ihres Trag- und Verformungsverhaltens untersucht und weiterführend beurteilt bzw. abgesichert werden. Bei dieser genannten Tragstruktur handelt es sich um ein im Zuge des Auftragsforschungsprojekts *Timber Hybrid 2.0 - Entwicklung von Vollholz Hybriddecken* entwickeltes, und durch den Auftraggeber patentiertes [4], Verbunddeckensystem auf Vollholzbasis mit kombinierten Schubverbindern in Form von linienförmigen ballistisch vernagelten Puzzle Strip Schublechen und punktuellen ausgerundeten Kerven ohne zusätzliche mechanische Verbindungsmittel zur Abhebesicherung.

Der gesamtheitliche Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit definiert sich hierbei dadurch, das systemindividuelle Trag- und Verformungsverhalten des neuartigen Verbunddeckensystems unter der Berücksichtigung von sowohl Kurz-, als auch Langzeiteinflüssen, auf Basis von klein- und großmaßstäblichen experimentellen, sowie analytischen und numerischen Untersuchungen zu identifizieren und weiterführend zu evaluieren. Wesentliche Untersuchungsziele sollen dabei sein, einerseits die alleinstehenden, als auch die

kombinierten Eigenschaften bzw. die Interaktionsmechanismen der beschriebenen einzelnen Schubverbindersysteme und ihrer Verbundpartner Holz und Beton auf unterschiedlichen Skalenebenen zu detektieren und anhand von mechanischen Kenngrößen zu quantifizieren, sowie andererseits diese auch im Kontext einer gegebenen Normungslage zu beurteilen und ebendiese darüber hinaus in ihrem aktuellen Entwicklungsprozess gleichermaßen zu unterstützen.

Als maßgebende Eigenschaften bzw. mechanische Kenngrößen können, unter Berücksichtigung der jeweils betrachteten Skalenebene, in diesem Zusammenhang kontextuelle Parameter wie quantitative Last-Verschiebungs-Zusammenhänge und daraus resultierende Verbindungssteifigkeiten (Verschiebungsmoduln) und -duktilitäten bzw. quantitative Trag- und Bruchlastniveaus und folglich Traglastreserven, sowie auch qualitative Versagensmechanismen auf den jeweiligen Lastniveaus genannt werden.

Darüber hinaus wird das auf Basis dieser mechanischen Entitäten beschriebene Trag-, wie gleichermaßen das allgemeine Verformungsverhalten, wesentlich durch material- bzw. strukturbedingte Langzeiteffekte, resultierend aus umgebungsbedingten klimatischen Randbedingungen und vorhandener Systembelastung, beeinflusst. Als weiterer wesentlicher Untersuchungsgegenstand deklariert sich demnach ebenfalls, die Auswirkungen dieser genannten Effekte qualitativ und quantitativ, auf wiederum klein- und großmaßstäblicher Skalenebene, für die vorgestellte Verbundstruktur zu detektieren und zu beschreiben, wobei der allgemeine Fokus hierbei auf grundsätzlich zwei maßgebende Aspekte gelegt wird.

So sollen die Auswirkungen der genannten Langzeiteffekte sowohl einerseits auf das allgemeine Verformungsverhalten der Verbundstruktur bzw. der applizierten Schubverbinder, als andererseits auch auf die bereits genannten mechanischen Entitäten, quantifiziert und bewertet werden. Auf Basis dieser Untersuchungen wird es demnach möglich, nicht nur qualitative und quantitative Aussagen und Schlussfolgerungen zu den allgemeinen und systemindividuellen verformungsrelevanten Eigenschaften durch genannte Langzeiteffekte zu generieren, sondern gleichermaßen auch die Auswirkungen ebendieser auf tragfähigkeitsrelevante mechanische Parameter in Relation zu setzen bzw. diese weiterführend in einem bemessungsrelevanten Kontext abzusichern.

1.2 Methodik und Aufbau

Im Kontext eines methodisch vollumfänglichen Aufbaus kann der allgemeine Untersuchungsgegenstand in die drei maßgeblichen Teilbereiche *allgemeine Systemcharakterisierung*, *experimentelle Systemidentifikation*, sowie *analytische und numerische Systemevaluation*, chronologisch gegliedert werden. So soll auf Basis dieses Konzepts einleitend eine allgemeine Systemcharakterisierung der untersuchten Tragstruktur zur kontextuellen und normativen Einordnung der Strukturtypologie, sowie zur Detektion notwendiger Rahmenbedingungen in den Untersuchungen, erfolgen. Darauf aufbauend werden weiterführend umfassende experimentelle Untersuchungen zur Beschreibung des Trag- und Verformungsverhaltens durchgeführt und anhand von analytischen und numerischen Methoden validiert bzw. weiterführend evaluiert. Daraus resultierend sollen abschließend maßgebende Parameter und Entitäten zum Trag- und Verformungsverhalten des untersuchten Verbunddeckensystems einerseits abgeleitet, sowie andererseits im Kontext einer normativen Entwicklung vergleichend dar-, und anhand eigener Empfehlungen, sichergestellt werden.

Um eine vollumfängliche experimentelle Systemidentifikation, sowie deren analytische und numerische Systemevaluation, zu ermöglichen, werden hierbei alle den maßgebenden Forschungsgegenstand umfassenden Untersuchungen auf strukturell und zeitlich multiplen Skalenebenen durchgeführt, wobei das allgemeine Untersuchungsspektrum in diesem Zusammenhang grundsätzlich in maßgebliche Untersuchungen an *Verbundprobekörpern* und in begleitende Untersuchungen an *Materialprobekörpern* unterteilt werden kann (siehe hierzu auch Abb. 1.1).

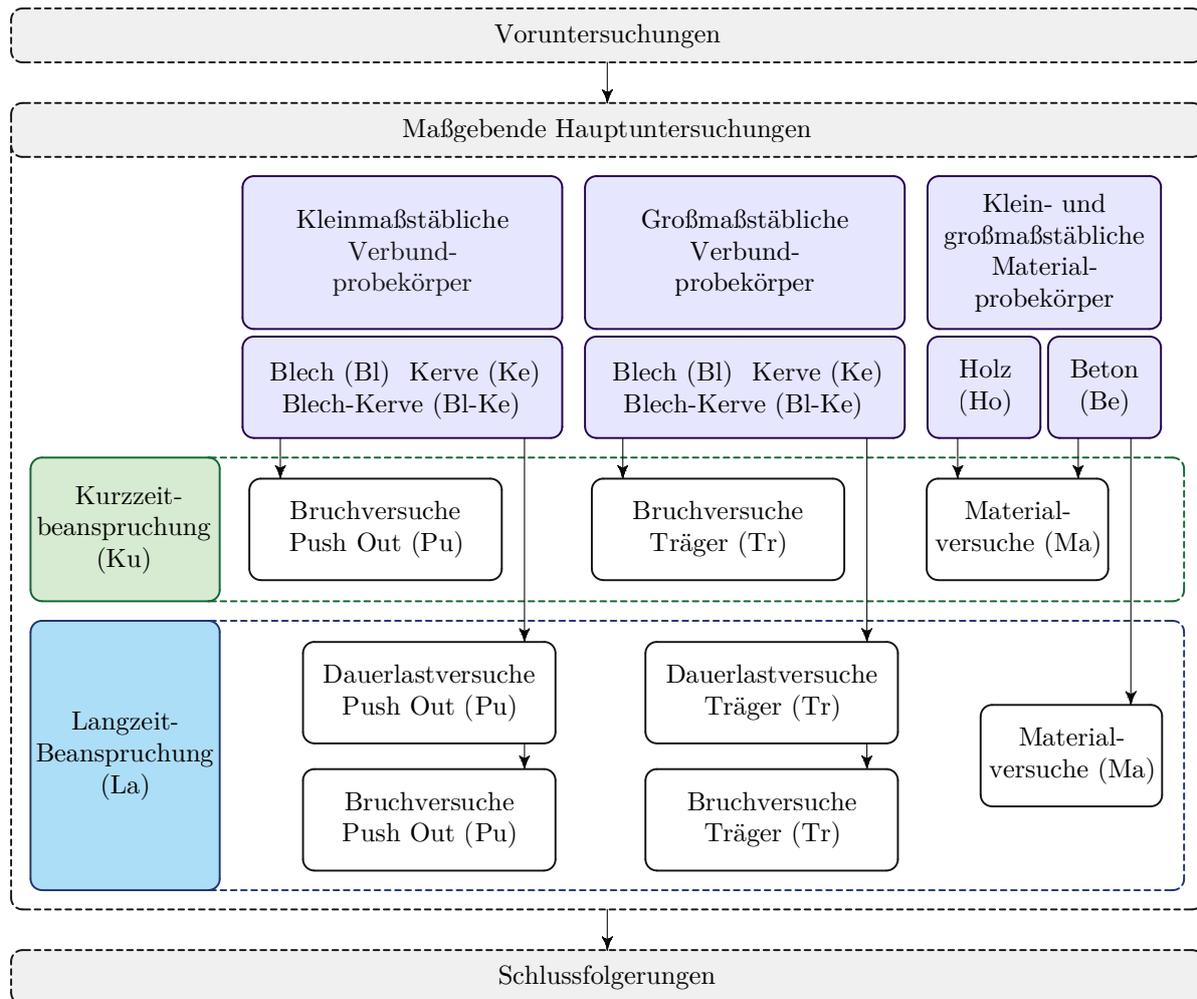


Abb. 1.1: Methodischer Aufbau der Untersuchungen an Verbundprobekörpern und der begleitenden Untersuchungen an Materialprobekörpern

Als strukturell maßgebende Skalen zu den Untersuchungen an Verbundprobekörpern werden dabei einerseits die *kleinmaßstäbliche Ebene* (Versuche an doppelsymmetrischen Push Out Probekörpern) zur expliziten Untersuchung der Schubverbinder, sowie andererseits die *großmaßstäbliche Ebene* (Versuche an symmetrischen Biegeträgern) zur Untersuchung der Schubverbinder am expliziten Verbunddeckensystem, definiert. Um in diesem Kontext ferner die alleinstehenden, sowie auch die kombinierten Eigenschaften bzw. die Interaktionsmechanismen der einzelnen typologisch divergenten Schubverbindersysteme zu identifizieren, werden hierbei alle klein-, als auch großmaßstäblichen Untersuchungen an

Verbundprobekörpern nochmals in Untersuchungen an linienförmigen ballistisch vernagelten Puzzle Strip Schublechen (Versuchstypologie Blech), an punktuellen ausgerundeten Kernen (Versuchstypologie Kerne) und an der Kombination aus beiden genannten (Versuchstypologie Blech-Kerne), subkategorisiert.

Demgegenüber dienen die begleitenden Untersuchungen an Materialprobekörpern insbesondere zur Detektion und Verifikation mechanischer Kenngrößen der Verbundpartner Holz und Beton, und können im Vergleich zu den Untersuchungen an Verbundprobekörpern entsprechend als ergänzende Versuchsreihen zur Parameteridentifikation der maßgebenden Verbundmaterialien verstanden werden. Die betrachteten strukturellen Skalenebenen dieser Untersuchungen definieren sich hierbei in Abhängigkeit des entsprechenden Versuchsaufbaus zur Ermittlung der jeweiligen mechanischen Kenngrößen.

Als zeitlich maßgebende Skalen zu den Untersuchungen an Verbundprobekörpern, sowie teilweise auch zu den Untersuchungen an Materialprobekörpern, werden die *Kurzzeit Ebene* (Zeitbereich nach Erreichen der 28 Tage Festigkeit des Verbundmaterials Beton) zur Beschreibung des Kurzzeit Trag- und Verformungsverhaltens, sowie die *Langzeit Ebene* (Zeitbereich nach Erreichen der 28 Tage Festigkeit des Verbundmaterials Beton zuzüglich 365 Tagen unter definierter Lagerung der Verbundprobekörper) zur Beschreibung des Langzeit Trag- und Verformungsverhaltens, festgelegt. Mit Bezug auf die beschriebene definierte Lagerung der Verbundprobekörper kommen hierbei dem Untersuchungsgegenstand dienliche Randbedingungen in Form eines künstlichen Wechselklimas, sowie einer am Gebrauchstlastniveau orientierten Dauerlast, zum Einsatz.

Diesem beschriebenen methodischen Konzept folgend, gliedert sich die vorliegende Arbeit in eine ebensolche Chronologie an funktional aufeinander aufbauenden Kapiteln. In *Kapitel 2* soll demnach eine detailliertere Vorstellung des untersuchten Verbunddeckensystems und der damit verbundenen Struktureigenschaften erfolgen. Anschließend werden in *Kapitel 3* bisherige, den Untersuchungsgegenstand betreffende, forschungs- und entwicklungsrelevante, sowie auch damit in Verbindung stehende normative, Inhalte zusammengetragen und kontextuell analysiert.

Aufbauend darauf werden in *Kapitel 4*, *Kapitel 5* und *Kapitel 6* die maßgebenden experimentellen, analytischen und numerischen Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten des untersuchten Verbunddeckensystems auf Kurz- und Langzeit Ebene qualitativ und quantitativ beschrieben und bewertet. Hierzu werden die jeweiligen methodischen Grundlagen der einzelnen Untersuchungen erläutert, sowie die Untersuchungen anhand derer durchgeführt, wie auch anschließend evaluiert und vergleichend analysiert. Wesentliche Erkenntnisse dieser Untersuchungen werden weiterführend in *Kapitel 7* kumulativ zusammengefasst und maßgebende, daraus resultierende, Schlussfolgerungen abgeleitet. Ein konkludierendes Resümee, sowie auch ein weiterführender forschungsrelevanter Ausblick, wird abschließend in *Kapitel 8* gegeben.

Kapitel 2

Konzeptidee und Eigenschaften des untersuchten Verbunddeckensystems

Bei der untersuchten Tragstruktur handelt es sich, wie bereits einleitend erwähnt, um eine neuartige Form von Holz-Beton-Verbunddeckensystem, wobei die hierbei vorliegenden Systemcharakteristiken der angewendeten hölzernen Verbundkomponente auf Vollholzbasis, als auch der applizierten kombinierten Schubverbinder als wesentlichste methodische Neuerungen genannt werden können. Als strukturell maßgebende Grundlage für alle weiterführenden systemrelevanten Untersuchungen soll im nachfolgenden *Kapitel 2* demnach ein kurzer Überblick über die konzeptionelle Idee und die genannten Besonderheiten, sowie auch die maßgebenden Eigenschaften der einzelnen Strukturkomponenten für den vorliegenden Untersuchungsgegenstand, gegeben werden.

2.1 Struktureller Aufbau

Im Allgemeinen beruhen Holz-Beton-Verbundtragstrukturen für den Einsatz als Deckensysteme in Hochbauten auf einem schematisch klaren Aufbau, welcher sich durch eine hölzerne Basisschicht, eine darauf aufgebrauchte Aufbetonschicht und eine dazwischenliegende Schubverbindung, beschreiben lässt. In Abhängigkeit der Eigenschaften der applizierten einzelnen Strukturkomponenten können schlussfolgernd unterschiedlichste Ausführungsvarianten mit ebenso mannigfaltigen Systemcharakteristiken realisiert werden.

Im Falle des untersuchten Vollholz-Beton-Verbunddeckensystems liegen die wesentlichen systemcharakteristischen Besonderheiten in der Konzeption der ausgeführten hölzernen Basisschicht (schmalseitig aneinandergereihte Vollholzbalken mit v-förmiger Zwischenfuge), sowie den daraus resultierenden Typologien bzw. Applikationsformen der verwendeten Schubverbinder (linienförmige ballistisch vernagelte Puzzle Strip Schubleche kombiniert mit punktuellen ausgerundeten Kerven ohne zusätzliche mechanische Verbindungsmittel zur Abhebesicherung), wie nachfolgend aus Abb. 2.1 ersichtlich wird.

Dieser strukturelle Aufbau basiert dabei grundsätzlich auf der Idee einer, im Vergleich zu konventionellen Schnitthölzern, erweiterten Querschnittsnutzung innerhalb der hölzernen Basisschicht und einer aus dieser Geometrie resultierenden Applikation

von kombinierten Schubverbindersystemen. Während konventionelle Schnitthölzer gemäß *ÖNORM DIN 4074-1* [5] ausschließlich tetragonale hoch- oder flachkante Querschnitte aufweisen, zielt das vorgestellte Vollholz-Beton-Verbunddeckensystem auf die Nutzung erweiterter hexagonaler, flachkanter Querschnitte mit künstlich eingeschnittener Baumkante, und dadurch erweiterter Querschnittsnutzung, ab.

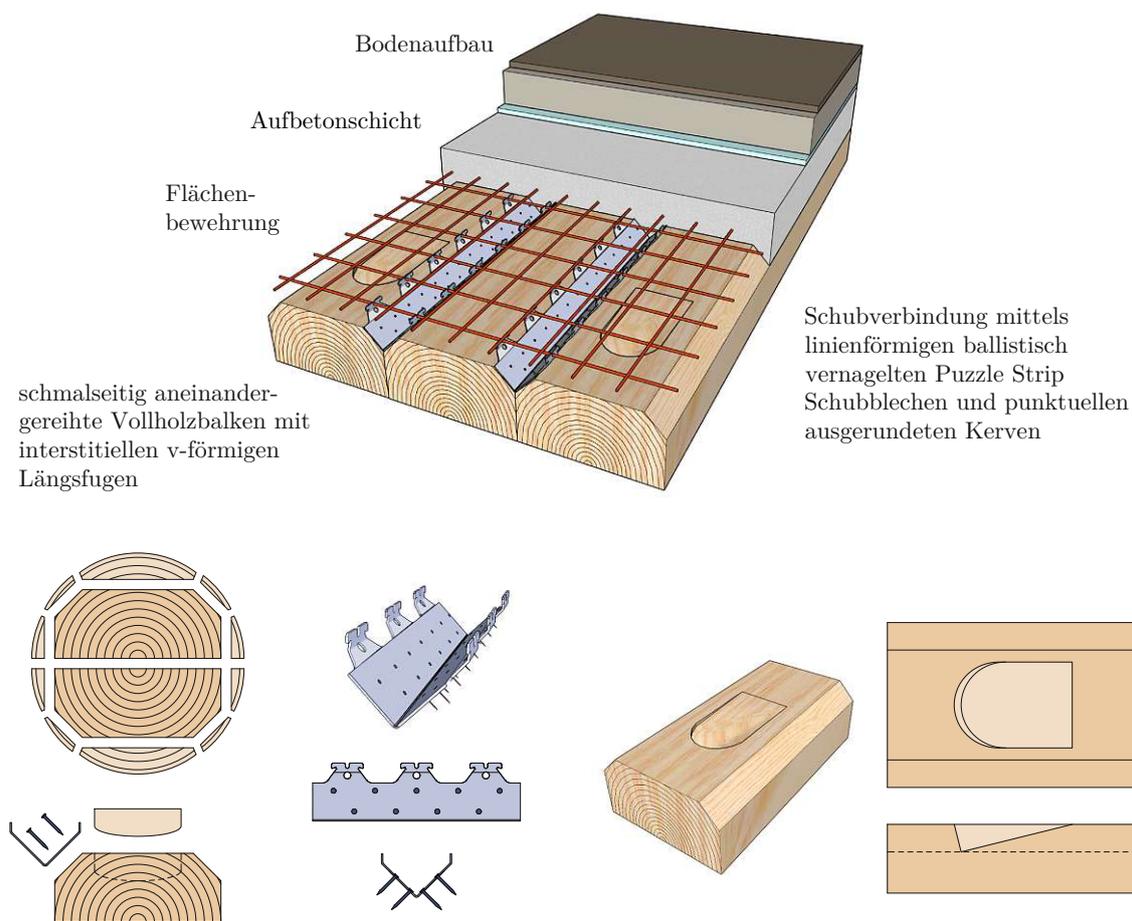


Abb. 2.1: Struktureller Aufbau des untersuchten Vollholz-Beton-Verbunddeckensystems (oben) | erweiterte Querschnittsnutzung mit künstlich eingeschnittener Baumkante und hexagonaler, flachkanter Querschnittsgeometrie sowie daraus resultierende Schubverbinderapplikationen (unten links) | Schubverbindertypologie linienförmige ballistisch vernagelte Puzzle Strip Schubleche (unten mittig) | Schubverbindertypologie punktuell ausgerundete Kerven ohne zusätzliche mechanische Verbindungsmittel zur Abhebesicherung (unten rechts)

Wie aus Abb. 2.1 ersichtlich, resultieren aus dieser genannten Querschnittsform interstitielle v-förmige Längsfugen zwischen den einzelnen schmalseitig aneinandergereihten, flachkantigen Vollholzbalken, welche weiterführend zur Applikation der linienförmigen ballistisch vernagelten Puzzle Strip Schubleche verwendet werden können. In Verbindung mit einer entsprechenden Flächenbewehrung und der aufgetragenen Aufbetonschicht beschreibt diese Typologie von Schubverbindern funktional somit nicht nur eine angewandte Form des

mechanischen Schubverbunds, sondern stellt gleichzeitig auch die maßgebende Möglichkeit zur Assemblierung der einzelnen Vollholzbalken dar. Durch die Applikation dieser Form von Schubverbindern kann demgemäß, trotz des generellen Einsatzes einzelner balkenförmiger Strukturelemente, eine durchgängig flächenförmige Tragkonstruktion innerhalb der hölzernen Basisschicht geschaffen werden. Aus konzeptioneller Sicht lässt sich das untersuchte Verbunddeckensystem demnach auch unter dem Einsatz separater balken- bzw. rippenförmiger hölzerner Tragelemente als allgemein flächenförmige Verbundkonstruktion bezeichnen.

Im Kontext einer generellen mechanischen Betrachtungsweise charakterisiert sich diese Typologie von Schubverbindern weiterführend durch eine äußerst hohe Duktilität, bei einer gleichzeitig allerdings in nur geringem Maß vorhandenen Verbindungssteifigkeit. Um eine entsprechend erhöhte Verbindungssteifigkeit der gesamten Verbundstruktur zu erreichen, wird diese Form von Schubverbindern folglich durch ein zweites, allerdings typologisch divergentes, Konzept ergänzt. Hierbei handelt es sich, wie ebenfalls aus Abb. 2.1 ersichtlich, um punktuell an den Oberflächen der Vollholzbalken angeordnete ausgerundete Kerven ohne zusätzliche mechanische Verbindungsmittel zur Abhebesicherung. Diese, im Vergleich zu den vernagelten Puzzle Strip Schublechen funktional unterschiedliche Typologie von Schubverbindern, charakterisiert sich durch schlussfolgernd, ebenfalls variierende, und im vorliegenden Fall überdies gegensätzliche, mechanisch Eigenschaften. Während die vernagelten Puzzle Strip Schubleche eine, wie bereits einleitend erwähnt, sehr hohe Duktilität bei einer zeitgleich aber nur geringen Verbindungssteifigkeit aufweisen, zeichnen sich die punktuellen ausgerundeten Kerven durch eine vergleichsweise wesentlich reduzierte Duktilität bei einer gleichzeitig allerdings signifikant gesteigerten Verbindungssteifigkeit aus.

Das resultierende Trag- und Verformungsverhalten des untersuchten Vollholz-Beton-Verbunddeckensystems wird dementsprechend maßgeblich durch die Kombination dieser beiden typologisch divergierenden Schubverbindersysteme beeinflusst, sowie weiterführend erst auch auf Basis dieser kombinierten Systemapplikation bzw. anhand der daraus resultierenden Interaktionsmechanismen, vollständig ermöglicht.

2.2 Maßgebende Eigenschaften der einzelnen Strukturkomponenten

Wie in *Kapitel 2.1* eingangs erläutert, charakterisiert sich der strukturelle Aufbau des untersuchten Verbunddeckensystems durch ein funktional neuartiges Konstruktionsprinzip, welches gleichbedeutend durch eine Vielzahl an systemindividuellen geometrie- und materialbedingten Eigenschaften gekennzeichnet ist. Aus diesem Umstand heraus bedarf es für den vorliegenden Untersuchungsgegenstand daher klarer Definitionen bzw. Festlegungen dieser maßgebenden Eigenschaften, welche in den nachfolgenden Kapiteln entsprechend vorgestellt werden sollen. Der generelle Fokus liegt hierbei grundsätzlich auf einer allgemeinen Beschreibung dieser genannten Entitäten, weshalb für detailliertere Beschreibungen zu expliziten mechanischen Eigenschaften und Kenngrößen der einzelnen Strukturkomponenten demnach auf die Inhalte der weiterführenden untersuchungsrelevanten Kapitel verwiesen werden darf.

2.2.1 Hölzerne Basisschicht

Die hölzerne Basisschicht des untersuchten Verbunddeckensystems kennzeichnet sich, wie einleitend beschrieben, durch schmalseitig aneinandergereihte, flachkante Vollholzbalken mit interstitiellen v-förmigen Längsfugen zwischen den einzelnen Hölzern. Die hierbei im Zuge der Untersuchungen verwendeten einzelnen Strukturhölzer werden dabei vollständig in der Holzart Fichte (*Picea abies*), sowie mit fixierten äußeren geometrischen Querschnittsabmessungen von 240 x 100 mm, ausgeführt. Die dabei vorhandenen interstitiellen v-förmigen Längsfugen weisen in ihrer jeweiligen Abfasung darüber hinaus fest definierte äußere Nennmaße von 40 x 40 mm auf.

Ferner werden diese herstellungs- und ressourcenbedingt für alle Untersuchungen nicht im ursprünglichen Einschnitt, sondern erst im Zuge einer weiterführenden Holzbearbeitung erzeugt. Im Kontrast zur allgemeinen Konzeptidee umfasst die vollständige Holzcharge der Untersuchungen daher nicht nur mark- bzw. herzgetrennte, sondern ebenso mark- bzw. herzfremde, einzelne Strukturhölzer. Eine grafische Übersicht zu dieser Geometrie kann nachfolgend aus Abb. 2.2 entnommen werden.

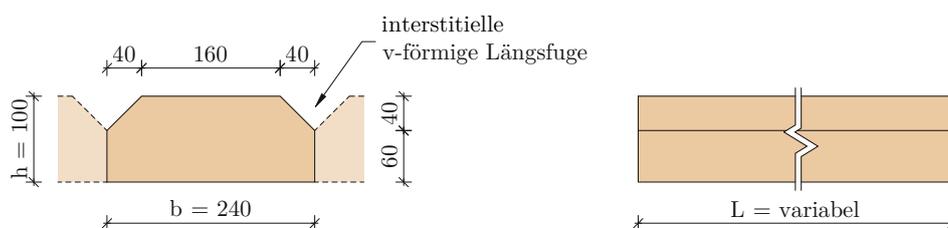


Abb. 2.2: Geometrische Details der angewendeten Strukturhölzer

Im Kontext einer detaillierteren Beschreibung können die verwendeten Strukturhölzer auf Basis von *ÖNORM DIN 4074-1* [5] weiterführend terminologisch zugeordnet werden. Hierbei handelt es sich demnach um technisch getrocknete und vierseitig gehobelte Nadel-schnitthölzer in Form von Kanthölzern ohne vorhandene Keilzinkung mit nachträglicher Abfasung. Mit Bezug auf diese Nomenklatur sei allerdings zusätzlich erwähnt, dass die explizite Querschnittsform aufgrund der flachkantigen Ausrichtung der verwendeten Strukturhölzer einer eigentlich gedrehten Form von an und für sich hochkantigen Kanthölzern entspricht. Es wird demnach die bisherige Bezeichnung der *Vollholzbalken* bzw. der *Strukturhölzer*, in konsistenter Form, synonym weiterverwendet.

2.2.2 Aufgebrachte Aufbetonschicht

Die Strukturkomponente Beton kennzeichnet sich, wie bereits eingangs erläutert, durch eine generelle aufgebrachte Aufbetonschicht in Verbindung mit einer darüber hinaus vorhandenen Flächenbewehrung zur funktionalen Assemblierung der gleichermaßen flächenförmigen Tragkonstruktion. Maßgebende Eigenschaften können hierbei somit einerseits zur aufgebrachten Aufbetonschicht selbst, sowie andererseits auch der dabei vorhandenen Flächenbewehrung, festgehalten werden.

Mit direktem Fokus auf die generelle aufgebrachte Aufbetonschicht, kommt hierbei ein, für alle Untersuchungen konsistenter, fest definierter schwindarmer Normalbeton mit einer

grundsätzlichen Schichtdicke von 100 mm zur Anwendung. Hinsichtlich der dabei vorhandenen Betongüte kann dieser als C 30/37 B2 F45 GK32 42.5N RRS gemäß *ÖNORM EN 206* [6] und *ÖNORM B 4710-1* [7] klassifiziert werden. Die in Verbindung mit dieser Aufbetonschicht applizierte Flächenbewehrung charakterisiert sich hierbei weiterführend durch eine einlagige Betonstahlmatte der Form AQ 55 gemäß *ÖNORM B 4707* [8] mit einem Längs- bzw. Querdrahtnenndurchmesser von $d_L = d_Q = 5.5$ mm, sowie einem Längs- bzw. Querdrahtachsabstand von $P_L = P_Q = 100$ mm. Sowohl Drahtnenndurchmesser, als auch Drahtabstand, definieren sich dabei in ihren geometrischen Proportionen in der Form, als somit eine formschlüssige Applikation der Flächenbewehrung in den Laschen der Puzzle Strip Schubleche ermöglicht wird, wie ebenfalls aus Abb. 2.1 (oben) ersichtlich.

2.2.3 Applizierte Schubverbinder

Wie aus dem strukturellen Aufbau gemäß *Kapitel 2.1* bereits ersichtlich, charakterisiert sich das systemische Tragkonzept des untersuchten Verbunddeckensystems durch eine kombinierte Applikation einzelner typologisch divergenter Schubverbindersysteme auf Basis von linienförmigen ballistisch vernagelten Puzzle Strip Schublechen und punktuellen ausgerundeten Kerven ohne zusätzliche mechanische Verbindungsmittel zur Abhebesicherung. Mit Bezug auf die Typologie der linienförmigen ballistisch vernagelten Puzzle Strip Schubleche können hierbei maßgebende Eigenschaften zu einerseits den Puzzle Strip Schublechen selbst, sowie andererseits der dabei vorhandenen ballistischen Vernagelung, festgehalten werden.

Die in den Untersuchungen applizierten Puzzle Strip Schubleche kennzeichnen sich in diesem Zusammenhang durch die Verwendung von korrosionsgeschützten Stahlprofilen in Form von kaltumgeformten schmelztauchveredelten feuerverzinkten Flacherzeugnissen S250GD+Z275MAC gemäß *DIN EN 10346* [9] und *DIN EN 10143* [10] mit einer allgemeinen Blechstärke von 2.0 mm. Darüber hinaus charakterisiert sich die ballistische Vernagelung der Puzzle Strip Schubleche durch den Einsatz von ebenfalls korrosionsgeschützten runden (nicht vorgebohrten) Glattschaftnägeln gemäß *DIN EN 14592* [11] mit einer Nennlänge von $L = 40$ mm, sowie einem Nenndurchmesser von $d = 3.3$ mm. Der hierbei vorhandene Korrosionsschutz wird dabei in Konformität mit *ÖNORM B 1995-1-1* [12] anhand eines galvanischen Zinküberzugs Fe/Zn12/C nach *DIN EN ISO 2081* [13] realisiert bzw. sichergestellt.

Hinsichtlich des Vernagelungsschemas der ballistischen Glattschaftnägeln zwischen dem jeweiligen Puzzle Strip Schublech und den jeweiligen Strukturhölzern kommt im Kontext der Untersuchungen ein fest definiertes zweireihiges Muster je Fugenscherfläche zur Anwendung. Dieses kennzeichnet sich hierbei durch eine alternierende Vernagelung der einzelnen Reihen in einem jeweiligen Abstand von 30 mm, welcher zeitgleich auch dem Reihenabstand an sich entspricht, woraus schlussfolgernd ein charakteristisches winkeliges Zickzack-Muster der Vernagelung unter 45° resultiert. Diese genannten geometrischen Zusammenhänge bzw. Verbindungsmittelabstände leiten sich dabei im Allgemeinen auf Basis von fertigungstechnischen Möglichkeiten, sowie darüber hinaus anhand von normativen Randbedingungen gemäß *ÖNORM B 1995-1-1* [12] ab. Das für den konkreten Anwendungsfall verwendete Vernagelungsschema entspricht hierbei einer grundsätzlich normkonformen Ausführung, lediglich der Randabstand der Verbindungsmittel rechtwinkelig zur Faserrichtung im Fugengrund widerspricht dem geforderten normativen Mindestabstand für ein einzelnes

Strukturholz. Aufgrund der allerdings vorhandenen schmalseitigen Aneinanderreihung mehrerer einzelner Strukturhölzer kann diesem vorhandenen Umstand jedoch schlussfolgernd entgegengetreten, und eine mögliche Spaltgefährdung konkludierend ausgeschlossen werden. Eine zusammenfassende grafische Übersicht zu diesen beschriebenen geometrischen Eigenschaften kann nachfolgend aus Abb. 2.3 entnommen werden.

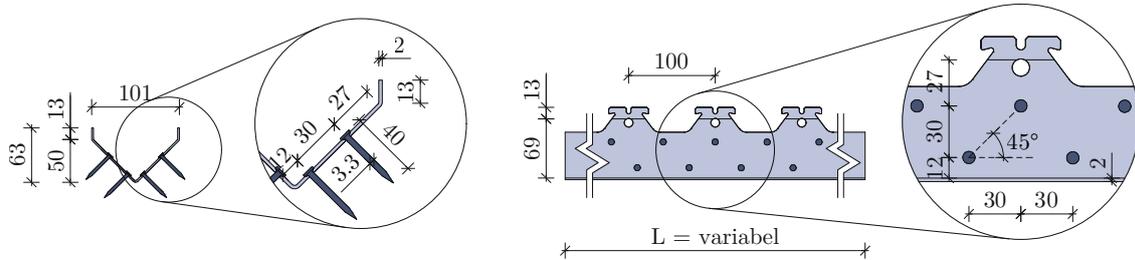


Abb. 2.3: Geometrische Details der angewendeten linienförmigen Puzzle Strip Schubleche sowie der dabei verwendeten ballistischen Vernagelung mit zweireihigem Vernagelungsschema (Zickzack-Muster)

Mit weiterführendem Bezug auf die Typologie der punktuellen ausgerundeten Kerfen ohne zusätzliche mechanische Verbindungsmittel zur Abhebesicherung können darüber hinaus maßgebende geometrische Eigenschaften zu dieser Form von Schubverbindern festgehalten werden. Im Kontext dieser geometrischen Eigenschaften handelt es sich mit Bezug auf den gegebenen Untersuchungsgegenstand um eine neuartige Form von Kervengeometrie, wesentlich basierend auf den Systemeigenschaften des vorgestellten Verbunddeckensystems, sowie damit verbundenen Überlegungen zu fertigungstechnischen Ausführungs- und Optimierungsmöglichkeiten.

Resultierend aus den interstitiellen v-förmigen Längsfugen zwischen den einzelnen Strukturhölzern und den in ebendiesen applizierten Puzzle Strip Schublechen bedarf es, wie aus Abb. 2.1 (oben) ersichtlich, einer punktuellen, in Querrichtung nicht durchgängigen, Form von Kervengeometrie für das vorliegende Verbundsystem. Unter der weiteren Berücksichtigung eines möglichst effizienten Abbundvorgangs resultiert demnach die vorhandene Kervengeometrie basierend auf einem punktuellen, zweiflächigen ausgerundeten Einschnitt, welcher nachfolgend aus Abb. 2.4 ersichtlich wird.

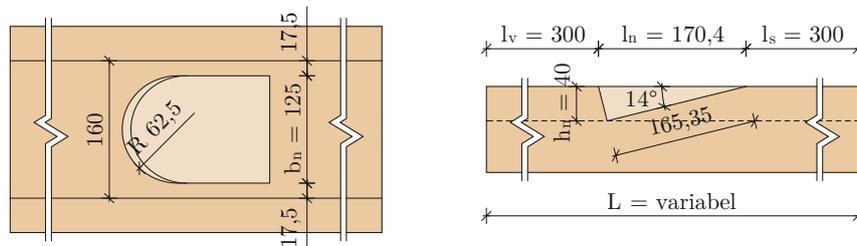


Abb. 2.4: Geometrische Details der angewendeten punktuellen ausgerundeten Kerfen ohne zusätzliche mechanische Verbindungsmittel zur Abhebesicherung

Diese für alle Untersuchungen fest definierte Kervengeometrie charakterisiert sich hierbei durch eine maßgebende maximale Kerventiefe bzw. eine Kervenbreite von $h_n = 40$ mm bzw. $b_n = 125$ mm unter einem konstanten Einschnittwinkel von 14° , sowie einer daraus resultierenden maßgebenden Kervlänge von $l_n = 170.4$ mm. Mit Bezug auf die in diesem Zusammenhang weiterführenden äußeren Randabstände der einzelnen Kerven, kommen im Zuge der Untersuchungen wiederum fixierte, und zudem idente, Nennmaße der Vor-, bzw. auch der Zwischenholzlänge, von $l_v = l_s = 300$ mm zur Anwendung. Darüber hinaus gründet die generelle Konzeption dieser Form von Schubverbindern auf einer, wie bereits eingangs erwähnten, Ausführung ohne zusätzliche mechanische Abhebesicherung, welche im Kontext der Untersuchungen, und einer damit verbundenen kombinierten Applikation von Schubverbindersystemen, auf Basis der Puzzle Strip Schubleche bereits vollständig gewährleistet werden kann.

Kapitel 3

Stand der Forschung und Entwicklung von maßgebenden Schubverbindersystemen

Neben einer allgemeinen materialorientierten Entwicklungsarbeit stellen strukturelle Untersuchungen zur Applikation jeweiliger Schubverbindersysteme den Schwerpunkt in Forschung und Entwicklung von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen dar. Basierend auf einer bis zum heutigen Tag bereits durchaus gewachsenen Historie dieser Technologieform liegt bislang folglich ein typologisch äußerst breites Spektrum an unterschiedlichen Schubverbindersystemen und -konzepten vor.

Um eine daher möglichst zugängliche, und im Sinne der Forschungsarbeit kontextuell saubere Übersicht zu dieser Thematik geben zu können, soll im nachfolgenden *Kapitel 3* daher ein einerseits allgemeiner Überblick zu kontextuell relevanten Schubverbindersystemen bei Holz-Beton-Verbundkonstruktionen gegeben, sowie sollen diese andererseits hinsichtlich ihrer jeweiligen Charakteristiken untersucht und bewertet werden. In diesem Sinne wird zu Beginn ein allgemeines Kompendium an potentiellen Schubverbindersystemen dargestellt, sowie werden darüber hinaus theoretische und normative Grundlagen zur Beschreibung der mechanischen Eigenschaften ebendieser dargebracht. Aufbauend auf diesen allgemeinen Erläuterungen sollen weiterführend bestehende, kontextuell relevante Forschungsarbeiten untersucht und analysiert werden. Auf Basis dieser Untersuchungen wird es demnach möglich systematische Vergleichsbetrachtungen an den einzelnen komparativen Strukturkonzepten durchzuführen, sowie können abschließend außerdem maßgebende Rückschlüsse mit Hinblick auf das zu untersuchende neuartige Verbunddeckensystem möglich gemacht werden.

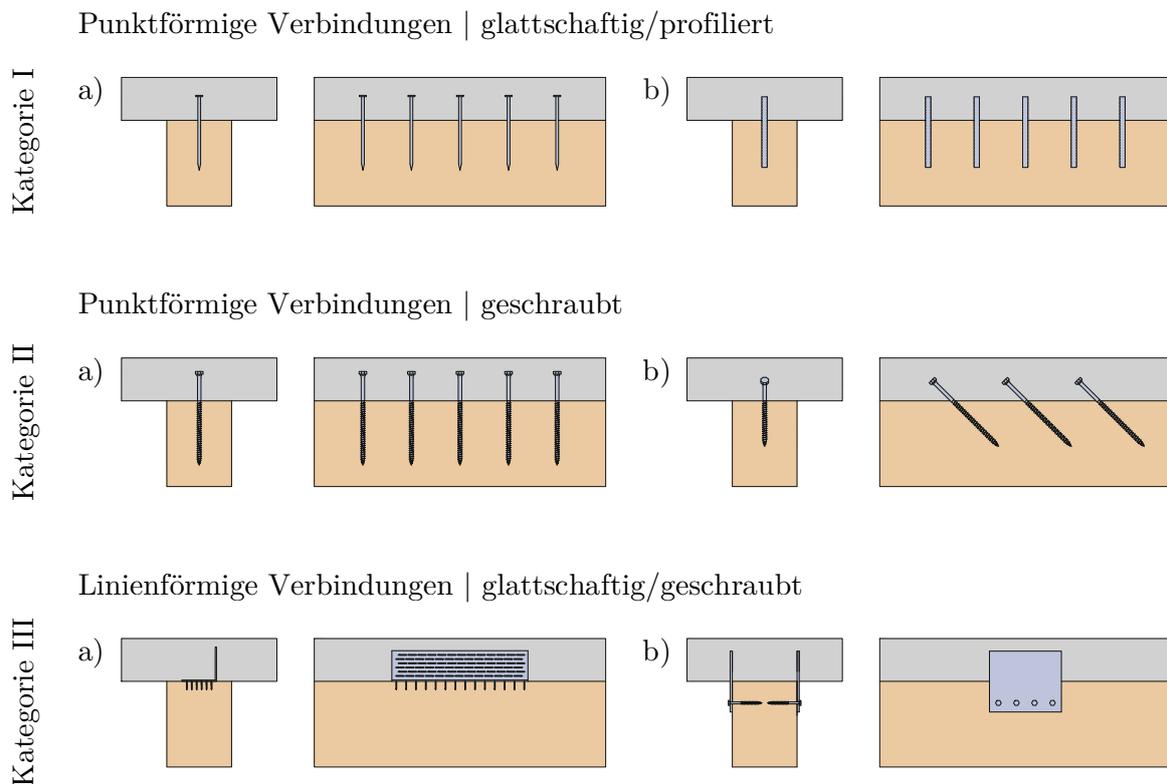
3.1 Allgemeiner Überblick zu Schubverbindersystemen

Wie bereits einleitend erwähnt, blicken Holz-Beton-Verbundkonstruktionen und dabei applizierte Schubverbindersysteme auf eine aus technischer Sicht bereits lange Entwicklungshistorie zurück. Betrachtet man darüber hinaus die vollumfänglichen Möglichkeiten zur Schubübertragung bei besagten HBV-Konstruktionen, können diese grundsätzlich

in mechanische form- und kraftschlüssige Verbindungen, sowie in aus diesen Typologien kombinierte Verbindungsformen gegliedert werden.

Additiv zu diesen genannten Formen kann das allgemeine Spektrum an Schubverbinder-systemen zusätzlich um stoffschlüssige, geklebte Verbindungen erweitert werden, diese sollen aufgrund der kontextuellen Ausrichtung der vorliegenden Arbeit allerdings nachfol-gend keine weitere Berücksichtigung finden. Eine allgemeine Gliederung der genannten Verbindungstypologien kann demnach direkt auf Basis der applikationsbedingten, cha-rakteristischen mechanischen Eigenschaften einzelner Schubverbindersysteme erfolgen. Exemplarisch führt hierfür beispielsweise *Ceccotti* [14] eine Übersicht zu gängigen Schub-verbindersystemen bei HBV-Konstruktionen an.

Auf dieser Illustration aufbauend soll schlussfolgend ein überarbeiteter, individuell ange-passter Überblick zu aktuellen Typologien von Schubverbindersystemen gegeben werden, wie nachfolgend aus Abb. 3.1 ersichtlich wird. Der allgemeine Fokus der Darstellungen liegt hierbei weiterführend wesentlich auf den für den gegebenen Forschungsgegenstand maßgebenden Typologien von Schubverbindungen, welche sich in diesem Kontext grund-sätzlich als geometrisch punkt- und linienförmige, sowie applikationsbedingt stiftförmige und kervenbasierte Verbindungsmittel zusammenfassen lassen.



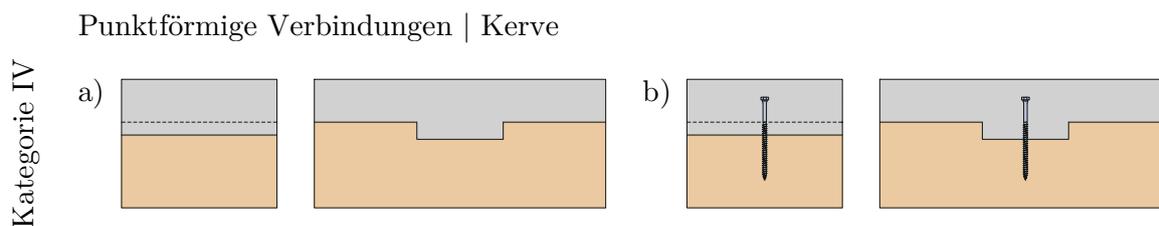


Abb. 3.1: Allgemeiner Überblick zu Schubverbindersystemen bei HBV-Konstruktionen (adaptiert nach *Ceccotti* [14]): I^{a)} Nägel, I^{b)} Stabdübel aus Bewehrungsstahl, II^{a)} und II^{b)} Schrauben, III^{a)} Nagelplatte, III^{b)} Schublech mit geschraubten Verbindungsmitteln, IV^{a)} rechteckige Kerbe ohne mechanisches Verbindungsmittel, IV^{b)} rechteckige Kerbe mit mechanischem Verbindungsmittel

Unter der Berücksichtigung der genannten maßgebenden Typologien von Schubverbindersystemen ist gemäß Abb. 3.1 folglich eine Gliederung in vier Hauptkategorien (Kategorien I bis IV) möglich. Diese Kategorisierung kennzeichnet sich hierbei durch den direkten applikationsbedingten Herstellungsaufwand, wobei mit steigender Kategorie eine grundsätzlich steigende Komplexität in der Herstellung bzw. ein steigender Aufwand an maschinell erforderlichen Betriebsmitteln assoziiert werden kann. Darüber hinaus kann die genannte Kategorisierung wesentlich beeinflusst auf Basis der gegebenen form- bzw. kraftschlüssigen Verbundeigenschaften der einzelnen Schubverbindertypologien getroffen werden.

Gemäß diesen Konzepten können die Schubverbindungen der Kategorien I und II als herstellungsbedingt typologisch simpelste Applikationsformen mit dabei vorhandener form- und kraftschlüssiger Verbundcharakteristik bezeichnet werden. In diesem Sinne handelt es sich hierbei um punktuell angeordnete stiftförmige Verbindungsmittel unterschiedlicher Ausführungsformen, wobei Kategorie I demnach punktuell angeordnete stiftförmige Verbindungsmittel mit glattschaftiger oder profilierter Schaftausprägung beinhaltet und Kategorie II ebensolche mit geschraubter Schaftausprägung miteinbezieht. Als exemplarische Ausführungsformen der Kategorie I können in diesem Zusammenhang beispielsweise Nägel und Stabdübel aus Bewehrungsstahl genannt werden bzw. umfassen Verbindungsformen der Kategorie II unterschiedliche Arten von konventionellen Schraubverbindungen, sowie geschraubte Stabdübel aus Bewehrungsstahl.

Vergleichend zu diesen Verbindungstypologien definieren sich Schubverbindungen der Kategorie III ebenso auf Basis von form- und kraftschlüssigen Verbundeigenschaften, beinhalten im konträren Kontext zu den Kategorien I und II allerdings ausschließlich Applikationsformen mit ausgeprägter linienförmiger Systemcharakteristik. Im weiteren Zusammenhang zeigen die genannten Ausführungsformen somit keine rein punktuelle Anordnung, sondern charakterisieren sich folglich als Typologien mit einer expliziten Längsausdehnung. Wie exemplarisch gezeigt handelt es sich hierbei einerseits um Nagelplatten sowie andererseits um, für den Forschungsgegenstand speziell relevante, linienförmige Schubleche in Verbindung mit stiftförmigen Verbindungsmitteln.

Über diese Kategorie III hinausgehend, umfassen Verbindungsmittel der Kategorie IV demgegenüber wiederum punktuell angeordnete, sowie kervenbasierte Applikationsformen von Schubverbindern. Diese definieren sich im Vergleich zu den Varianten der Kategorien I bis III durch eine direkt formschlüssige Verbundcharakteristik der vorhandenen Verbund-

komponenten Holz und Beton, sowie weisen diese folglich die formgebende Geometrie der Kerwenstruktur (rechteckig bzw. auch in anderen geometrischen Ausführungsformen möglich) als wesentlichstes Kategorisierungsmerkmal dieser Typologien auf. Darüber hinaus kann bei diesen Applikationsformen zusätzlich nach dem Vorhandensein additiver stiftförmiger Verbindungsmittel unterschieden werden, wodurch sich grundsätzlich Kombinationsformen der beschriebenen Kategorien I und II sowie der Kategorie IV als möglich erweisen. In diesem Kontext können daraus schlussfolgernd unter anderem Kerwen mit beliebig polygonalem Querschnitt ohne mechanische Verbindungsmittel, sowie Kerwen mit beliebig polygonalem Querschnitt in Kombination mit geschraubten Verbindungsmitteln als mögliche Ausführungsformen genannt werden.

Unter der Berücksichtigung dieser Kategorisierungen lassen sich die Verbindungseigenschaften der genannten einzelnen Typologien mit Bezug auf die explizite Verbundcharakteristik darüber hinaus wie folgt zusammenfassen:

- Kategorie I (Punktförmige Verbindungen | glattschaftig/profiliert)
 - beschreibt stiftförmige direkte Verbindungen der Verbundpartner Holz und Beton
- Kategorie II (Punktförmige Verbindungen | geschraubt)
 - beschreibt ebenfalls stiftförmige direkte Verbindungen der Verbundpartner Holz und Beton
- Kategorie III (Linienförmige Verbindungen | glattschaftig/geschraubt)
 - beschreibt stiftförmige indirekte Verbindungen der Verbundpartner Holz und Beton unter der zusätzlichen Verwendung von einzelnen oder multiplen einschnittigen Schublechen
- Kategorie IV (Punktförmige Verbindungen | Kerve)
 - beschreibt kervenförmige direkte Verbindungen der Verbundpartner Holz und Beton unter einer möglichen zusätzlichen Verwendung von stiftförmigen Verbindungsmitteln

Gemäß dieser vorgestellten Auflistung kann das behandelte Spektrum an Schubverbinder-systemen des Weiteren somit grundsätzlich für die Teilbereiche

- punktförmige Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln (beinhaltet in den Kategorien I bis IV)
- linienförmige Verbindungen mit Schublechen und stiftförmigen Verbindungsmitteln (beinhaltet in Kategorie III)
- punktförmige Verbindungen mit Kerwen mit oder ohne zusätzlichen stiftförmigen Verbindungsmitteln (beinhaltet in Kategorie IV)

subkategorisiert werden. Die gezeigte Kategorisierung stellt folglich einerseits den konzeptionellen Ausgangspunkt in der Beschreibung forschungsrelevanter Schubverbinder-systeme dar, sowie soll diese demnach schlussfolgernd ebenso als Grundlage für alle nachfolgenden Beschreibungen bzw. Ausführungen dienen.

3.2 Idealisertes Trag- und Verformungsverhalten einer Schubverbindung

Basierend auf dem vorgestellten Spektrum an möglichen Typologien von Schubverbindungen soll weiterführend auf die maßgebenden, grundsätzlichen mechanischen Struktureigenschaften ebendieser eingegangen werden. Das allgemeine Trag- und Verformungsverhalten der gezeigten Schubverbindungen kann hierbei in Abhängigkeit der kontextuellen Fokussierung grundlegend auf Basis unterschiedlicher maßstäblicher Skalenebenen und damit verbundener Eigenschaften dargestellt und beschrieben werden.

Interpretiert man eine der in Abb. 3.1 dargestellten Schubverbindungen hierbei trivial als punktuelle Entität zwischen den zu koppelnden Verbundschichten Holz und Beton, zeigt sich der aus einer Lasteinwirkung resultierende Last-Verschiebungs-Zusammenhang zwischen den beiden Verbundpartnern als wesentlichste Grundlage zur mechanischen Charakterisierung ebendieser. Untersucht man diesen Zusammenhang darüber hinaus auf Basis einer idealisierten Betrachtungsweise, kann diese punktuelle Entität weiterführend vereinfacht als nicht-lineares Federelement in Achsrichtung der einwirkenden Last bzw. Schubkraft dargestellt werden, wie nachfolgend exemplarisch aus Abb. 3.2 ersichtlich wird.

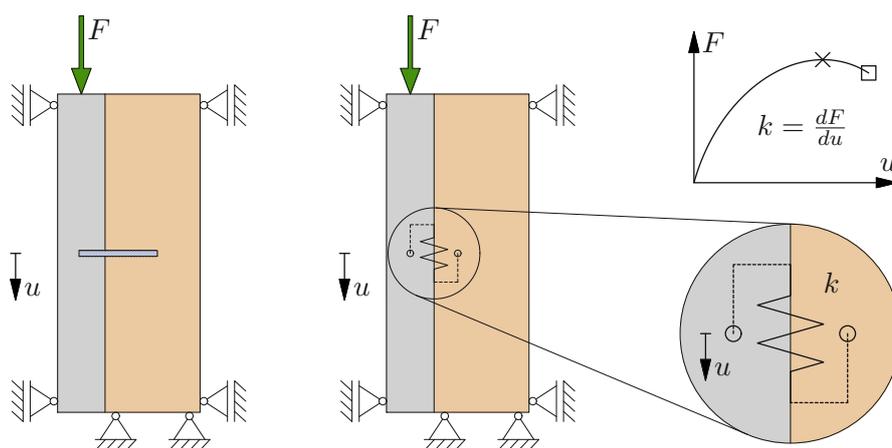


Abb. 3.2: Idealisierte Betrachtungsweise einer Schubverbindung auf Basis eines beispielhaften nicht-linearen Federelements | Reales System (links), idealisiertes System (rechts)

In diesem Kontext stellt sich eine idealisierte Betrachtungsweise gemäß Abb. 3.2 allerdings auch als wesentlich durch die realen mechanischen Eigenschaften des applizierten Schubverbindersystems, sowie der dabei vorhandenen Verbundkomponenten Holz und Beton dar. Form und Art des in Abb. 3.2 gezeigten idealisierten Ansatzes bilden somit folglich auch lediglich eine einzelne, explizite Repräsentationsform für unterschiedlichste Arten von resultierenden Last-Verschiebungs-Zusammenhängen von Schubverbindern ab, definieren sich hierbei aber stets in Abhängigkeit der auftretenden Verschiebungskomponente u ($F = F(u)$, $k = \frac{dF}{du}$). Der gezeigte, sowie alle weiterführenden kontextuellen Zusammenhänge, dienen somit ausschließlich zur grundsätzlichen theoretischen und normativ bezogenen Beschrei-

bung des maßgebenden Trag- und Verformungsverhaltens einer expliziten, exemplarischen Schubverbindung.

Aufbauend auf diesen genannten Annahmen können nachfolgend somit explizite mechanische Entitäten zum Trag- und Verformungsverhalten von Schubverbindungen definiert und weiterführend vorgestellt werden. In diesem Kontext sei hierzu darüber hinaus ausdrücklich zu erwähnen, dass mit Bezug auf die Darstellung aktueller normativer Zusammenhänge hierbei eine multiple Anzahl an teilweise inkonsistenten Dokumenten zum gegenwärtigen Zeitpunkt vorliegt, und die nachfolgenden Beschreibungen neben einer allgemeinen Darbringung daher vor allem auch um eine Vereinheitlichung der Nomenklatur, sowie um eine allgemein inhaltlich kritische Betrachtung bemüht sind.

3.2.1 Tragfähigkeit und Steifigkeit einer Verbindung

Als wesentliche mechanische Entitäten einer Schubverbindung können unter anderem die Tragfähigkeit und die Steifigkeit einer Verbindung genannt werden. Basierend auf dem beschriebenen vereinfachten idealisierten Ansatz als nicht-lineares Federelement kann das allgemeine Trag- und Verformungsverhalten einer Schubverbindung demnach exemplarisch auf Basis dieser genannten Größen beschrieben werden, wie nachfolgend aus Abb. 3.3 ersichtlich wird.

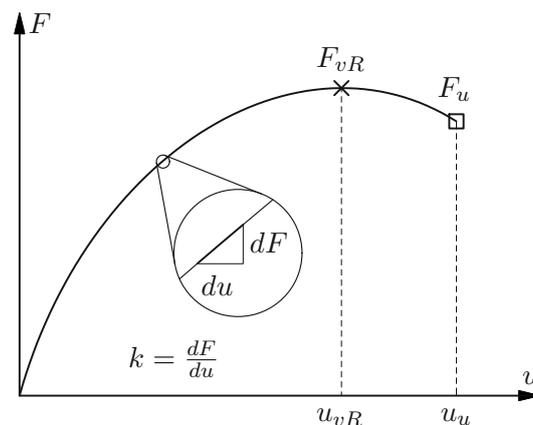


Abb. 3.3: Tragfähigkeit und Steifigkeit einer Schubverbindung | Idealisiertes Verhalten auf Basis eines beispielhaften nicht-linearen Federelements

Gemäß Abb. 3.3 charakterisiert sich die Tragfähigkeit einer Schubverbindung folglich durch eine maximal aufnehmbare Last in Form der Schubtragfähigkeit F_{vR} bei einer Verschiebung u_{vR} , sowie durch eine vorhandene Bruchlast F_u bei einer maximal erreichbaren Grenzverschiebung u_u . Darüber hinaus besitzt eine idealisierte Schubverbindung eine durch die Steigung k repräsentierte Steifigkeit in Abhängigkeit der jeweiligen Verschiebungskomponente u . Diese Steigung k stellt demnach weiterführend eine kontinuierliche, nicht konstante, Größe in Abhängigkeit der genannten Verschiebung u dar.

Betrachtet man diesen Zusammenhang, wird klar dass eine vollständige Beschreibung der Steigung k eines Last-Verschiebungs-Zusammenhangs somit nur als Funktion der

vorhandenen Verschiebung u möglich ist. Für reale Verbindungen besteht die Möglichkeit diesen theoretischen Umstand anhand von Näherungsfunktionen, wie beispielsweise den Ansätzen nach *Foschi* [15] oder *Richard* und *Abbott* [16] zu berücksichtigen. Aus normativer Sicht wird dieser Tatsache allerdings keine Bedeutung beigemessen. Vielmehr werden in den sinnverwandten normativen Dokumenten *ONR CEN/TS 19103* [3] und *ÖNORMEN 26891* [17] in diesem Zusammenhang Einzahlwerte (Verschiebungsmodul K) für bestimmte Steigungs- bzw. Traglastbereiche definiert, wie nachfolgend aus Abb. 3.4 ersichtlich wird.

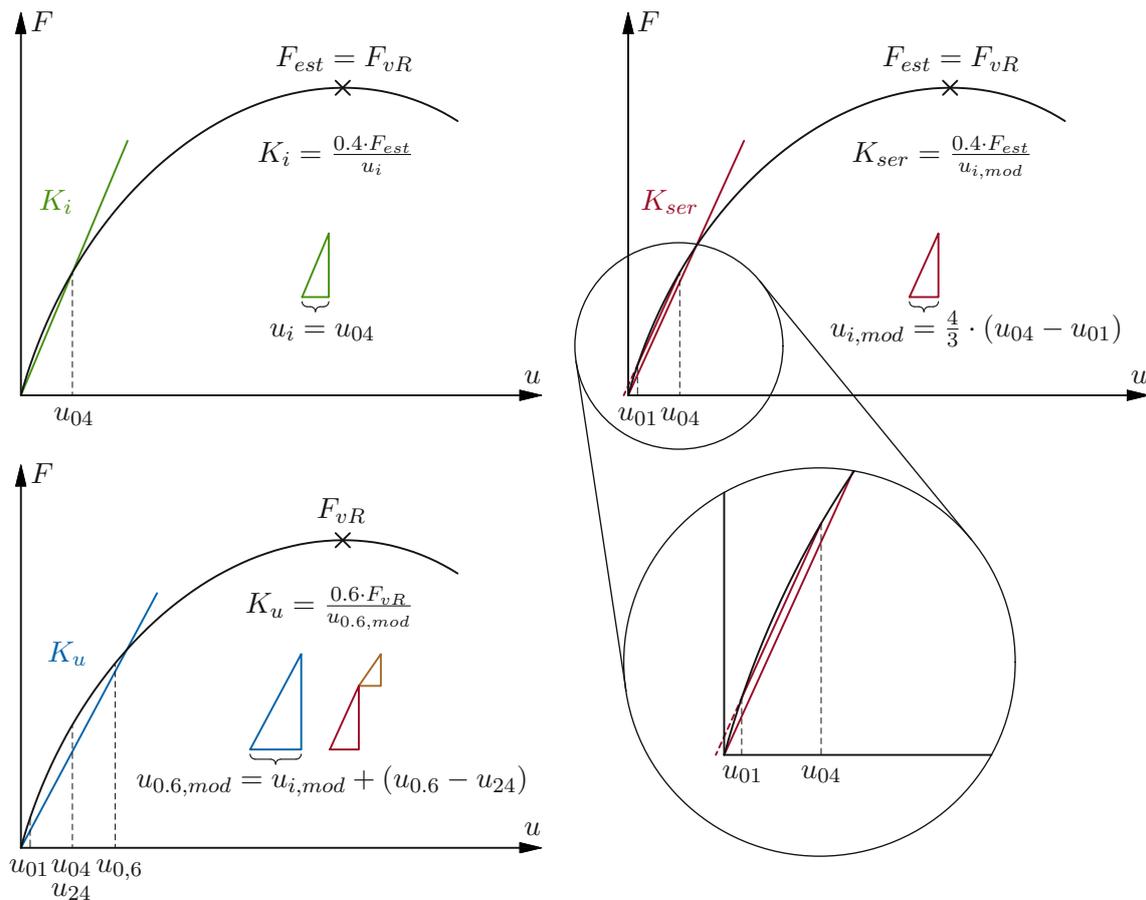


Abb. 3.4: Steifigkeit einer Schubverbindung gemäß *ONR CEN/TS 19103* [3] und *ÖNORM EN 26891* [17] | Anfangsverschiebungsmodul der Gebrauchstauglichkeit K_i (oben links), Verschiebungsmodul der Gebrauchstauglichkeit K_{ser} (rechts), Verschiebungsmodul der Tragfähigkeit K_u (unten links)

Wie aus Abb. 3.4, sowie auch Abb. 3.5 (rechts) zu entnehmen, charakterisieren sich die gezeigten Verschiebungsmoduln als Sekantenmoduln festgelegter Lastniveaus, welche sich auf Basis der Grenzzustände des allgemeinen semiprobabilistischen Sicherheitskonzepts gemäß *ÖNORMEN 1990* [18] definieren. Verallgemeinert gesprochen, werden demnach die Verschiebungsmoduln für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit K_i bzw. K_{ser} für ein 40%-iges Lastniveau, sowie wird der Verschiebungsmodul für den Grenzzustand der Tragfähigkeit K_u für ein 60%-iges Lastniveau der Traglast festgesetzt. Unter

genauerer Betrachtung charakterisiert sich diese genannte Traglast allerdings auf Basis zweier nicht zwingend identer Größen F_{est} und F_{vR} (F_{est} für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit bzw. F_{vR} für den Grenzzustand der Tragfähigkeit).

Dieser Umstand resultiert aus der experimentellen Versuchsdurchführung zur Ermittlung der Verschiebungsmoduln (Versuche an Push Out Probekörpern) gemäß *ÖNORMEN 26891* [17]. Laut diesem normativen Dokument kommt demnach ein kombiniertes last- und weggesteuertes Belastungsverfahren auf Basis einer geschätzten Höchstlast F_{est} zum Einsatz, wobei sich die vorhandene Schubtragfähigkeit F_{vR} als repräsentativ im Vergleich zur geschätzten Höchstlast F_{est} ($F_{vR} = F_{est} \pm 20\%$) zu erweisen hat, siehe hierzu auch nachfolgend Abb. 3.5 (links).

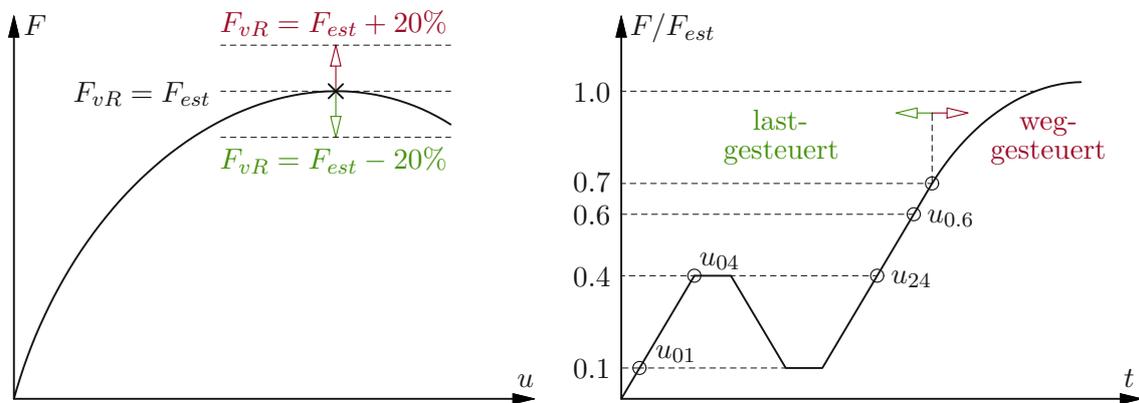


Abb. 3.5: Tragfähigkeit und Steifigkeit einer Schubverbindung gemäß *ONR CEN/TS 19103* [3] und *ÖNORMEN 26891* [17] | Traglastbereich der Schubtragfähigkeit F_{vR} (links), Allgemeines Lastregime zur experimentellen Ermittlung des Trag- und Verformungsverhaltens anhand von Versuchen an Push Out Probekörpern (rechts)

Betrachtet man den genannten Zusammenhang gemäß Abb. 3.5 (links), wird klar, dass das durch den experimentellen Versuch bereits a priori beeinflusste Verhältnis zwischen geschätzter Höchstlast F_{est} und tatsächlich vorhandener Schubtragfähigkeit F_{vR} den Bezugsbereich zur Ermittlung der Verschiebungsmoduln für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit K_i bzw. K_{ser} , und somit auch die tatsächlichen resultierenden Größen dieser Entitäten, wesentlich tangiert.

Die genannten indirekt bestimmten physikalischen Messgrößen werden demnach direkt durch einen vom eigentlichen Versuch unabhängigen Parameter beeinflusst, wodurch grundsätzlich eine prinzipiell ungewünschte Streuung der Ergebnisgrößen entstehen kann. Dieser Umstand wird bereits durch *Dias* [19] kritisch hinterfragt, findet allerdings keine direkte Berücksichtigung im sinnverwandten normativen Dokument *ONR CEN/TS 19103* [3]. Aus Sicht des Autors bedarf es in diesem Kontext daher einer eigentlich genaueren normativen Definition bzw. eines aktualisierten Auswertungsverfahrens gemäß *ÖNORMEN 26891* [17] zur Bestimmung der Verschiebungsmoduln für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit einer Schubverbindung. Detailliertere Zugänge zu diesem Ansatz finden sich demnach

ebenso in den Folgekapiteln der maßgebenden experimentellen und numerischen Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten des untersuchten Verbunddeckensystems.

3.2.2 Duktilität einer Verbindung

Neben Tragfähigkeit und Steifigkeit einer Schubverbindung kann die Duktilität einer Verbindung als wesentliche mechanische Entität genannt werden. Wiederum aufbauend auf dem eingangs beschriebenen idealisierten Verhalten einer Schubverbindung als nicht-lineares Federelement soll das spezifische Trag- und Verformungsverhalten ebendieser weiterführend ebenso auf Basis der gegebenen Duktilität der Verbindung beschrieben werden. Im konkreten kontextuellen Zusammenhang handelt es sich hierbei um das vorhandene bzw. erzielbare Plastifizierungspotential der Schubverbindung, wie nachfolgend aus Abb. 3.6 entnommen werden kann.

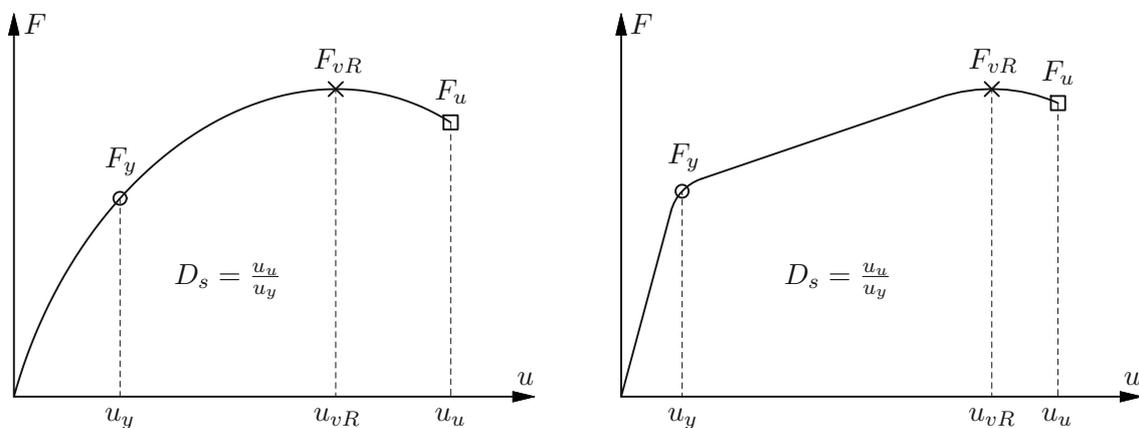


Abb. 3.6: Duktilität einer Schubverbindung | Idealisertes Verhalten auf Basis unterschiedlicher beispielhafter nicht-linearer Federelemente, nicht ausgeprägter Fließübergang (links), ausgeprägter Fließübergang (rechts)

Wie in Abb. 3.6 dargestellt, definiert sich das für das Plastifizierungspotential maßgebende Duktilitätsmaß D_s als Quotient der maximal erreichbaren Grenzverschiebung u_u bei einer vorhandenen Bruchlast F_u und der resultierenden Fließverschiebung u_y bei einer auftretenden Fließlast F_y . Das Duktilitätsmaß D_s stellt demnach einen Proportionalitätsfaktor in Abhängigkeit der beschriebenen Verschiebungen dar, wobei diese wiederum wesentlich durch die Art und Form des gegebenen Last-Verschiebungs-Zusammenhangs bzw. durch die Ausprägung des vorhandenen Fließübergangs beeinflusst werden.

Mit Bezug auf die maßgebende Fließverschiebung u_y kann aus diesem Kontext heraus schlussfolgernd ein diametrales Spektrum an möglichen Ausprägungsformen des vorhandenen Fließübergangs erkannt werden, wodurch eine triviale Bestimmung der genannten Fließverschiebung u_y als teilweise schwierig erscheint. In diesem Zusammenhang stehen für reale Verbindungen weiterführend unterschiedliche verschiebungs- bzw. energiebasierte, normativ verankerte bzw. normativ nicht verankerte, Konzepte zur Bestimmung dieser Entität zur Verfügung. Als beispielhafte Verfahren können hierbei unter anderem die Ansätze

nach *Karacabeyli* und *Ceccotti* [20] oder *Yasumura* [21], sowie nach *ASTM E2126-19* [22] genannt werden.

Das für Schubverbindungen repräsentative normative Dokument *ONR CEN/TS 19103* [3] bezieht sich in diesem Zusammenhang auf die *ÖNORM EN 12512* [23], wonach die resultierende Fließverschiebung u_y in Abhängigkeit der Ausprägungsform des Fließübergangs anhand eines grafischen, verschiebungsbasierten Verfahrens ermittelt wird, wie nachfolgend aus Abb. 3.7 ersichtlich.

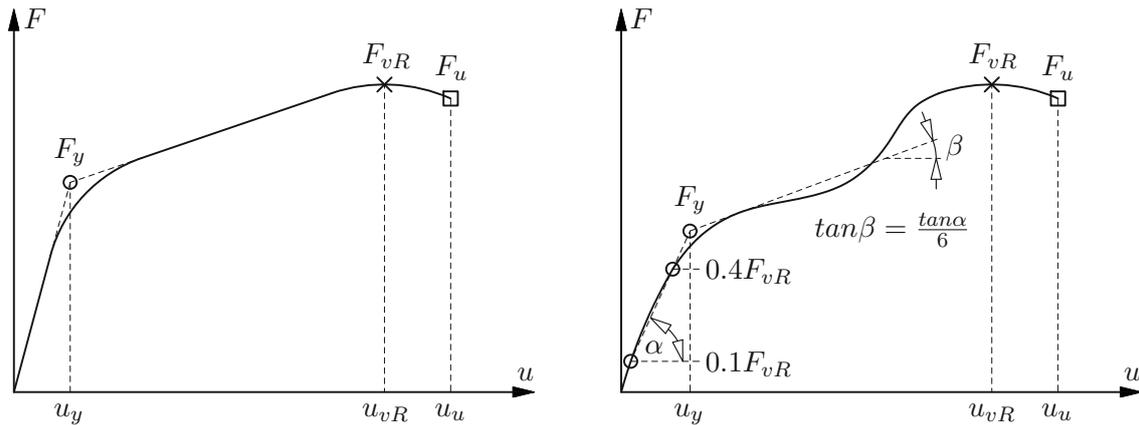


Abb. 3.7: Duktilität einer Schubverbindung gemäß *ONR CEN/TS 19103* [3] und *ÖNORM EN 12512* [23] | Bestimmung der Fließverschiebung u_y bei zwei eindeutigen linearen Anteilen (links), Bestimmung der Fließverschiebung u_y bei zwei nicht eindeutigen linearen Anteilen (rechts)

ÖNORM EN 12512 [23] unterscheidet gemäß Abb. 3.7 folglich nach dem Vorhandensein eindeutiger Bilinearitäten innerhalb des gegebenen Last-Verschiebungs-Zusammenhangs. Beinhaltet der Verlauf zwei eindeutige lineare Anteile (siehe Abb. 3.7 links) können die auftretende Fließlast F_y und die daraus resultierende Fließverschiebung u_y trivial aus dem Schnittpunkt der beiden Linearanteile bestimmt werden.

Besitzt der gegebene Verlauf zwei nicht eindeutige lineare Anteile (siehe Abb. 3.7 rechts) können die auftretende Fließlast F_y und die daraus resultierende Fließverschiebung u_y wiederum nach einem grundsätzlich äquivalenten Prozedere abgeleitet werden, allerdings muss der besagte Schnittpunkt hierbei auf Basis zweier fiktiver Linearanteile bestimmt werden. In diesem Kontext handelt es sich einerseits um die Sekante im Bereich zwischen 10% und 40% der Schubtragfähigkeit F_{vR} unter dem Winkel α , sowie andererseits um die auf diesem Winkel beruhende Tangente des weiterführenden Verlaufs des Last-Verschiebungszusammenhangs unter dem Winkel β ($\tan\beta = \frac{\tan\alpha}{6}$).

Neben der resultierenden Fließverschiebung u_y unter einer Fließlast F_y wird die weiterführende Bestimmung des maßgebenden Duktilitätsmaß D_s ebenso wesentlich durch die Grenzverschiebung u_u unter einer vorhandenen Bruchlast F_u beeinflusst. Wie bereits einleitend erwähnt bzw. dargestellt, zeigt sich die vorhandene Bruchlast F_u grundsätzlich als Last bei einer maximal erreichbaren Verschiebung des gegebenen Last-Verschiebungszusammenhangs, mit Bezug auf *ONR CEN/TS 19103* [3] und *ÖNORM EN 12512* [23] bedarf es in diesem Zusammenhang allerdings noch einer genaueren Definition dieser

Größe in Abhängigkeit der jeweiligen Charakteristik der vorliegenden Schubverbindung, wie nachfolgend aus Abb. 3.8 entnommen werden kann.

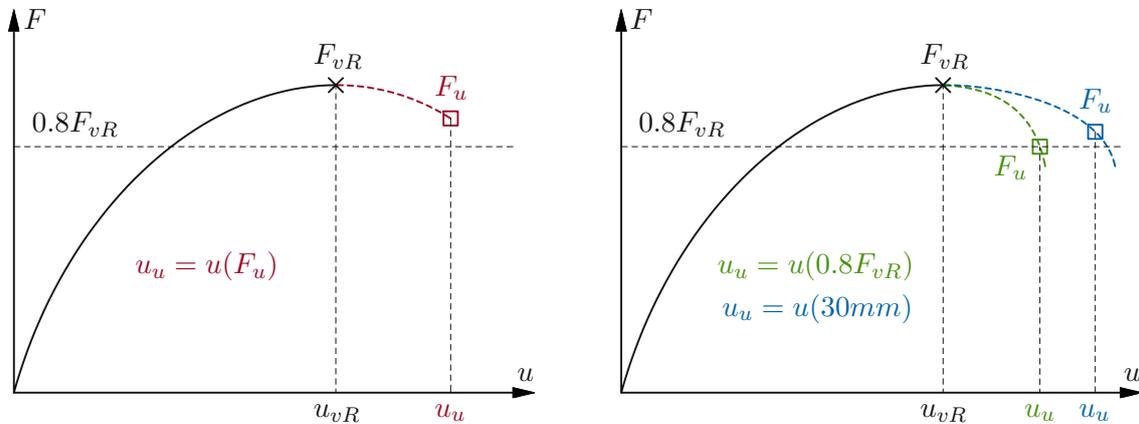


Abb. 3.8: Duktilität einer Schubverbindung gemäß *ONR CEN/TS 19103* [3] und *ÖNORM EN 12512* [23] | Grenzverschiebung u_u bei $F_u > 0.8F_{vR}$ (links), Grenzverschiebungen u_u bei $F_u = 0.8F_{vR}$ bzw. $u_u = 30\text{mm}$ (rechts)

So definieren sich die vorhandene Bruchlast F_u und die daraus resultierende Grenzverschiebung u_u gemäß *ÖNORM EN 12512* [23] laut Abb. 3.8 in Abhängigkeit der vorhandenen Entfestigungscharakteristik nach dem Erreichen der Schubtragfähigkeit F_{vR} . Tritt ein Versagen der Schubverbindung vor dem Erreichen einer um 20% reduzierten Schubtragfähigkeit ($0.8F_{vR}$) auf, werden Bruchlast F_u und Grenzverschiebung u_u nach dem bereits beschriebenen konventionellen Konzept der maximal erreichbaren Grenzverschiebung bestimmt (siehe Abb. 3.8 links). Weist die gegebene Schubverbindung jedoch ein tatsächliches Versagen erst nach dem Erreichen einer um 20% reduzierten Schubtragfähigkeit ($0.8F_{vR}$) auf, erfolgt die Bestimmung von Bruchlast F_u und Grenzverschiebung u_u auf Basis dieses genannten Grenzlastniveaus bzw. bei darüber hinaus vorliegenden höheren maximalen Verschiebungen anhand eines Grenzverschiebungsniveaus bei einer maximalen Grenzverschiebung von $u_u = 30\text{mm}$ (siehe Abb. 3.8 rechts).

3.3 Auftretende Schädigungs- und Versagensmechanismen unterschiedlicher Typologien von Schubverbindersystemen

Aufbauend auf der vorangegangenen dargebrachten idealisierten Beschreibung des Trag- und Verformungsverhaltens einer allgemeinen Schubverbindung und den damit in Verbindung stehenden mechanischen Struktureigenschaften ebendieser soll nachfolgend in detaillierter Form auf die explizit auftretenden Schädigungs- und Versagensmechanismen der einleitend erwähnten Typologien von Schubverbindersystemen eingegangen werden.

Wie in diesem Sinne gemäß Abb. 3.1 bereits beschrieben, kann das für den Untersuchungsgegenstand relevante Spektrum an Schubverbindersystemen folglich grundsätzlich in die

Kategorien I bis IV unterteilt, sowie können darauf aufbauend die Teilbereiche *punktförmige Verbindungen mit stiftförmigen VM*, *linienförmige Verbindungen mit Schublechen und stiftförmigen VM*, sowie *punktförmige Verbindungen mit Kernen und eventuell vorhandenen stiftförmigen VM* unterschieden werden. Basierend auf dieser Subkategorisierung soll demnach die nachfolgende Beschreibung auftretender Schädigungs- und Versagensmechanismen bei unterschiedlichen Arten von Schubverbindersystemen erfolgen.

3.3.1 Punktförmige Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln

Maßgebende Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen von *punktförmigen Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln* bei Holz-Beton-Verbundkonstruktionen charakterisieren sich durch definierte Ausprägungsformen, welche grundsätzlich in äquivalenter Form ebenso bei einschnittigen Holz-Holz-Verbindungen auftreten. Diese umfassen im Allgemeinen sechs verschiedene Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen welche erstmalig durch *Johansen* [24] kategorisiert und mathematisch festgehalten wurden. Aufbauend auf diesen Annahmen können die maßgeblichen Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen von punktförmigen Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln in für Holz-Beton-Verbundkonstruktionen adaptierter Form, wie auch in *ONR CEN/TS 19103* [3] und *ÖNORM B 1995-1-1* [12] festgehalten, wie folgt dargestellt und beschrieben werden¹.

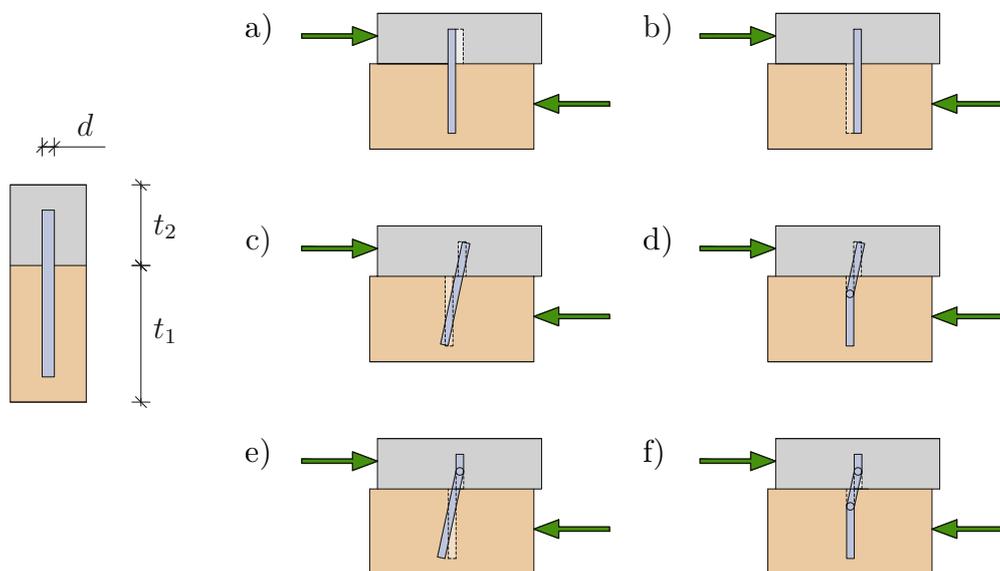


Abb. 3.9: Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen bei punktförmigen Verbindungen mit stiftförmigen VM (adaptiert nach *Johansen* [24]): a) Lochreibung Beton, b) Lochreibung Holz, c) Lochreibung Holz und Beton sowie Rotation VM, d) Lochreibung Beton sowie Fließgelenk im VM, e) Lochreibung Holz sowie Fließgelenk im VM, f) Lochreibung Holz und Beton sowie Fließgelenke im VM

¹Die dargestellten repräsentativen Gleichungen beziehen sich hierbei auf charakteristische Werte der maßgebenden Entitäten.

$$F_{vR(a)} = f_{h,1} \cdot t_1 \cdot d \quad (3.1)$$

$$F_{vR(b)} = 3f_c \cdot t_2 \cdot d \quad (3.2)$$

$$F_{vR(c)} = \frac{f_{h,1} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,R}}{4} \quad (3.3)$$

$$F_{vR(d)} = 1,05 \cdot \frac{f_{h,1} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,R}}{f_{h,1} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,R}}{4} \quad (3.4)$$

$$F_{vR(e)} = 1,05 \cdot \frac{f_{h,1} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta)M_{y,R}}{f_{h,1} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,R}}{4} \quad (3.5)$$

$$F_{vR(f)} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,R} \cdot f_{h,1} \cdot d} + \frac{F_{ax,R}}{4} \quad (3.6)$$

$$\text{mit: } \beta = \frac{3f_c}{f_{h,1}} \quad (3.7)$$

Wie aus Abb. 3.9 ersichtlich, definieren sich die maßgebenden Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen von punktförmigen Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln durch jeweils vereinzelt oder kombiniert auftretende Versagensformen bestehend aus durchgehend vorhandenen Lochleibungskomponenten sowie zusätzlichen translatorischen oder rotatorischen Bewegungen bzw. Verformungen der Verbindungsmittel. Insgesamt resultieren somit wie bereits eingangs erwähnt sechs unterschiedliche Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen welche gemäß der vorhandenen Beschreibung aus Abb. 3.9 unterschieden werden können.

3.3.2 Linienförmige Verbindungen mit Schublechen und stiftförmigen Verbindungsmitteln

Maßgebende Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen von *linienförmigen Verbindungen mit Schublechen und stiftförmigen Verbindungsmitteln* bei Holz-Beton-Verbundkonstruktionen charakterisieren sich im Allgemeinen in ähnlicher Form wie die bereits beschriebenen punktförmigen Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln.

So können diese wiederum auf Basis der Annahmen durch *Johansen* [24] (in allerdings vereinfachter Weise) dargestellt werden, bzw. sind diese in äquivalenter Form ebenso in *ÖNORM B 1995-1-1* [12] festgehalten. In diesem Kontext können für linienförmige Verbindungen mit Schublechen und stiftförmigen Verbindungsmitteln weiterführend fünf maßgebende Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen abgeleitet werden, welche in adaptierter Form für Holz-Beton-Verbundkonstruktionen wie folgt dargestellt und beschrieben werden

können². Hierbei sei zusätzlich erwähnt, dass die Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen von linienförmigen Verbindungen mit Schublechen grundsätzlich in Abhängigkeit ihrer Blechstärke t_2 variieren, und diese in ihrer Kategorisierung daher eine Unterteilung in *dünnwandige* und *dickwandige* Schubleche ($t_2 \leq 0.5d$ dünnwandig, $t_2 \geq d$ dickwandig) erfordern. Der Bereich zwischen den genannten Randbedingungen ($0.5d < t_2 < d$) kann darüber hinaus als Überlagerungsbereich ebendieser verstanden werden. Hinsichtlich der repräsentativen Gleichungen darf hierbei somit auch eine Interpolation zur analytischen Bestimmung der maßgebenden Entitäten verwendet werden.

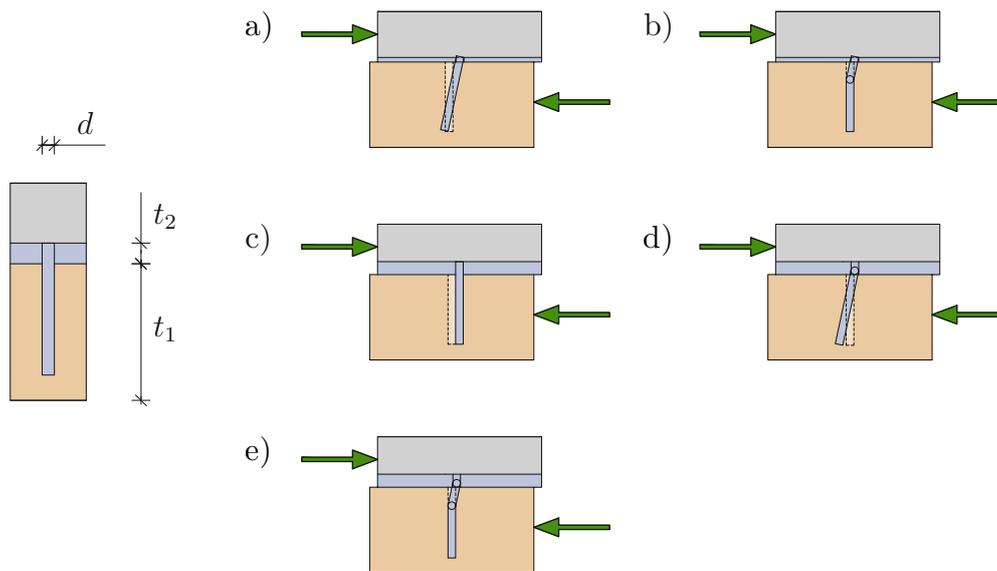


Abb. 3.10: Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen bei linienförmigen Verbindungen mit Schublechen und stiftförmigen VM (adaptiert nach *Johansen* [24]): a) Lochleibung Holz sowie Rotation VM bei dünnwandigem Schublech, b) Lochleibung Holz sowie Fließgelenk im VM bei dünnwandigem Schublech, c) Lochleibung Holz bei dickwandigem Schublech, d) Lochleibung Holz sowie Fließgelenk im VM bei dickwandigem Schublech, e) Lochleibung Holz sowie Fließgelenke im VM bei dickwandigem Schublech

$$F_{vR(a)} = 0,4 \cdot f_{h,1} \cdot t_1 \cdot d \quad (3.8)$$

$$F_{vR(b)} = 1,15 \cdot \sqrt{2M_{y,R} \cdot f_{h,1} \cdot d} + \frac{F_{ax,R}}{4} \quad (3.9)$$

$$F_{vR(c)} = f_{h,1} \cdot t_1 \cdot d \quad (3.10)$$

²Die dargestellten repräsentativen Gleichungen beziehen sich hierbei wiederum auf charakteristische Werte der maßgebenden Entitäten.

$$F_{vR(d)} = f_{h,1} \cdot t_1 \cdot d \left[\sqrt{2 + \frac{4M_{y,R}}{f_{h,1} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,R}}{4} \quad (3.11)$$

$$F_{vR(e)} = 2,3 \cdot \sqrt{M_{y,R} \cdot f_{h,1} \cdot d} + \frac{F_{ax,R}}{4} \quad (3.12)$$

Wie aus Abb. 3.10 ersichtlich, definieren sich die maßgebenden Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen von linienförmigen Verbindungen mit Schublechen und stiftförmigen Verbindungsmitteln wiederum durch jeweils vereinzelt oder kombiniert auftretende Versagensformen bestehend aus einer durchgehend vorhandenen Lochleibungskomponente sowie zusätzlichen translatorischen oder rotatorischen Bewegungen bzw. Verformungen der Verbindungsmittel. Insgesamt resultieren somit wie bereits eingangs erwähnt fünf unterschiedliche Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen welche gemäß der vorhandenen Beschreibung aus Abb. 3.10 unterschieden werden können.

Darüber hinaus sei hierzu angemerkt, dass grundsätzlich auch Nagelplatten eine Form von linienförmiger Verbindung mit Schublechen und stiftförmigen Verbindungsmitteln darstellen. Für diese Verbindungstypologie reduzieren sich folglich die maßgebenden Schädigungs- und Versagensmechanismen auf die Fälle c) bis e), da hierbei eine nichtgelenkige Verbindung im Nagelfalz zur Verfügung steht. Die dargestellten repräsentativen Gleichungen können für diese Typologie schlussfolgernd auch nur in typologisch entsprechend adaptierter Form Gültigkeit besitzen.

3.3.3 Punktförmige Verbindungen mit Kernen und eventuell vorhandenen stiftförmigen Verbindungsmitteln

Maßgebende Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen von *punktförmigen Verbindungen mit Kernen und eventuell vorhandenen stiftförmigen Verbindungsmitteln* charakterisieren sind im Allgemeinen durch definierte Ausbildungsformen, welche sich grundsätzlich in Versagensformen der jeweiligen Kernen sowie der eventuell zusätzlich vorhandenen stiftförmigen Verbindungsmittel unterteilen lassen.

Die auftretenden Schädigungs- und Versagensmechanismen der stiftförmigen Verbindungsmittel stellen sich dabei als äquivalent zu den bereits beschriebenen Versagensformen von ebendiesen dar. Dementsprechend beziehen sich die nachfolgenden Ausführungen hierbei ausschließlich auf die maßgebenden Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen der Kernen, für etwaige Erläuterungen zu stiftförmigen Verbindungsmitteln sei auf die vorangegangenen beschriebenen Ausführungen gemäß *Kapitel 3.3.1* verwiesen. In diesem Kontext können für punktförmige Verbindungen mit Kernen gemäß *ONR CEN/TS 19103* [3] weiterführend vier maßgebende Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen abgeleitet werden, welche wie folgt dargestellt und beschrieben werden können³.

³Die dargestellten repräsentativen Gleichungen beziehen sich hierbei, wenn nicht explizit anders in den Indizes vermerkt, auf Design-Werte der maßgebenden Entitäten.

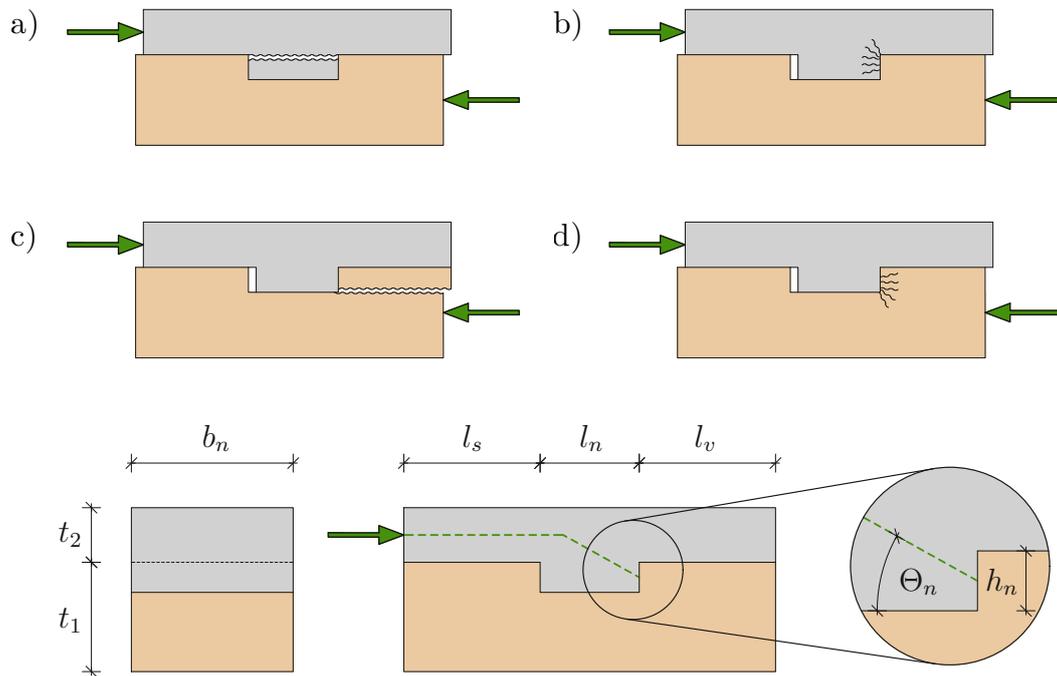


Abb. 3.11: Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen bei punktförmigen Verbindungen mit Kerfen und eventuell vorhandenen stiftförmigen Verbindungsmitteln: a) Schubversagen Beton, b) Druckversagen Beton, c) Schubversagen Holz, d) Druckversagen Holz

$$F_{vR(a)} = \frac{0.6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \cdot f_c}{\cot\Theta_n + \tan\Theta_n} \quad (3.13)$$

$$F_{vR(b)} = f_c \cdot b_n \cdot h_n \quad (3.14)$$

$$F_{vR(c)} = 8 \cdot k_{cr} \cdot f_{v,1} \cdot b_n \cdot h_n \quad (3.15)$$

$$F_{vR(d)} = f_{c,0} \cdot b_n \cdot h_n \quad (3.16)$$

$$\text{mit: } \Theta_n = \max \left\{ \arctan \frac{0.5(t_2 + h_n)}{l_n + l_s}; \arctan \frac{h_n}{l_n} \right\} \quad (3.17)$$

Wie aus Abb. 3.11 ersichtlich, definieren sich die maßgebenden Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen von punktförmigen Verbindungen mit Kerfen durch vereinzelt auftretende Versagensformen bestehend aus Schub- oder Druck-Versagensmodi der beteiligten Verbundpartner Holz und Beton, jeweils resultierend aus einer lastbedingten Stauchung der Kerfenflanke. Insgesamt resultieren somit wie bereits eingangs erwähnt vier unterschiedliche Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen welche gemäß der vorhandenen Beschreibung aus Abb. 3.11 unterschieden werden können.

3.4 Systemrelevante Ausführungsvarianten

Basierend auf den vorangegangenen gezeigten allgemeinen Darstellungen der maßgebenden Entitäten aller untersuchungsrelevanten Schubverbindersysteme bei Holz-Beton-Verbundkonstruktionen sollen nachfolgend entsprechend systemrelevante Ausführungsvarianten anhand von kontextuell richtungsweisenden bestehenden Forschungsarbeiten zusammengetragen und vergleichend betrachtet werden.

Hierzu werden insgesamt 37 unterschiedliche Versuchsreihen aus aktuellen und vergangenen Publikationen untersucht und vereinheitlicht gegenübergestellt. Explizite Berücksichtigung finden hierbei Typologien von Schubverbindersystemen welche sich kontextuell in die vorangegangenen beschriebenen Teilbereiche *punktförmige Verbindungen mit stiftförmigen VM*, *linienförmige Verbindungen mit Schublechen und stiftförmigen VM*, sowie *punktförmige Verbindungen mit Kernen und eventuell vorhandenen stiftförmigen VM* eingliedern. Etwaige andere gängige Typologien von Schubverbindern finden daher sinngemäß keine weitere Beachtung innerhalb dieser Analyse. Basierend auf diesen Annahmen können dementsprechend folgende Typologien von Schubverbindersystemen in folgendem Umfang kategorisch untersucht und analysiert werden:

- Stiftförmige glattschaftige/profilierete VM - 90°
 - Versuchsreihen: 5, Bezeichnung: St-gp-90°-1 bis 5
- Stiftförmige geschraubte VM - 90°
 - Versuchsreihen: 6, Bezeichnung: St-g-90°-1 bis 6
- Stiftförmige geschraubte VM - 45°
 - Versuchsreihen: 3, Bezeichnung: St-g-45°-1 bis 3
- Nagelplatten
 - Versuchsreihen: 3, Bezeichnung: Npl-1 bis 3
- Schubleche mit geschraubten VM - 90°
 - Versuchsreihen: 4, Bezeichnung: Bl-g-90°-1 bis 4
- Kernen ohne VM spröde
 - Versuchsreihen: 6, Bezeichnung: Ke-oVMs-1 bis 6
- Kernen ohne VM duktil
 - Versuchsreihen: 5, Bezeichnung: Ke-oVMd-1 bis 5
- Kernen mit stiftförmigen geschraubten VM - 90°
 - Versuchsreihen: 5, Bezeichnung: Ke-mVM-1 bis 5

Ziel dieser Analyse soll es dabei sein, einerseits die am untersuchten Verbundsystem applizierten divergenten Schubverbindersysteme hinsichtlich ihrer grundsätzlichen Eignung für den Forschungszweck zu bestätigen, sowie andererseits darüber hinaus programmatische Randbedingungen für alle weiterführenden Forschungsaktivitäten abzuleiten und das forschungsrelevante Verbunddeckensystem auf Basis dieser zu untersuchen. Hierzu werden die allgemeinen Last-Verschiebungszusammenhänge der einzelnen Versuchsreihen in normierter Form⁴ zusammengetragen, und weiterführend hinsichtlich ihres Trag- und Verformungsverhaltens bzw. ihrer maßgebenden Schädigungs- und Versagensmechanismen qualitativ untersucht, sowie mit Blick auf ihre quantitativen mechanischen Entitäten aufbereitet und bewertet.

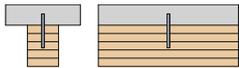
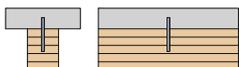
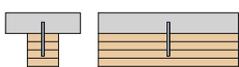
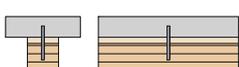
Auf Basis dieser Untersuchungen können somit abschließend systematische Vergleichsbetrachtungen an den einzelnen komparativen Strukturkonzepten durchgeführt werden, sowie werden außerdem maßgebende Rückschlüsse auf die Systemeigenschaften der einzelnen relevanten Typologien von Schubverbindersystemen ermöglicht.

Hinsichtlich der systemischen Darstellungform der Ergebnisse sei abschließend erwähnt, dass die jeweiligen Typologien von Schubverbindersystem einerseits konkludierend tabellarisch, grafisch und textlich aufbereitet nachfolgend zur Verfügung stehen, sowie andererseits aber auch in weitgewandterer Form tabellarisch aus *Anhang A* entnommen werden können.

⁴Alle Verbindungstypologien werden hierbei auf einen einzelnen *fiktiven Verbindungspunkt* bezogen. So werden hierzu *punktförmige Verbindungen mit stiftförmigen VM* entsprechend den mechanischen Entitäten eines einzelnen Verbindungsmittels dargestellt. *Linienförmige Verbindungen mit Schublechen und stiftförmigen VM* werden entsprechend den mechanischen Entitäten einer Längenausdehnung von 10 cm dargestellt. *Punktförmige Verbindungen mit Kernen und eventuell vorhandenen stiftförmigen VM* werden entsprechend den mechanischen Entitäten einer Breitenausdehnung von 10 cm dargestellt.

3.4.1 Stifförmige glattschaftige/profilierete VM - 90°

Tab. 3.1: Typologie stiftörmige glattschaftige/profilierete VM - 90° | Übersicht

Bezeichnung	Quellenbez. bzw. Quelle	K_{ser} [kN/mm]	F_{vR} [kN]	D_s [-]	Prinzipiskizze
St-gp-90°-1 (VH)	C [25]	2.95	2.79	29.28	
St-gp-90°-2 (BSH)	8mm [19]	5.75	6.80	19.83	
St-gp-90°-3 (BSH)	10mmA [19]	7.60	11.30	16.48	
St-gp-90°-4 (BSH)	10mmB [19]	8.55	17.15	7.56	
St-gp-90°-5 (BSH)	INT [19]	5.58	15.83	7.88	

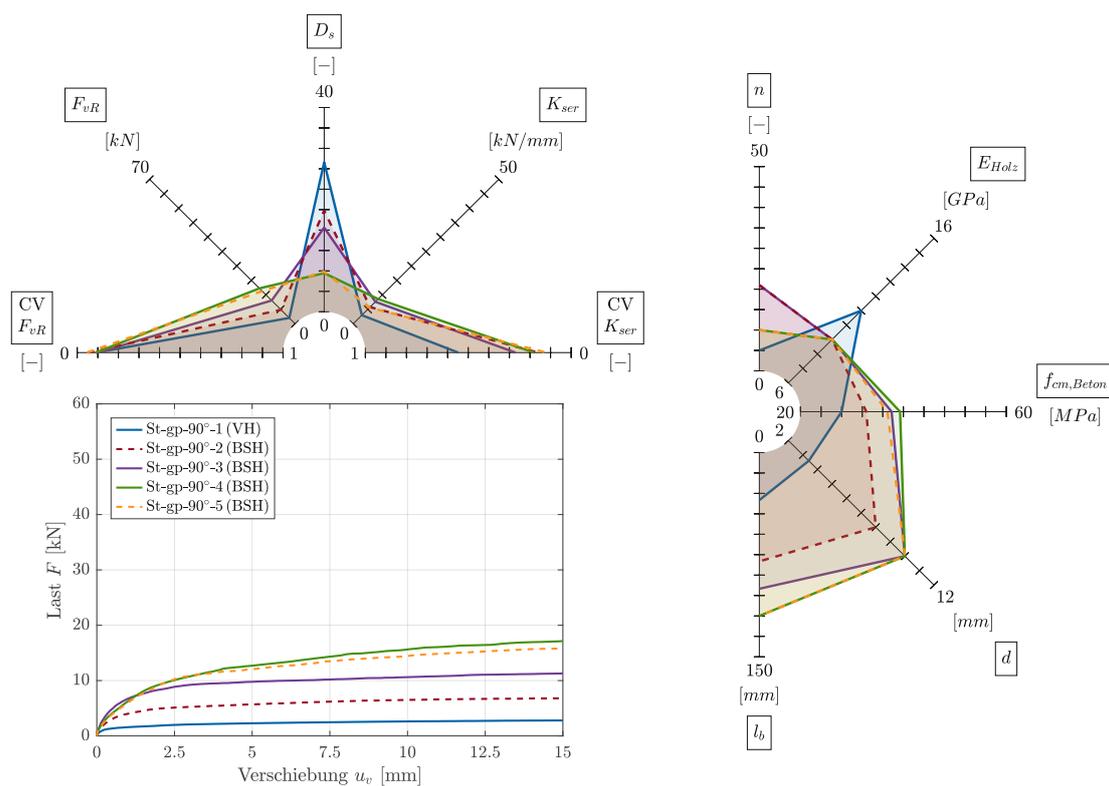


Abb. 3.12: Typologie stiftörmige glattschaftige/profilierete VM - 90° | Netzdiagramm (oben links und rechts), Last-Verschiebungs-Diagramm (unten links)

Wie aus der kumulierten Ergebnisdarstellung gemäß Tab. 3.1 und Abb. 3.12 ersichtlich, umfasst die untersuchte Typologie der *stiftörmigen glattschaftigen/profiliereten VM - 90°*

insgesamt fünf verschiedene Versuchsreihen aus zwei unterschiedlichen Quellen nach *Branco* [25] und *Dias* [19]. Die die Anzahl n der einzelnen Probekörper der für diese Typologie betrachteten Versuchsreihen liegt dabei in einem moderaten bis hohen Bereich zwischen 5 und 21 Proben. Gemäß den Darstellungen laut Tab. 3.1 definieren sich die einzelnen Versuchsreihen durch den Einsatz unterschiedlicher Holzwerkstoffe in der jeweiligen Ausführung. So charakterisiert sich die Versuchsreihe St-gp-90°-1 durch eine Ausführung aus Vollholz und alle anderen Versuchsreihen durch den Einsatz von Brettschichtholz. Darüber hinaus definieren sich die einzelnen Versuchsreihen durch unterschiedliche Formen von glattschaftigen/profilierten Verbindungsmitteln, wobei wiederum die Versuchsreihe St-gp-90°-1 ein Alleinstellungsmerkmal in Form einer Ausführung mit Nägeln aufweist, sowie demgegenüber sich die Versuchsreihen St-gp-90°-2 bis 5 durch eine Applikation mit Stabdübeln aus Bewehrungsstahl charakterisieren. Entsprechend dieser spezifischen Beschaffenheiten zeigen sich auch die geometrischen Eigenschaften der einzelnen Versuchsreihen. So weist die Versuchsreihe St-gp-90°-1 einen nur geringen Verbindungsmitteldurchmesser d von 3,40 mm bei einer ebenfalls geringen Einbindetiefe l_b von 35 mm auf, während sich die Versuchsreihen St-gp-90°-2 bis 5 anhand von erhöhten Verbindungsmitteldurchmessern d von 8 bis 10 mm und erhöhten Einbindetiefen l_b von 80 bis 120 mm definieren.

Hinsichtlich dem allgemeinen Trag- und Verformungsverhalten dieser Typologie charakterisieren sich alle Versuchsreihen durch ein kontinuierliches Last-Verschiebungs-Verhalten mit nur sehr geringem linear-elastischen Verformungsanteil gefolgt von einem ausgeprägten Fließplateau mit teilweise mäßig vorhandenem Verfestigungsanteil bis zum Erreichen der maximalen erreichbaren Grenzverschiebung u_u . Dementsprechend ebenfalls einheitlich repräsentieren sich auch die hierbei auftretenden Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen in Form einer Lochleibung im Verbundpartner Holz sowie durch eine Fließgelenksausbildung in den Verbindungsmitteln. Mit Bezug auf die maßgebenden mechanischen Entitäten zeigt diese Typologie äußerst homogene Zusammenhänge, welche durch unterschiedliche Proportionalitäten ausgedrückt werden können. So charakterisieren sich diese Versuchsreihen durch geringe Schubtragfähigkeiten F_{vR} von 2.79 bis 17.15 kN, wobei sich die einzelnen Werte dabei direkt proportional zu den jeweiligen Verbindungsmitteldurchmessern d darstellen. Darüber hinaus lässt sich ein direkt proportionaler Zusammenhang zwischen der Einbindetiefe l_b und der resultierenden Schubtragfähigkeit F_{vR} feststellen. Auf Basis einer gesteigerten Einbindetiefe l_b kann demnach eine gesteigerte Schubtragfähigkeit F_{vR} erreicht werden.

Nach einem ebenfalls direkt proportionalen Prinzip stellen sich darüber hinaus auch die Verschiebungsmoduln K_{ser} dar, welche in diesem Kontext in einem geringen Bereich von 2.95 bis 8.55 kN/mm liegen. Einzige Ausnahme von diesem Zusammenhang stellt die Versuchsreihe St-gp-90°-5 dar, da diese in ihrem strukturellen Aufbau zusätzlich über eine Zwischenlage zwischen den Verbundpartnern Holz und Beton verfügt. Eine qualitativ verringerte Wirkung auf diese explizite mechanische Entität wird durch den Einsatz einer Zwischenlage daher offensichtlich. Mit Bezug auf das jeweilige Duktilitätsmaß der Verbindungen D_s kann abschließend darüber hinaus ein indirekt proportionaler Zusammenhang zwischen dem Verbindungsmitteldurchmesser d und genannter Größe erkannt werden, wobei sich die vorliegende Typologie hierbei durch in einem moderaten bis sehr hohen Bereich liegende Werte zwischen 7.56 und 29.28 auszeichnet.

3.4.2 Stiffförmige geschraubte VM - 90°

Tab. 3.2: Typologie stiffförmige geschraubte VM - 90° | Übersicht

Bezeichnung	Quellenbez. bzw. Quelle	K_{ser} [kN/mm]	F_{vR} [kN]	D_s [-]	Prinzipiskizze
St-g-90°-1 (FSH)	NS Series [26]	14.70	10.90	14.83	
St-g-90°-2 (FSH)	Single WS [27]	12.30	10.90	16.65	
St-g-90°-3 (VH)	S90-HA12 [28]	16.10	23.80	13.06	
St-g-90°-4 (VH)	STRW [29]	19.20	28.60	25.10	
St-g-90°-5 (VH)	SW [28]	5.19	23.90	5.87	
St-g-90°-6 (VH)	Test [30]	2.12	16.60	11.24	

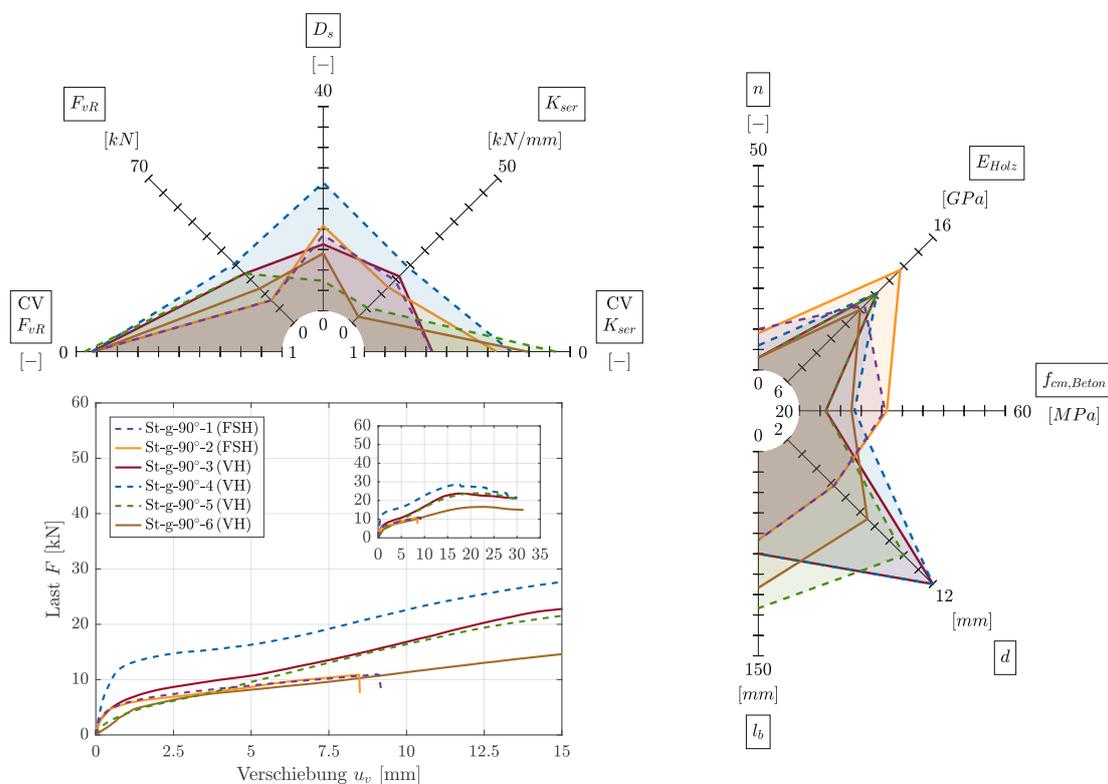


Abb. 3.13: Typologie stiffförmige geschraubte VM - 90° | Netzdiagramm (oben links und rechts), Last-Verschiebungs-Diagramm (unten links)

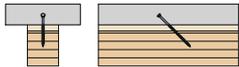
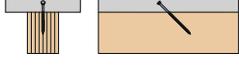
Wie aus der kumulierten Ergebnisdarstellung gemäß Tab. 3.2 und Abb. 3.13 ersichtlich, umfasst die untersuchte Typologie der *stiftförmigen geschraubten VM - 90°* insgesamt sechs verschiedene Versuchsreihen aus fünf unterschiedlichen Quellen nach *Khorsandnia* [26], *Moshiri* [27], *Djoubissie* [28, 29] und *Oudjene* [30]. Die Anzahl n der einzelnen Probekörper der für diese Typologie betrachteten Versuchsreihen liegt dabei in einem geringen bis moderaten Bereich zwischen 3 und 10 Proben. Gemäß den Darstellungen laut Tab. 3.2 definieren sich die einzelnen Versuchsreihen durch den Einsatz unterschiedlicher Holzwerkstoffe in der jeweiligen Ausführung. So charakterisieren sich die Versuchsreihen St-g-90°-1 und 2 durch eine Ausführung aus Furnierschichtholz und alle anderen Versuchsreihen durch den Einsatz von Vollholz. Darüber hinaus definieren sich die einzelnen Versuchsreihen durch unterschiedliche Formen von geschraubten Verbindungsmitteln, wobei die Versuchsreihen St-g-90°-3 und 4 eine Ausführung in Form von geschraubten Stabdübeln aus Bewehrungsstahl aufweisen, sowie demgegenüber sich alle anderen Versuchsreihen durch eine Applikation mit Holzbau- bzw. Verbundschrauben darstellen. Entsprechend dieser spezifischen Beschaffenheiten charakterisieren sich die vorhandenen Verbindungsmitteldurchmesser d durch ein breites Spektrum von 5.20 bis 12 mm bei ebenso variierenden Einbindetiefen l_b von 65 bis 115 mm.

Hinsichtlich dem allgemeinen Trag- und Verformungsverhalten dieser Typologie charakterisieren sich die Versuchsreihen durch ein kontinuierliches Last-Verschiebungs-Verhalten mit nur sehr geringem linear-elastischen Verformungsanteil gefolgt von einem ausgeprägten Fließbereich mit durchgehend vorhandenem Verfestigungsanteil bis zum Erreichen einer Verschiebung u_{vR} im Bereich der Schubtragfähigkeit F_{vR} , wiederum gefolgt von einer teilweise vorhandenen Entfestigungscharakteristik. Als maßgebend vorhandene Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen können in diesem Zusammen eine Lochleibung im Verbundpartner Holz (bei Versuchsreihe St-g-90°-1 ebenfalls Lochleibung Beton) sowie eine Fließgelenkbildung in den Verbindungsmitteln mit teilweise vorhandenem Bruch beim Erreichen der Schubtragfähigkeit F_{vR} ($u_{vR} = u_u$, bei den Versuchsreihen St-g-90°-1 und 2) genannt werden.

Mit Bezug auf die maßgebenden mechanischen Entitäten charakterisieren sich die einzelnen Versuchsreihen durch geringe Schubtragfähigkeiten F_{vR} von 10.90 bis 28.60 kN, wobei sich die einzelnen Werte dabei weitgehend direkt proportional zu den jeweiligen Verbindungsmitteldurchmessern d darstellen. Hinsichtlich der Einbindetiefe l_b in Verbindung mit der resultierenden Schubtragfähigkeit F_{vR} lässt sich für diese Typologie kein direkt proportionaler Zusammenhang, allerdings ein Trend hin zu diesem, erkennen. Ebenso kann kein direkter proportionaler Zusammenhang mit Hinblick auf die Verschiebungsmoduln K_{ser} erkannt werden, welche in diesem Kontext in einem geringen bis leicht gesteigerten Bereich von 2.12 bis 19.20 kN/mm liegen. Erkennbar wird jedoch eine qualitativ verringernde Wirkung auf die genannten mechanischen Entitäten durch den Einsatz einer Zwischenlage zwischen den Verbundpartnern Holz und Beton, wie für die Versuchsreihen St-g-90°-3 und 5 ersichtlich. Auch mit Bezug auf das jeweilige Duktilitätsmaß der Verbindungen D_s kann abschließend kein direkter proportionaler Zusammenhang erkannt werden, wobei die einzelnen Werte der Versuchsreihen jedoch in einem moderaten bis sehr hohen Bereich von 5.87 bis 25.10 anzusiedeln sind.

3.4.3 Stiffförmige geschraubte VM - 45°

Tab. 3.3: Typologie stiffförmige geschraubte VM - 45° | Übersicht

Bezeichnung	Quellenbez. bzw. Quelle	K_{ser} [kN/mm]	F_{vR} [kN]	D_s [-]	Prinzipiskizze
St-g-45°-1 (BSH)	CLC8240 [31]	15.21	17.24	6.86	
St-g-45°-2 (BSH)	CLC8160 [31]	11.21	11.86	5.44	
St-g-45°-3 (FSH)	45° [32]	21.65	21.40	10.54	

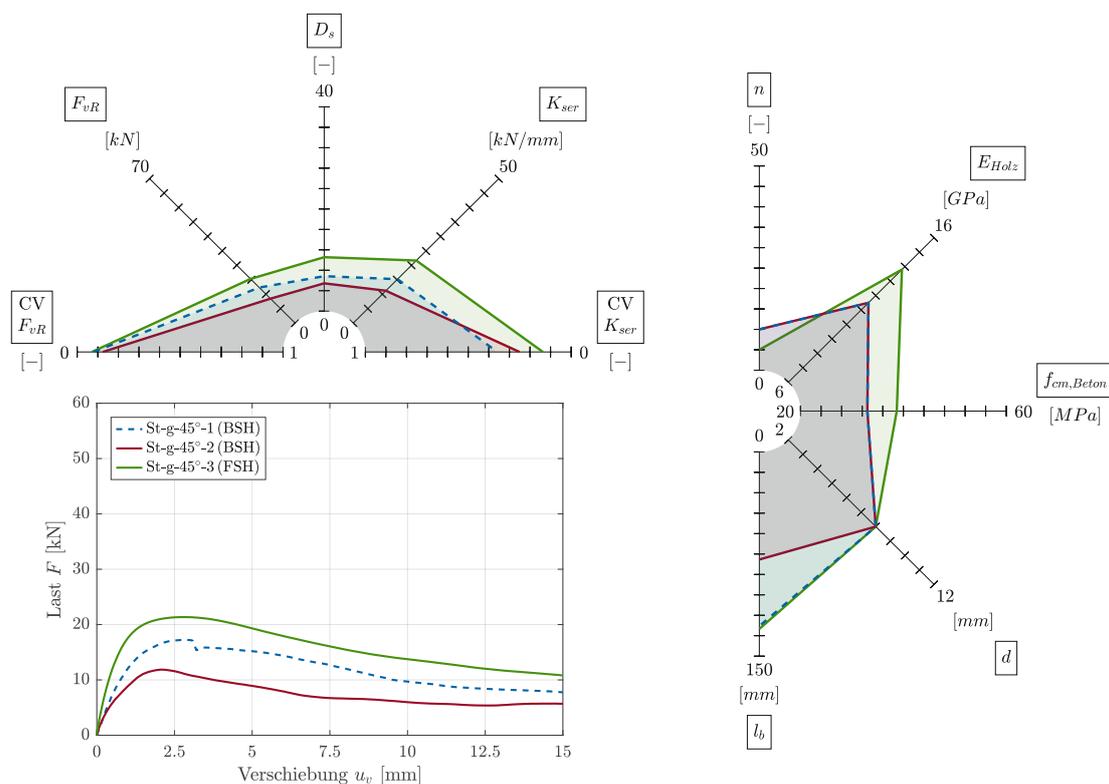


Abb. 3.14: Typologie stiffförmige geschraubte VM - 45° | Netzdiagramm (oben links und rechts), Last-Verschiebungs-Diagramm (unten links)

Wie aus der kumulierten Ergebnisdarstellung gemäß Tab. 3.3 und Abb. 3.14 ersichtlich, umfasst die untersuchte Typologie der *stiffförmigen geschraubten VM - 45°* insgesamt drei verschiedene Versuchsreihen aus zwei unterschiedlichen Quellen nach *Berardinucci* [31] und *Rädler* [32]. Die Anzahl n der einzelnen Probekörper der für diese Typologie betrachteten Versuchsreihen liegt dabei in einem geringen bis moderaten Bereich zwischen 5 und 10

Proben. Gemäß den Darstellungen laut Tab. 3.3 definieren sich die einzelnen Versuchsreihen durch den Einsatz unterschiedlicher Holzwerkstoffe in der jeweiligen Ausführung. So charakterisieren sich die Versuchsreihen St-g-45°-1 und 2 durch eine Ausführung aus Brettschichtholz und zeigt sich die Versuchsreihe St-g-45°-3 durch den Einsatz von Furnierschichtholz bestimmt. Darüber hinaus definieren sich die einzelnen Versuchsreihen durch ähnliche Formen von geschraubten Verbindungsmitteln, wobei diese im konkreten Fall eine Ausführung in Form von Holzbau- bzw. Verbundschrauben aufweisen. Entsprechend dieser äquivalenten Beschaffenheiten charakterisieren sich die vorhandenen Verbindungsmitteldurchmesser d durch ein homogenes Spektrum von 8 mm bei allerdings variierenden Einbindetiefen l_b von 79 bis 130 mm.

Hinsichtlich dem allgemeinen Trag- und Verformungsverhalten dieser Typologie charakterisieren sich alle Versuchsreihen durch ein kontinuierliches Last-Verschiebungs-Verhalten mit moderatem linear-elastischen Verformungsanteil gefolgt von einem geringen Fließplateau und einem abschließenden Entfestigungsanteil bis zum Erreichen der maximalen Grenzverschiebung u_u . Dementsprechend ebenfalls einheitlich repräsentieren sich auch die hierbei auftretenden Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen in Form einer Lochleibung im Verbundpartner Holz sowie durch ein gefolgtes Ausziehen der Verbindungsmittel.

Mit Bezug auf die maßgebenden mechanischen Entitäten zeigt diese Typologie grundsätzlich homogene Zusammenhänge, welche durch unterschiedliche Proportionalitäten ausgedrückt werden können. So charakterisieren sich diese Versuchsreihen durch grundsätzlich geringe Schubtragfähigkeiten F_{vR} von 11.86 bis 21.40 kN, wobei sich die einzelnen Werte dabei allerdings direkt proportional zu der jeweiligen Einbindetiefe l_b darstellen. Auf Basis einer gesteigerten Einbindetiefe l_b kann demnach eine gesteigerte Schubtragfähigkeit F_{vR} erreicht werden.

Nach einem ebenfalls direkt proportionalem Prinzip stellen sich darüber hinaus auch die Verschiebungsmoduln K_{ser} dar, welche in diesem Kontext in einem ebenfalls geringen Bereich von 11.21 bis 21.65 kN/mm liegen. Augenscheinlich wird hierbei darüber hinaus die qualitativ verringernde Wirkung auf die genannten mechanischen Entitäten durch den Einsatz einer Zwischenlage zwischen den Verbundpartnern Holz und Beton, wie bei den Versuchsreihen St-g-45°-1 und 2 gegeben. Mit Bezug auf das Duktilitätsmaß D_s kann abschließend wiederum ein direkt proportionaler Zusammenhang zwischen der Einbindetiefe l_b und der genannten Größe erkannt werden, wobei die einzelnen Werte der Versuchsreihen in einem moderaten bis hohen Bereich von 5.44 bis 10.54 anzusiedeln sind. Mit steigender Einbindetiefe l_b kann demnach ein erhöhtes Duktilitätsmaß D_s der Verbindung erreicht werden. Darüber hinaus kann das jeweilige Duktilitätsmaß der Verbindungen D_s äquivalent zu den vorangegangenen beschriebenen mechanischen Entitäten ebenfalls wesentlich durch den Einsatz einer Zwischenschicht zwischen den Verbundpartnern Holz und Beton beeinflusst werden.

3.4.4 Nagelplatten

Tab. 3.4: Typologie Nagelplatten | Übersicht

Bezeichnung	Quellenbez. bzw. Quelle	K_{ser} [kN/mm]	F_{vR} [kN]	D_s [-]	Prinzipiskizze
Npl-1 (BSH)	A-NAG [33]	18.71	20.11	33.76	
Npl-2 (VH)	B-NAG [33]	18.34	18.02	19.18	
Npl-3 (BSH)	SNP [34]	48.56	14.92	38.69	

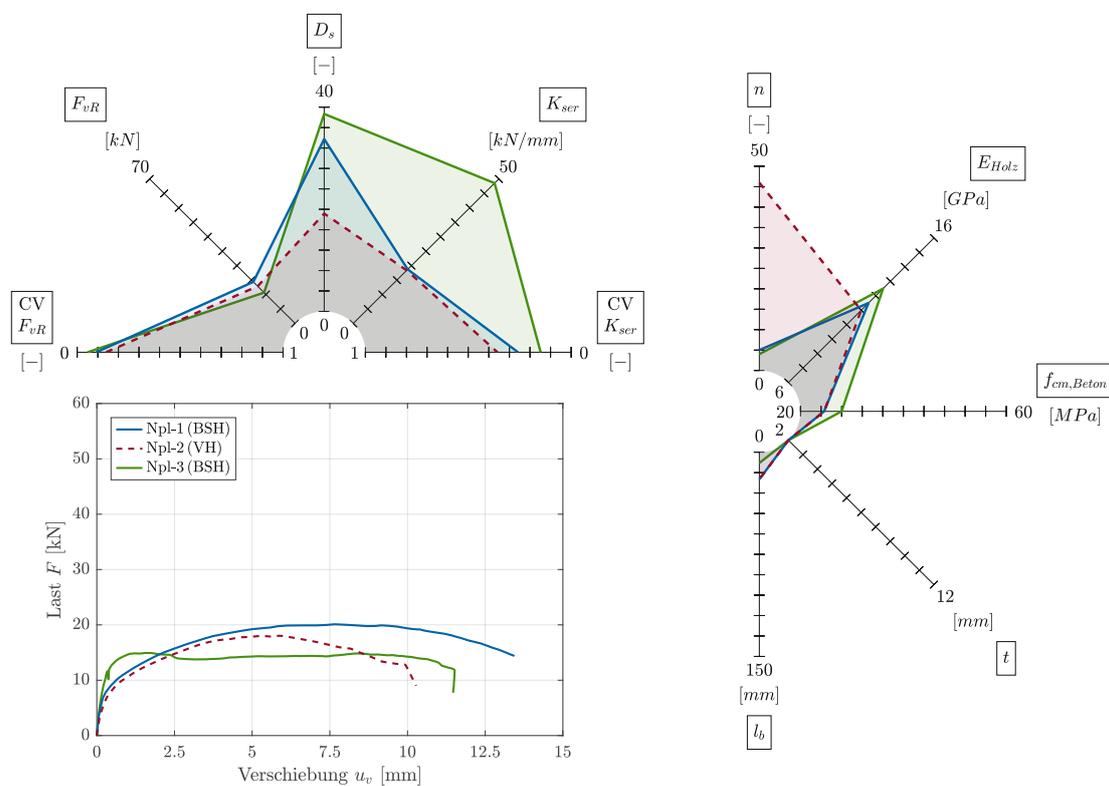


Abb. 3.15: Typologie Nagelplatten | Netzdiagramm (oben links und rechts), Last-Verschiebungs-Diagramm (unten links)

Wie aus der kumulierten Ergebnisdarstellung gemäß Tab. 3.4 und Abb. 3.15 ersichtlich, umfasst die untersuchte Typologie der *Nagelplatten* insgesamt drei verschiedene Versuchsreihen aus zwei unterschiedlichen Quellen nach *Van der Linden* [33] und *Lukaszewska* [34]. Die Anzahl n der einzelnen Probekörper der für diese Typologie betrachteten Versuchsreihen liegt dabei in einem geringen bis sehr hohen Bereich zwischen 4 und 46 Proben. Gemäß den Darstellungen laut Tab. 3.4 definieren sich die einzelnen Versuchsreihen durch den

Einsatz unterschiedlicher Holzwerkstoffe in der jeweiligen Ausführung. So charakterisieren sich die Versuchsreihen Npl-1 und 3 durch eine Ausführung aus Brettschichtholz und zeigt sich die Versuchsreihe Npl-2 durch den Einsatz von Vollholz bestimmt. Darüber hinaus definieren sich die einzelnen Versuchsreihen durch ähnliche Formen von Nagelplatten, wobei diese im konkreten Fall eine rechteckig gefalzte, in der Verbundfuge verpresste Ausführung aufweisen. Entsprechend dieser äquivalenten Beschaffenheiten charakterisieren sich die genannten Versuchsreihen darüber hinaus auch durch eine einheitliche Blech- bzw. Nagelstärke von $t = 2.00 \text{ mm}$ bei einer allerdings variierenden Einbindetiefe l_b zwischen 8 und 20 mm.

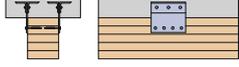
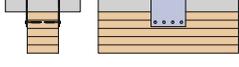
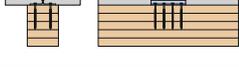
Hinsichtlich dem allgemeinen Trag- und Verformungsverhalten dieser Typologie definieren sich alle Versuchsreihen durch ein kontinuierliches Last-Verschiebungs-Verhalten mit qualitativ äquivalenten, quantitativ allerdings variierenden Eigenschaften. So zeigen die Versuchsreihen Npl-1 und 2 einen moderaten linear-elastischen Verformungsanteil, gefolgt von einem weitreichenden Fließbereich bestehend aus anfänglichem Verfestigungsanteil bis zum Erreichen der Schubtragfähigkeit F_{vR} und einem nachfolgenden Entfestigungsanteil bis zum Erreichen der maximal erreichbaren Grenzverschiebung u_u , während die Versuchsreihe Npl-3 eine wesentlich ausgeprägtere bilineare Charakteristik mit steil ansteigendem linear elastischem Anteil und anschließendem Fließplateau bis zum Erreichen der maximal erreichbaren Grenzverschiebung u_u aufweist. Dagegen einheitlich repräsentieren sich die hierbei auftretenden Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen in Form einer Lochleibung im Verbundpartner Holz und einer Fließgelenkbildung im Verbindungsmittel, sowie durch einen gefolgt gruppierten Bruch der Verbindungsmittel in der Verbundfuge.

Mit Bezug auf die maßgebenden mechanischen Entitäten charakterisieren sich diese Versuchsreihen durch grundsätzlich geringe Schubtragfähigkeiten F_{vR} zwischen 14.92 und 20.11 kN, wobei sich die einzelnen Werte dabei direkt proportional zu der jeweiligen Einbindetiefe l_b darstellen. Auf Basis einer gesteigerten Einbindetiefe l_b kann demnach eine gesteigerte Schubtragfähigkeit F_{vR} festgestellt werden.

Mit weiterem Bezug auf die Verschiebungsmoduln K_{ser} stellen sich die vorliegenden Versuchsreihen, wie auch bereits mit Hinblick auf das Last-Verschiebungs-Verhalten angemerkt, darüber hinaus auf Basis variierender Eigenschaften dar. So liegen die Verschiebungsmoduln K_{ser} der Versuchsreihen Npl-1 und 2 in einem moderaten Bereich bei 18.71 bzw. 18.34 kN/mm, während sich die Versuchsreihe Npl-3 durch einen wesentlich erhöhten Wert von 48.56 kN/mm definiert. Die Typologie zeigt demnach teilweise grundsätzlich ansprechende Werte, eine quantitativ homogene Einordnung mit Hinblick auf diese mechanischen Entität scheint für die vorliegende Versuchsreihe allerdings nicht möglich. Mit abschließendem Hinblick auf das jeweilige Duktilitätsmaß der Verbindungen D_s kennzeichnen sich die Versuchsreihen dieser Typologie durch eine grundsätzlich äußerst hohe Wertigkeit, wobei die einzelnen Zahlenwerte hierbei in einem Bereich zwischen 19.18 bis 38.69 anzusiedeln sind. Die Typologie der *Nagelplatten* charakterisiert sich demnach durch höchste Duktilität bei teilweise gleichzeitig moderat vorhandener Steifigkeit der Verbindung.

3.4.5 Schubleche mit geschraubten VM - 90°

Tab. 3.5: Typologie Schublech mit geschraubten VM - 90° | Übersicht

Bezeichnung	Quellenbez. bzw. Quelle	K_{ser} [kN/mm]	F_{vR} [kN]	D_s [-]	Prinzipiskizze
Bl-g-90°-1 (BSH)	SP+8S(R) [35]	16.13	58.20	8.46	
Bl-g-90°-2 (BSH)	SP+4S(R) [35]	15.19	37.83	11.36	
Bl-g-90°-3 (BSH)	SP+4S [35]	20.56	34.74	12.26	
Bl-g-90°-4 (BSH)	T+S [36]	11.80	47.20	7.25	

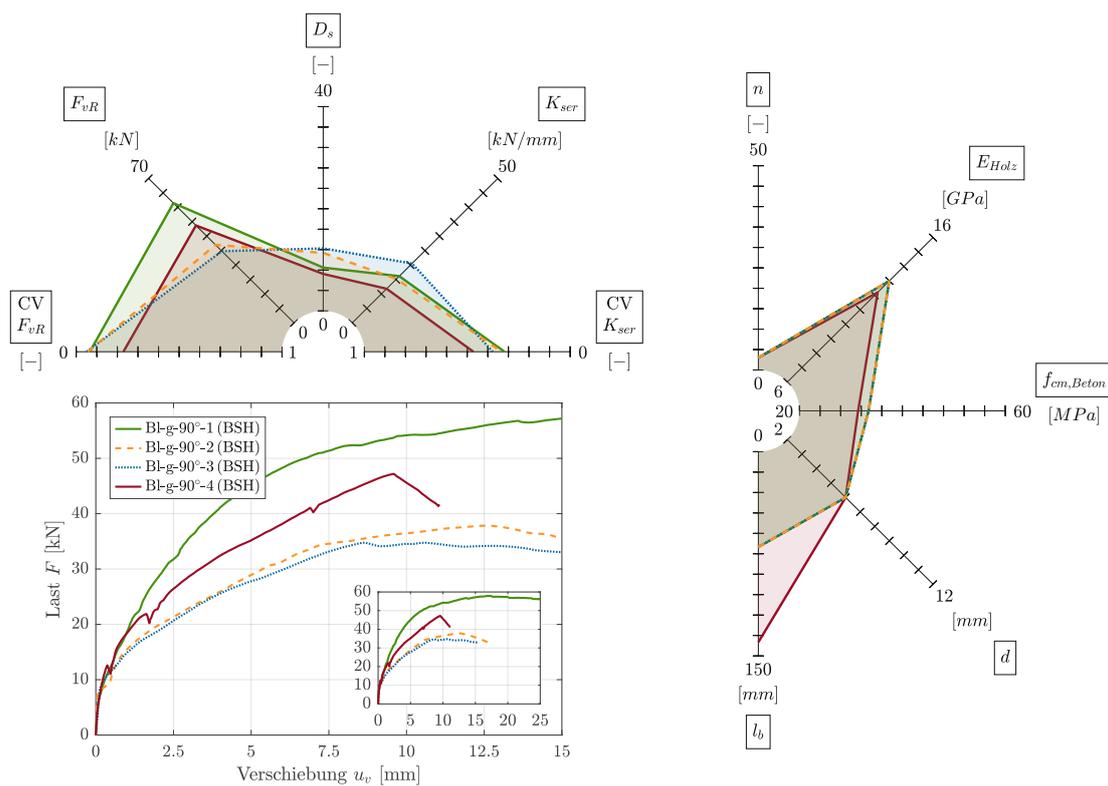


Abb. 3.16: Typologie Schublech mit geschraubten VM - 90° | Netzdiagramm (oben links und rechts), Last-Verschiebungs-Diagramm (unten links)

Wie aus der kumulierten Ergebnisdarstellung gemäß Tab. 3.5 und Abb. 3.16 ersichtlich, umfasst die untersuchte Typologie der *Schubleche mit geschraubten VM - 90°* insgesamt vier verschiedene Versuchsreihen aus zwei unterschiedlichen Quellen nach Shi [35] und

Zhu [36]. Die Anzahl n der einzelnen Probekörper der für diese Typologie betrachteten Versuchsreihen liegt dabei in einem geringen Bereich von 3 Proben. Gemäß den Darstellungen laut Tab. 3.5 definieren sich alle einzelnen Versuchsreihen durch den Einsatz gleichartiger Holzwerkstoffe in Form von Brettschichtholz in der jeweiligen Ausführung. Entsprechend dieser äquivalenten Beschaffenheit charakterisieren sich darüber hinaus ebenso die vorhandenen Verbindungsmitteldurchmesser d durch ein homogenes Spektrum von 6 mm bei allerdings variierenden Einbindetiefen l_b von 70 bis 140 mm.

Hinsichtlich dem allgemeinen Trag- und Verformungsverhalten dieser Typologie definieren sich die Versuchsreihen durch ein großteils kontinuierliches Last-Verschiebungs-Verhalten mit qualitativ äquivalenten, quantitativ allerdings variierenden Eigenschaften. Die Versuchsreihen weisen demnach grundsätzlich einen nur geringen linear-elastischen Verformungsanteil gefolgt von einem weitreichenden Fließbereich auf. Dabei zeigen die Versuchsreihen mit seitlicher Blechverschraubung (Bl-g-90°-1 bis 3) einen anfänglichen Verfestigungsanteil bis zum Erreichen der Schubtragfähigkeit F_{vR} gefolgt von einem ausgeprägten Entfestigungsanteil bis zum Erreichen der maximal erreichbaren Grenzverschiebung u_u , während die Versuchsreihe mit vorhandener Blechverschraubung in der Verbundfuge (Bl-g-90°-4) lediglich einen anfänglichen Verfestigungsanteil bis zum Erreichen der Schubtragfähigkeit F_{vR} gefolgt von einem Verbindungsmittelbruch aufweist. Als maßgebend vorhandene Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen können in diesem Kontext daher auch eine Lochleibung im Verbundpartner Holz sowie eine Fließgelenksbildung in den Verbindungsmitteln mit teilweise vorhandenem Bruch beim Erreichen der Schubtragfähigkeit F_{vR} ($u_{vR} = u_u$, bei der Versuchsreihe Bl-g-4) genannt werden.

Mit Bezug auf die maßgebenden mechanischen Entitäten charakterisieren sich diese Versuchsreihen durch grundsätzlich moderate Schubtragfähigkeiten F_{vR} zwischen 34.74 und 58.02 kN, wobei sich die einzelnen Zahlenwerte dabei direkt proportional zu der jeweiligen Einbindetiefe l_b darstellen. Auf Basis einer gesteigerten Einbindetiefe l_b kann demnach eine gesteigerte Schubtragfähigkeit F_{vR} festgestellt werden. Mit weiterem Bezug auf die Verschiebungsmoduln K_{ser} stellen sich die vorliegenden Versuchsreihen darüber hinaus auf Basis variierender Eigenschaften dar. So zeigen sich die Verschiebungsmoduln K_{ser} der Versuchsreihen mit seitlicher Blechverschraubung (Bl-g-90°-1 bis 3) in einem moderaten Bereich zwischen 16.13 und 20.56 kN/mm, während der Verschiebungsmodul K_{ser} der Versuchsreihe mit vorhandener Blechverschraubung in der Verbundfuge (Bl-g-90°-4) bei einem nur geringen Zahlenwert von 11.80 kN/mm liegt. Für die einzelnen Versuchsreihen der dargestellten Typologie kann demnach schlussfolgernd kein explizit vorhandener proportionaler Zusammenhang hinsichtlich dieser genannten mechanischen Entität erkannt werden. Mit darüber hinaus abschließendem Blick auf das jeweilige Duktilitätsmaß der Verbindungen D_s kennzeichnen sich die Versuchsreihen der beschriebenen Typologie durch eine moderate bis hohe Duktilität, welche sich durch Zahlenwerte in einem Bereich zwischen 7.25 und 12.26 ausdrücken lässt. Als maßgebende Eigenschaft kann in diesem Kontext ebenfalls festgehalten werden, dass das Duktilitätsmaß D_s sich hierbei, wie auch bereits mit Hinblick auf das Last-Verschiebungs-Verhalten angemerkt, in Abhängigkeit der Verschraubungsausführung charakterisiert. So liegt das Duktilitätsmaß D_s bei vorhandener Blechverschraubung in der Verbundfuge (Bl-g-90°-4) im nur moderaten Bereich, während sich ebendiese Größe bei seitlicher Blechverschraubung (Bl-g-90°-1 bis 3) als vergleichsweise gesteigert im hohen Bereich ausdrücken lässt.

3.4.6 Kerben ohne VM spröde

Tab. 3.6: Typologie Kerben ohne VM spröde | Übersicht

Bezeichnung	Quellenbez. bzw. Quelle	K_{ser} [kN/mm]	F_{vR} [kN]	D_s [-]	Prinzipiskizze
Ke-oVMs-1 (VH)	CR [28]	239.38	47.38	1.54	
Ke-oVMs-2 (BSH)	NC-N-1 [37]	76.54	53.58	1.00	
Ke-oVMs-3 (BST)	L-25-250 [38]	113.80	82.45	2.14	
Ke-oVMs-4 (BST)	KSV11 [39]	41.03	47.67	1.22	
Ke-oVMs-5 (BST)	L-40-250 [38]	116.70	97.65	1.00	
Ke-oVMs-6 (BST)	L-25-150 [38]	115.65	58.75	1.02	

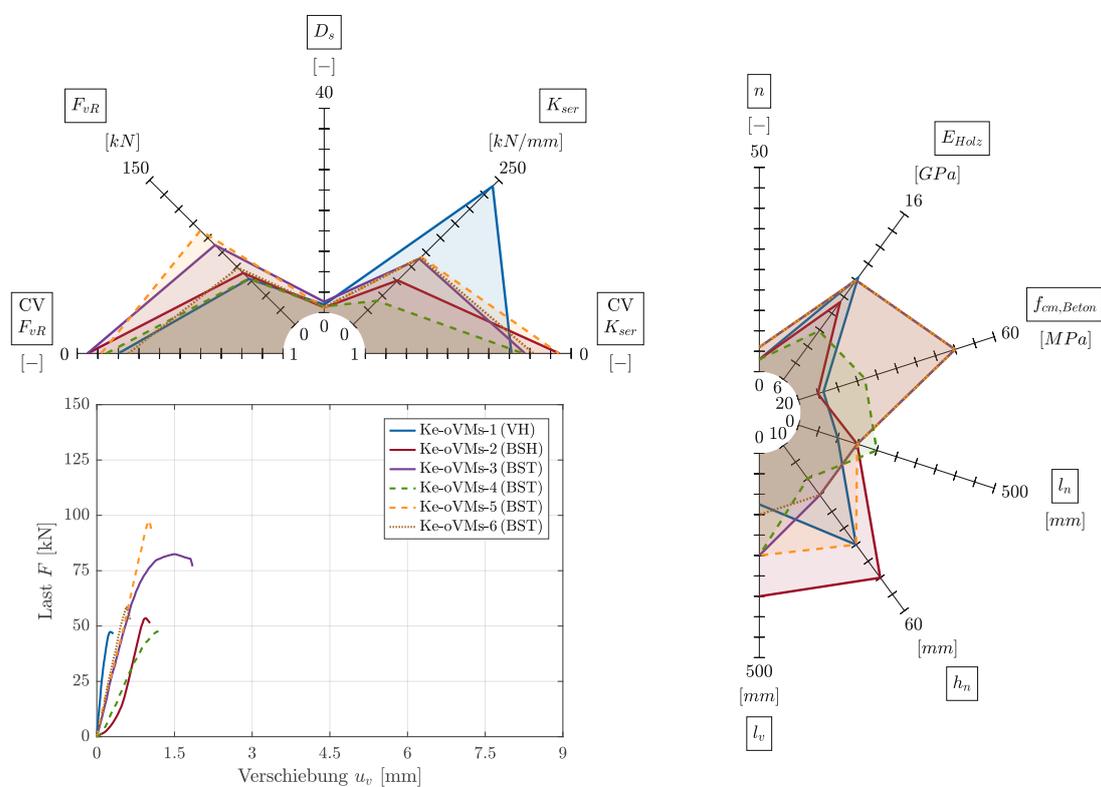


Abb. 3.17: Typologie Kerben ohne VM spröde | Netzdiagramm (oben links und rechts), Last-Verschiebungs-Diagramm (unten links)

Wie aus der kumulierten Ergebnisdarstellung gemäß Tab. 3.6 und Abb. 3.17 ersichtlich, umfasst die untersuchte Typologie der *Kerven ohne VM spröde* insgesamt sechs verschiedene Versuchsreihen aus vier unterschiedlichen Quellen nach *Djoubissie* [28], *Jiang* [37], *Michelfelder* [39] und *Zhang* [38]. Die Anzahl n der einzelnen Probekörper der für diese Typologie betrachteten Versuchsreihen liegt dabei in einem geringen Bereich zwischen 3 und 6 Proben. Gemäß den Darstellungen laut Tab. 3.6 definieren sich die einzelnen Versuchsreihen durch den Einsatz unterschiedlicher Holzwerkstoffe, als auch unterschiedlicher Strukturgeometrien in der jeweiligen Ausführung. So charakterisiert sich die Versuchsreihe Ke-oVMs-1 durch eine rippenförmige Ausführung aus Vollholz, die Versuchsreihe Ke-oVMs-2 durch eine ebenfalls rippenförmige Ausführung aus Brettschichtholz sowie zeigen sich die verbleibenden Versuchsreihen Ke-oVMs-3 bis 6 durch den Einsatz von plattenförmigem Brettstapelholz bestimmt. Darüber hinaus definieren sich die vorhandenen Kerventiefen h_n durch ein variierendes Spektrum zwischen 20 und 50 mm bei ebenso variierenden Kervnlängen l_n und Vorholzlängen der Kerven l_v in Bereichen zwischen 100 und 200 mm bzw. 125 und 350 mm.

Hinsichtlich dem allgemeinen Trag- und Verformungsverhalten dieser Typologie definieren sich die Versuchsreihen durch ein kontinuierliches Last-Verschiebungs-Verhalten mit wesentlichem linear-elastischen Verformungsanteil, gefolgt von einem spröden Versagensmechanismus in Form eines Schubversagens des Betons bzw. des Holzes beim Erreichen der Schubtragfähigkeit F_{vR} . Darüber hinaus kann in diesem Kontext festgestellt werden, dass sich dieses allgemeine Schubversagen der einzelnen Verbundpartner Holz und Beton deutlich in Abhängigkeit der verwendeten Strukturgeometrie, sowie der damit in den Versuchsreihen verbundenen Kerventiefe h_n darstellt. So zeigen sich die rippenförmigen Ausführungsformen mit hohen Kerventiefen h_n (Ke-oVMs-1 und 2) durch ein Schubversagen des Betons bestimmt während sich die plattenförmigen Ausführungsformen (Ke-oVMs-3 bis 6) mit eher geringen Kerventiefen h_n demgegenüber durch ein Schubversagen der hölzernen Komponente charakterisieren. Ein gewisser Zusammenhang zwischen der strukturellen Ausführungsform bzw. der Kerventiefe h_n und dem auftretenden Versagensmechanismus kann demnach erkannt werden.

Mit Bezug auf die maßgebenden mechanischen Entitäten charakterisieren sich die Versuchsreihen der beschriebenen Typologie durch grundsätzlich hohe bis sehr hohe Schubtragfähigkeiten F_{vR} zwischen 47.38 und 97.65 kN, wobei sich die einzelnen Zahlenwerte dabei für zumindest die Versuchsreihen mit plattenförmiger Strukturgeometrie (Ke-oVMs-3 bis 6) als direkt proportional zu der jeweiligen Kerventiefe h_n erweisen. Darüber hinaus stellen sich auch mit Bezug auf die Verschiebungsmoduln K_{ser} qualitativ äquivalente Zusammenhänge dar, welche sich hierbei weiterführend durch einzelne Zahlenwerte in einem Bereich zwischen 41.03 und 239.38 kN/mm beschreiben lassen.

Mit weiterem abschließendem Blick auf das jeweilige Duktilitätsmaß der Verbindungen D_s kennzeichnen sich die Versuchsreihen der beschriebenen Typologie entgegen ihrer sonstigen mechanischen Entitäten durch eine nur äußerst geringe Duktilität, wobei die einzelnen Zahlenwerte hierbei in in einem Bereich zwischen 1.00 und 2.14 anzusiedeln sind. Die Typologie der *Kerven ohne VM spröde* charakterisiert sich demnach durch eine in äußerst hohem Maße vorhandene Tragfähigkeit und Steifigkeit der Verbindung bei einer gleichzeitig allerdings nur sehr gering vorhandenen Duktilität ebendieser.

3.4.7 Kerben ohne VM duktil

Tab. 3.7: Typologie Kerben ohne VM duktil | Übersicht

Bezeichnung	Quellenbez. bzw. Quelle	K_{ser} [kN/mm]	F_{vR} [kN]	D_s [-]	Prinzipiskizze
Ke-oVMd-1 (BST)	L-10-250 [38]	66.70	41.70	6.60	
Ke-oVMd-2 (BST)	HBV80 [40]	71.89	56.82	5.65	
Ke-oVMd-3 (BST)	HBV90 [40]	146.17	17.14		
Ke-oVMd-4 (BST)	HBV100 [40]	169.63	59.11	17.06	
Ke-oVMd-5 (BSH)	K-K [41]	73.72	58.78	5.36	

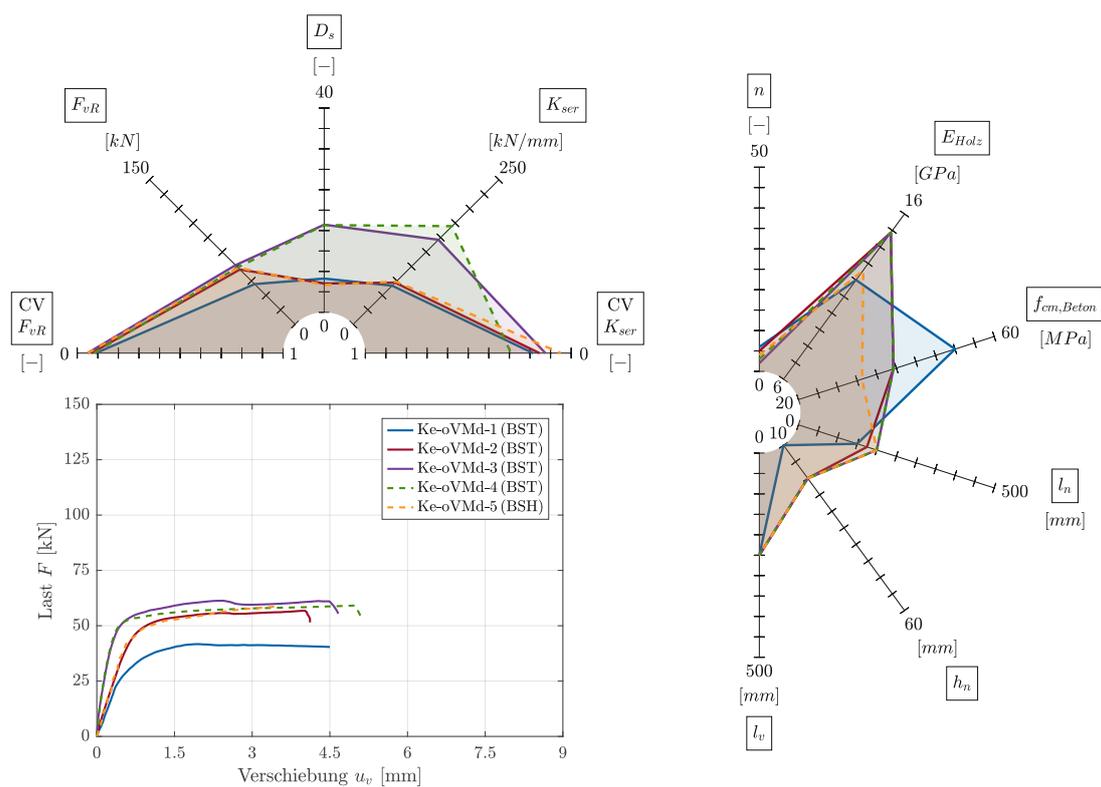


Abb. 3.18: Typologie Kerben ohne VM duktil | Netzdiagramm (oben links und rechts), Last-Verschiebungs-Diagramm (unten links)

Wie aus der kumulierten Ergebnisdarstellung gemäß Tab. 3.7 und Abb. 3.18 ersichtlich, umfasst die untersuchte Typologie der *Kerben ohne VM duktil* insgesamt fünf verschie-

dene Versuchsreihen aus drei unterschiedlichen Quellen nach *Zhang* [38], *Grosse* [40] und *Simon* [41]. Die Anzahl n der einzelnen Probekörper der für diese Typologie betrachteten Versuchsreihen liegt dabei in einem geringen Bereich zwischen 3 und 6 Proben. Gemäß den Darstellungen laut Tab. 3.7 definieren sich die einzelnen Versuchsreihen durch den Einsatz unterschiedlicher Holzwerkstoffe bei einheitlicher plattenförmiger Strukturgeometrie in der jeweiligen Ausführung. So charakterisieren sich die Versuchsreihen Ke-oVMd-1 bis 4 durch eine Ausführung aus Brettstapelholz sowie zeigt sich die Versuchsreihe Ke-oVMd-5 durch den Einsatz von Brettsperrholz bestimmt. Darüber hinaus definieren sich die vorhandenen Kervertiefen h_n sowie auch die Kervenlängen l_n durch variierende Spektren zwischen 10 und 20 mm bzw. 150 und 200 mm bei allerdings konstanten Vorholzlängen der Kerven l_v mit einem Zahlenwert von 250 mm. Ebenso zeigen sich für diese Typologie die vorhandenen Flankenneigungen der Kerven als variabel, als sich für die Versuchsreihen Ke-oVMd-2, 4 und 5 die Flankenneigung α_n ungleich 90° (Ke-oVMd-2 80° , bzw. Ke-oVMd-4 und 5 100°) darstellt.

Hinsichtlich dem allgemeinen Trag- und Verformungsverhalten dieser Typologie definieren sich die Versuchsreihen durch ein qualitativ äquivalentes, großteils kontinuierliches Last-Verschiebungs-Verhalten mit bilinearer Charakteristik bestehend aus einem wesentlichen linear-elastischen Verformungsanteil und einem darüber hinaus folgenden ausgeprägten Fließplateau, welches jeweils durch einen spröden Schädigungs- bzw. Versagensmechanismus in Form eines Druckversagens des Betons bzw. des Holzes bis zum Erreichen der maximalen Grenzverschiebung u_u bedingt und begleitet wird. In diesem Kontext kann hierbei festgestellt werden, dass sich dieses allgemeine Schubversagen der einzelnen Verbundpartner Holz und Beton deutlich in Abhängigkeit der vorhandenen Kervertiefe h_n darstellt, als für diese Versuchstypologie mit grundsätzlich geringen Kervertiefen h_n keine anderen als druckbasierte Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen auftreten. Ein gewisser Zusammenhang zwischen der ausgeführten Kervertiefe h_n und den auftretenden Versagensmechanismen kann demnach schlussfolgernd erkannt werden.

Mit Bezug auf die maßgebenden mechanischen Entitäten charakterisieren sich die Versuchsreihen der beschriebenen Typologie durch grundsätzlich hohe Schubtragfähigkeiten F_{vR} zwischen 41.70 und 61.32 kN, wobei sich die einzelnen Zahlenwerte dabei als qualitativ direkt proportional zu der jeweiligen Kervertiefe h_n erweisen. Die Verschiebungsmoduln K_{ser} bewegen sich des Weiteren hierbei in einem Bereich zwischen 66.70 und 169.63 kN/mm, für sie kann dabei allerdings kein direkter proportionaler, jedoch ein wiederum durch die Kervertiefe h_n geprägter, Zusammenhang erkannt werden. Auf Basis einer erhöhten Kervertiefe h_n können demnach sowohl eine erhöhte Schubtragfähigkeit F_{vR} , als auch ein erhöhter Verschiebungsmodul K_{ser} der Verbindung erreicht werden.

Mit darüber hinaus abschließendem Blick auf das jeweilige Duktilitätsmaß der Verbindungen D_s kennzeichnen sich die Versuchsreihen der beschriebenen Typologie durch eine moderate bis hohe Duktilität, wobei die einzelnen Zahlenwerte hierbei in in einem Bereich zwischen 5.36 und 17.14 anzusiedeln sind. Die Typologie der *Kerven ohne VM duktil* charakterisiert sich demnach durch eine in hohem Maße vorhandene Tragfähigkeit und Steifigkeit der Verbindung bei einer gleichzeitig ebenso vorhandenen hohen Duktilität ebendieser.

3.4.8 Kerben mit stiftförmigen geschraubten VM - 90°

Tab. 3.8: Typologie Kerben mit stiftförmigen geschraubten VM - 90° | Übersicht

Bezeichnung	Quellenbez. bzw. Quelle	K_{ser} [kN/mm]	F_{vR} [kN]	D_s [-]	Prinzipiskizze
Ke-mVM-1 (FSH)	Main R [42]	247.00	139.00	18.35	
Ke-mVM-2 (BSH)	LC-NS-4 [37]	83.13	73.61	2.68	
Ke-mVM-3 (BST)	L-25-250-con. [38]	114.60	89.40	2.52	
Ke-mVM-4 (BST)	KSV9 [39]	30.73	46.07	1.16	
Ke-mVM-5 (BSH)	RSS [43]	113.78	51.96	1.49	

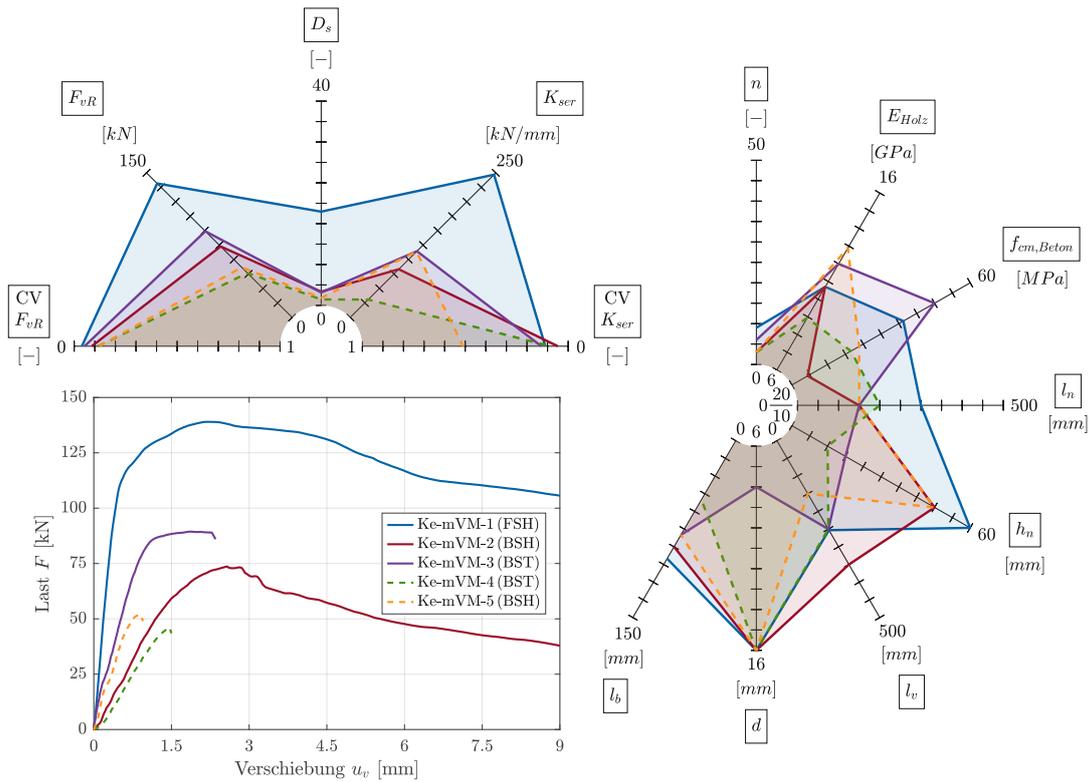


Abb. 3.19: Typologie Kerben mit stiftförmigen geschraubten VM - 90° | Netzdiagramm (oben links und rechts), Last-Verschiebungs-Diagramm (unten links)

Wie aus der kumulierten Ergebnisdarstellung gemäß Tab. 3.8 und Abb. 3.19 ersichtlich, umfasst die untersuchte Typologie der *Kerben mit stiftförmigen geschraubten VM - 90°*

insgesamt fünf verschiedene Versuchsreihen aus ebenso fünf unterschiedlichen Quellen nach Yeoh [42], Jiang [37], Zhang [38], Michelfelder [39] und Shi [43]. Die Anzahl n der einzelnen Probekörper der für diese Typologie betrachteten Versuchsreihen liegt dabei in einem geringen bis moderaten Bereich zwischen 3 und 9 Proben. Gemäß den Darstellungen laut Tab. 3.8 definieren sich die einzelnen Versuchsreihen durch den Einsatz unterschiedlicher Holzwerkstoffe bei ebenso variierender Strukturgeometrie in der jeweiligen Ausführung. So charakterisiert sich die Versuchsreihe Ke-mVM-1 durch eine rippenförmige Ausführung aus Furnierschichtholz und definieren sich die Versuchsreihen Ke-mVM-2 und 5 durch eine ebenfalls rippenförmige Ausführung aus Brettschichtholz während sich die verbleibenden Versuchsreihen Ke-mVM-3 und 4 durch den Einsatz von plattenförmigem Brettstapelholz bestimmt zeigen. Darüber hinaus definieren sich die vorhandenen Kerventiefen h_n sowie auch die Kervnlängen l_n durch variierende Spektren zwischen 20 und 60 mm bzw. 150 und 300 mm bei gleichfalls unterschiedlichen Vorholzlängen der Kerven l_v mit Zahlenwerten zwischen 150 und 350 mm, sowie charakterisierten sich die Verbindungstypologien hinsichtlich der zusätzlich eingebrachten stiftförmigen Verbindungsmittel durch den Einsatz von Holzbauschrauben mit wiederum variierenden Verbindungsmitteldurchmessern d in einem Bereich zwischen 8 und 16 mm.

Hinsichtlich dem allgemeinen Trag- und Verformungsverhalten dieser Typologie definieren sich die Versuchsreihen durch ein qualitativ differenziertes, nur teilweise kontinuierliches Last-Verschiebungs-Verhalten bestehend aus einem maßgeblichen beginnenden linear-elastischen Verformungsanteil und einem darüber hinaus folgenden variierenden, nur teilweise vorhandenen Fließanteil. In diesem Sinne charakterisieren sich die Versuchsreihen Ke-mVM-1 und 2 durch ein wesentlich vorhandenes Fließverhalten in Form einer auftretenden Entfestigungscharakteristik nach dem Erreichen der Schubtragfähigkeit F_{vR} bzw. definiert sich die Versuchsreihe Ke-mVM-3 durch ein in geringem Maße vorhandenes Fließplateau vor dem Erreichen der Schubtragfähigkeit F_{vR} , während sich die Versuchsreihen Ke-mVM-4 und 5 durch kein vorhandenes plastisches Verhalten, sondern ein lediglich sprödes Versagen im Anschluss an den linear-elastischen Bereich auszeichnen. Eine eindeutige Charakteristik aus der additiven Verwendung von stiftförmigen Verbindungsmitteln bei kervenbasierten Verbindungen kann demnach schlussfolgernd nicht erkannt werden. In äquivalenter Form verhält es sich hierbei mit Bezug auf die maßgebend vorhandenen Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen der Versuchsreihen. So treten in diesem Kontext sowohl schubbasierte (Ke-mVM-1 und 2 Schubversagen des Betons, Ke-mVM-4 und 5 Schubversagen des Holzes) als auch druckbasierte (Ke-mVM-3 Druckversagen des Betons) Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen innerhalb der vorliegenden Typologie auf. Eine eindeutige Versagenscharakteristik auf Basis der additiven Verwendung von stiftförmigen Verbindungsmitteln bei kervenbasierten Verbindungen kann demnach wiederum nicht direkt festgestellt werden, jedoch kann mit Hinblick auf die vorhandenen Kerventiefen h_n weiterführend ein Trend hin zu schubbasierten Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen bei hohen Kerventiefen h_n erkannt werden.

Mit Bezug auf die maßgebenden mechanischen Entitäten charakterisieren sich die Versuchsreihen der beschriebenen Typologie weiterführend durch grundsätzlich hohe bis sehr hohe Schubtragfähigkeiten F_{vR} zwischen 46.07 und 139.00 kN, wobei sich die einzelnen Zahlenwerte dabei wiederum durch eine nicht vorhandene qualitative Proportionalität kennzeichnen, lediglich eine wesentlich erhöhte Schubtragfähigkeit F_{vR} durch den Einsatz

von Furnierschichtholz im Vergleich zu anderen Holzwerkstoffen kann hierbei erkannt werden. Die Verschiebungsmoduln K_{ser} bewegen sich des Weiteren in einem moderaten bis sehr hohen Bereich zwischen 30.73 und 247.00 kN/mm, für sie kann schlussfolgernd eine äquivalente Charakteristik wie für die Schubtragfähigkeiten F_{vR} festgestellt werden. Mit darüber hinaus abschließendem Blick auf das jeweilige Duktilitätsmaß der Verbindungen D_s kennzeichnen sich die Versuchsreihen der beschriebenen Typologie durch eine partiell in hohem Maße variierende Duktilität, wobei die einzelnen Zahlenwerte hierbei in in einem geringen bis sehr hohen Bereich zwischen 1.16 und 18.35 anzusiedeln sind. Basierend auf den vorangegangenen beschriebenen deutlich vorhandenen Heterogenitäten innerhalb der Versuchsreihen finden sich demnach ebenfalls die Duktilitätsmaße D_s in einem maßgeblich variierten Spektrum wieder. Die Typologie der *Kerven mit stiftförmigen geschraubten VM - 90°* charakterisiert sich demnach durch eine in hohem bis höchstem Maße vorhandene Tragfähigkeit und Steifigkeit der Verbindung, zeigt sich aber gleichzeitig nur durch eine teilweise vorhandene hohe Duktilität bestimmt.

3.4.9 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen aus den Versuchsergebnissen

Wie aus den Kapiteln 3.4.1 bis 3.4.8 ersichtlich, stellen sich die betrachteten unterschiedlichen Typologien von Schubverbindersystemen durch sowohl konzeptionell als auch mechanisch wesentlich variierende Eigenschaften dar, eine grundsätzliche Charakterisierung kann in diesem Kontext allerdings auf Basis der definierten Teilbereiche *punktförmige Verbindungen mit stiftförmigen VM*, *linienförmige Verbindungen mit Schublechen und stiftförmigen VM*, sowie *punktförmige Verbindungen mit Kerven und eventuell vorhandenen stiftförmigen VM* stattfinden, wie grafisch kumuliert auch aus Abb. 3.20 ersichtlich wird.

Betrachtet man dahingehend die allgemeinen Verbindungscharakteristiken der maßgebenden Schubverbindersysteme mit Bezug auf die *punktförmigen Verbindungen mit stiftförmigen VM* (Typologien St-gp-90°, St-g-90° und St-g-45°) kann in diesem Zusammenhang eine grundsätzlich nur geringe Tragfähigkeit und Steifigkeit ($K_{ser,max} \approx 22$ kN/mm bzw. $F_{vR,max} \approx 29$ kN), bei einer demgegenüber allerdings gleichzeitig hohen bis sehr hohen Duktilität ($D_{s,max} \approx 29$) erkannt werden. In diesem Sinne können hierbei speziell die Eigenschaften der Typologie St-gp-90° als maßgebend hervorgehoben werden, als im forschungsrelevanten zu untersuchenden Verbunddeckensystem ebenso glattschaftige/profilierete VM in Form von ballistischen Glattschaftnägeln mit geringem Verbindungsmitteldurchmesser d zur Anwendung kommen sollen. Die allgemeine Konzeptidee sieht hierbei in Verbindung mit den applizierten Puzzle Strip Schublechen eine möglichst duktile Kopplung der Verbundpartner Holz und Beton vor. Diese Forderung lässt sich auf Basis der Versuchsergebnisse der Typologie St-gp-90° deutlich bestätigen, als für diese Verbindungstypologie ein indirekt proportionaler Zusammenhang zwischen dem Verbindungsmitteldurchmesser d und dem resultierenden Duktilitätsmaß D_s besteht.

Mit weiterführendem Bezug auf die allgemeine Verbindungscharakteristik der *linienförmigen Verbindungen mit Schublechen und stiftförmigen VM* in Form der Typologien Npl und Bl-g-90° lassen sich diese Eigenschaften darüber hinaus qualitativ ebenfalls bestätigen. So stellen sich die hierbei untersuchten Versuchsreihen wiederum durch eine nur gemäßigte Steifigkeit ($K_{ser,max} \approx 49$ kN/mm) dar, weisen im Vergleich dazu allerdings wieder hohe

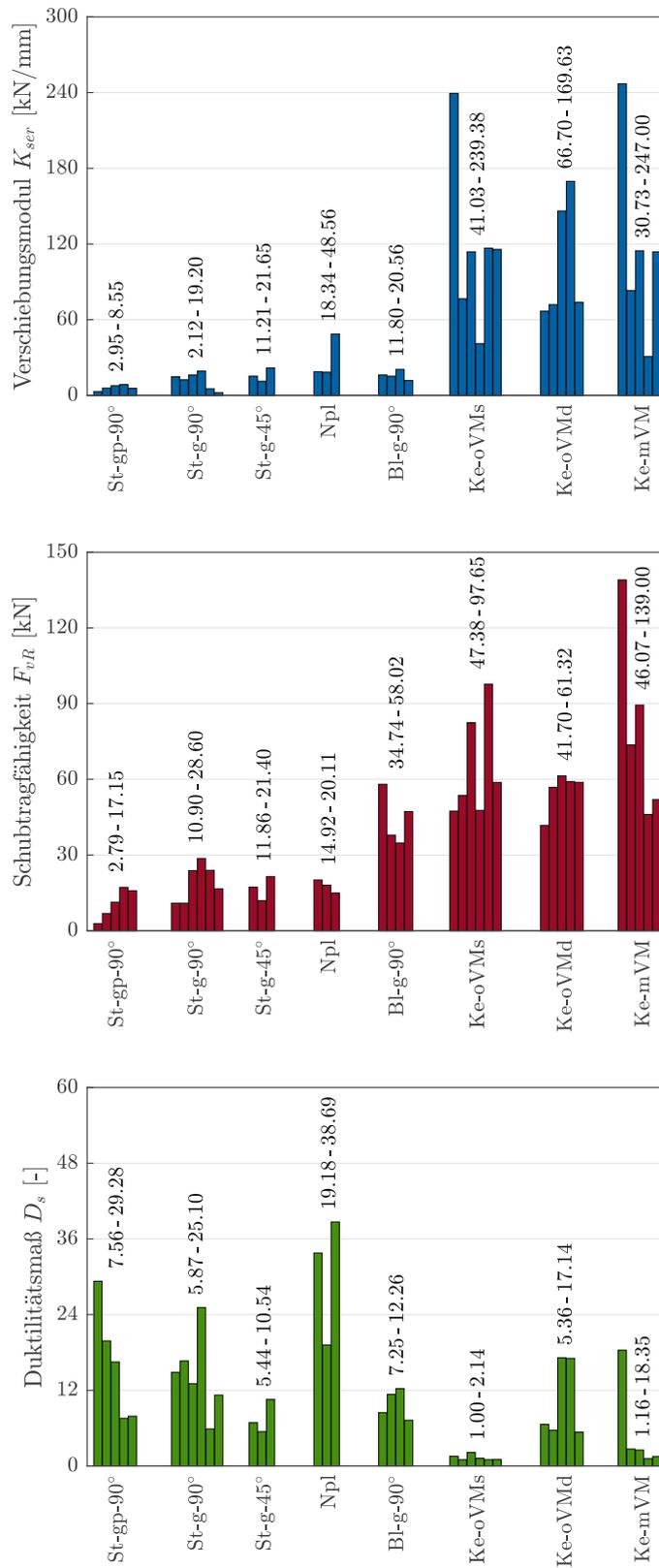


Abb. 3.20: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse von systemrelevanten Ausführungsvarianten | Verschiebungsmodul K_{ser} (oben), Schubtragfähigkeiten F_{vR} (mitig), Duktilitätsmaße D_s (unten)

bis höchste Duktilitäten ($D_{s,max} \approx 39$) auf. Mit weiterem Bezug auf die Schubtragfähigkeiten dieser kumulierten Versuchsreihen kann hierbei besonders die Typologie Bl-g-90° hervorgehoben werden, als diese wiederum einen direkten kontextuellen Bezug zu allen weiterführenden Forschungsaktivitäten aufweist. Während die Typologie Npl bei höchster Duktilität lediglich eine äußerst geringe Tragfähigkeit aufweist ($F_{vR,max} \approx 20$ kN), stellt sich die besagte Typologie Bl-g-90° durch eine wesentlich gesteigerte Tragfähigkeit ($F_{vR,max} \approx 58$ kN) bestimmt dar. Der Einsatz von stiftförmigen, blechbasierten Verbindungen in Holz-Beton-Verbundkonstruktionen zeigt demzufolge ein entsprechend vorhandenes Applikationspotential, welches im weiteren forschungsrelevanten Kontext folglich auch ausgeschöpft werden soll.

Mit darüber hinaus folgendem Hinblick auf die allgemeine Verbindungscharakteristik der *punktförmigen Verbindungen mit Kerven und eventuell vorhandenen stiftförmigen VM* stellen sich die Versuchsreihen dieser Typologien im Vergleich zu den rein stift- bzw. blechbasierten Varianten durch im Allgemeinen konträre Verbindungseigenschaften dar. So kennzeichnen sich die hierbei maßgebenden Typologien (Ke-oVMs, Ke-oVMd und Ke-mVM) durch entsprechend hohe bis höchste Tragfähigkeiten und Steifigkeiten ($K_{ser,max} = 247$ kN/mm bzw. $F_{vR,max} = 139$ kN), weisen hinsichtlich ihrer dabei vorhandenen Duktilitätsmaße D_s allerdings keine einheitliche durch hohe Werte geprägte Charakteristik auf. So können in Abhängigkeit der ausgeführten Kervengeometrie (geringe Kerventiefe h_n) sehr wohl duktile Verbindungen erreicht werden ($D_{s,max} \approx 17$ innerhalb der Typologie Ke-oVMd), in einem forschungsrelevanten Kontext (hohe Kerventiefe h_n) weisen die maßgebenden Versuchsreihen (Ke-oVMs) allerdings nur äußerst geringe Duktilitäten ($D_{s,max} \approx 2$) auf.

Bestimmt wird die genannte mechanische Entität dabei maßgeblich durch die gegebenen Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen innerhalb der Verbindungen. So können bei auftretenden druckbasierten Mechanismen (Druckversagen des Betons bzw. des Holzes) hohe Duktilitäten erreicht werden, während bei einer schubbasierten Charakteristik (Schubversagen des Betons bzw. des Holzes) nur ein geringes Duktilitätspotential zu erwarten ist. Dieser Umstand soll weiterführend auch innerhalb des zu untersuchenden neuartigen Verbunddeckensystems berücksichtigt werden, als bei einer angewendeten Kerventiefe von $h_n = 40$ mm aus den Versuchsergebnissen schlussfolgernd von einem schubförmigen Schädigungs- bzw. Versagensmechanismus auszugehen ist. Durch eine des Weiteren entsprechende Auslegung der Vorholzlänge der Kerne l_v auf einen Wert von 300 mm soll die allgemeine Systemcharakteristik darüber hinaus außerdem auf einen einzelnen, homogenen schubförmigen Schädigungs- bzw. Versagensmechanismus (Schubversagen des Betons) reduziert werden.

Wie die Versuchsergebnisse der Typologie Ke-mVM ferner zeigen ist für die Konzeption der kervenförmigen Verbindung kein additives stiftförmiges Verbindungsmittel innerhalb der Kerne zwingend notwendig, als durch die Applikation von ebendiesem keine explizite Erhöhung der Tragfähigkeit bzw. Steifigkeit der jeweiligen Verbindung zu erwarten ist. Zusätzlich eingebrachte stiftförmige Verbindungsmittel dienen daher vorrangig nur zur Bewerkstelligung einer notwendigen Abhebesicherung der Verbindung im tatsächlichen Trägersystem, welche im zu untersuchenden Verbunddeckensystem bereits durch die applizierten ballistisch vernagelten Puzzle Strip Schubleche realisiert werden kann.

Kapitel 4

Voruntersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung

Das untersuchte Vollholz-Beton-Verbunddeckensystem definiert sich, wie bereits einleitend in *Kapitel 2* beschrieben, auf Basis einer neuartigen kombinierten Applikation von Schubverbindersystemen in Form von linienförmigen ballistisch vernagelten Puzzle Strip Schublechen und punktuellen ausgerundeten Kerven ohne zusätzliche Verbindungsmittel zur Abhebesicherung. Während in diesem Zusammenhang zu nicht ballistisch vernagelten stiftförmigen Verbindungsmitteln sowie auch zu Kerven bereits aussagekräftige Erfahrungswerte im Allgemeinen vorliegen, stellt die ballistische Vernagelung der Puzzle Strip Schubleche eine bislang unbekannte Typologie von Verbindung dar. Um daher erste Erfahrungswerte zur konzeptionellen Applikation dieser Verbindungsform zu erlangen, werden diverse Voruntersuchungen zur funktionellen Verarbeitung bzw. zu den mechanischen Eigenschaften ebendieser durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Voruntersuchungen sollen weiterführend nachfolgend in *Kapitel 4* in kurzer Form zusammengefasst vorgestellt werden.

4.1 Auswahl eines geeigneten stiftförmigen Verbindungsmittels

Um eine strukturelle Assemblierung des neuartigen Vollholz-Beton-Verbunddeckensystems zu ermöglichen bedarf es einer geeigneten ballistischen Vernagelung der maßgebenden Komponenten in Form der Puzzle Strip Schubleche und der darunter liegenden hölzernen Basisschicht. In diesem Kontext liegt hierfür grundsätzlich eine Vielzahl an marktüblichen Vernagelungsmöglichkeiten vor, welche auf Basis einer entsprechenden Vorrecherche allerdings auf die drei maßgeblichen Verbindungsmitteltypen

- Beck 3.3 x 40 mm (Ballistiknagel mit glattem Schaft)
- ITW 2.8 x 50 mm (Ballistiknagel mit rillenförmigem Schaft)
- TJEP 4.0 x 50 mm (Ballistiknagel mit rillenförmigem Schaft)

eingegrenzt werden kann, wie nachfolgend auch aus Abb. 4.1 ersichtlich wird.



Abb. 4.1: Verbindungsmitteltypen innerhalb der Voruntersuchungen: a) Beck 3.3 x 40 mm, b) ITW 2.8 x 50 mm, c) TJEP 4.0 x 50 mm

Die gemäß Abb. 4.1 dargestellten ins Auge gefassten potentiellen Verbindungsmitteltypen unterscheiden sich hierbei nicht nur auf Basis ihrer jeweiligen geometrischen, sondern darüber hinaus auch mit Bezug auf ihre generellen strukturellen Eigenschaften. So stellt sich in diesem Kontext der Verbindungsmitteltyp Beck 3.3 x 40 mm dabei als glattschaftiges Element mit diamantförmiger Nagelspitze dar, während sich die Verbindungsmitteltypen ITW 2.8 x 50 mm und TJEP 4.0 x 50 mm demgegenüber als Elemente mit rillenförmigem Schaft und konischer Nagelspitze charakterisieren.

Überdies hinweg zeigen die genannten Verbindungsmitteltypen weiterführend wesentliche Unterschiede in der generellen applikationsbedingten Handhabung ebendieser. Während die Typologien Beck 3.3 x 40 mm und ITW 2.8 x 50 mm sich in diesem Zusammenhang durch eine direkte ballistische Vernagelung der Verbindungsmittel mit ruckartigem Einschlagprozess durch die Puzzle Strip Schubleche hindurch kennzeichnen, erfordert der Verbindungsmitteltyp TJEP 4.0 x 50 mm einen kontinuierlichen Einschlagprozess mit vorgebohrtem Nagelgrund in den zu verbindenden Blechelementen.

Aus diesen typologisch divergierenden Applikationsmerkmalen lassen sich demnach bereits a priori stark variierende Verarbeitungseigenschaften feststellen, welche anhand von entsprechenden Voruntersuchungen erweitert detektiert und festgehalten werden sollen. Zu diesem Zweck werden für alle Verbindungsmitteltypen folglich vorauswertende Slip Block (Sl) Bruchversuche durchgeführt, durch welche einerseits somit nicht nur die maßgebenden mechanischen Eigenschaften der unterschiedlichen Verbindungsmitteltypen in Form der Verschiebungsmoduln K_{ser} und Schubtragfähigkeiten F_{vR} auf Basis der resultierenden Last-Verschiebungs-Zusammenhänge abgebildet werden können, sondern anhand derer andererseits speziell auch eine Detektion und Bewertung der maßgebenden Verarbeitungseigenschaften in der Herstellung der einzelnen Versuchsreihen erreicht werden soll.

4.1.1 Versuchskonzeption der vorauswertenden Slip Block Bruchversuche

Die vorauswertenden Slip Block (Sl) Bruchversuche umfassen hierbei insgesamt drei konzeptionell idente Versuchsreihen basierend auf den drei maßgeblichen Verbindungsmitteltypen Beck 3.3 x 40 mm, ITW 2.8 x 50 mm und TJEP 4.0 x 50 mm, wobei die Anzahl n der einzelnen Probekörper innerhalb der Versuchsreihen bei jeweils 5 Proben liegt.

Im weiteren Kontext einer geometrischen Ausgestaltung der einzelnen Versuchsreihen charakterisieren sich diese grundsätzlich als einfach symmetrische Holz-Blech-Verbindungen mit einem einreihigen Vernagelungsschema in den Scherflächen, wie auch entsprechend aus der allgemeinen Übersicht zum Versuchsaufbau gemäß Abb. 4.2 entnommen werden

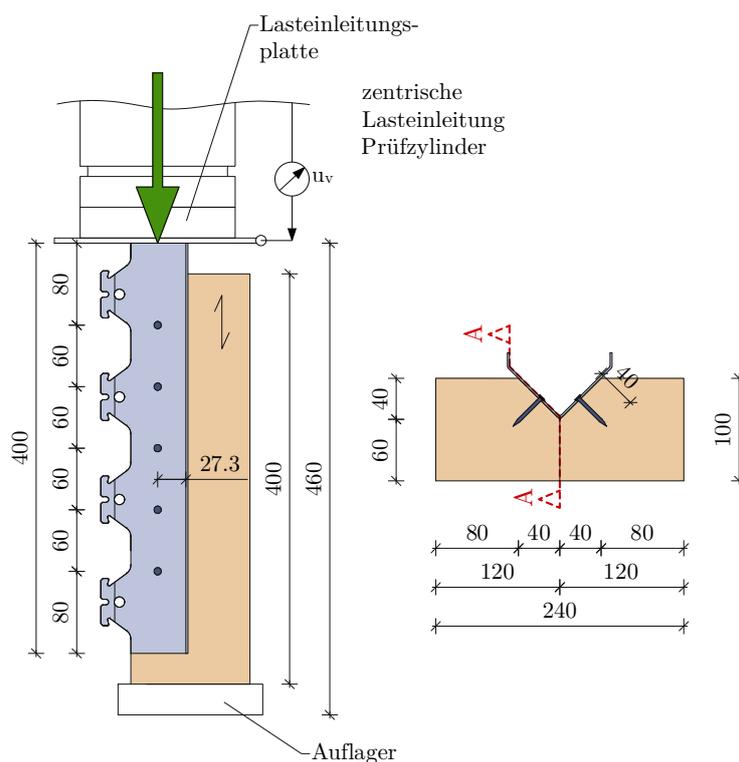


Abb. 4.2: Übersicht zum Versuchsaufbau der vorauswertenden Slip Block Bruchversuche | Schnitt A-A (links), Querschnitt (rechts)

kann. Wie aus der genannten Abbildung des Weiteren ersichtlich wird, definieren sich die jeweiligen Versuchsreihen darüber hinaus durch ein, in beiden Scherflächen vorhandenes, symmetrisches Vernagelungsschema, welches sich durch jeweils fünf gleichmäßig eingebrachte Verbindungsmittel pro Scherfläche (Versuchsbezeichnung 1r5) charakterisiert. Mit weiterführendem Bezug auf die allgemeine Versuchskonzeption erfolgt die Durchführung dieser Versuche des Weiteren auf Basis eines allgemeinen Lastregimes in Anlehnung an *ÖNORMEN 26891* [17] (siehe hierzu auch erläuternd *Kapitel 3*), sowie werden diese in detaillierter Form gemäß *ÖNORMEN 14358* [44] ausgewertet, wie auch aus *Anhang B* ersichtlich wird.

4.1.2 Versuchsergebnisse der vorauswertenden Slip Block Bruchversuche

Mit Hinblick auf die kontextuellen Versuchsergebnisse in Form der maßgebenden mechanischen Eigenschaften der jeweiligen Verbindungsmitteltypen weisen grundsätzlich alle untersuchten Versuchsreihen ein homogenes Trag- und Verformungsverhalten auf.

Wie gemäß dargestellter Abb. 4.3 ersichtlich, definieren sich die maßgebenden Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der einzelnen Versuchsreihen dabei durch vollständig kontinuierliche Spektren, bestehend aus einem nur in geringem Maße vorhandenen linear-elastischen Verformungsanteil gefolgt von einem weitreichenden Fließbereich mit großteils maßgeblichem Fließplateau bis zum Erreichen der maximalen Grenzverschiebung u_u . Mit

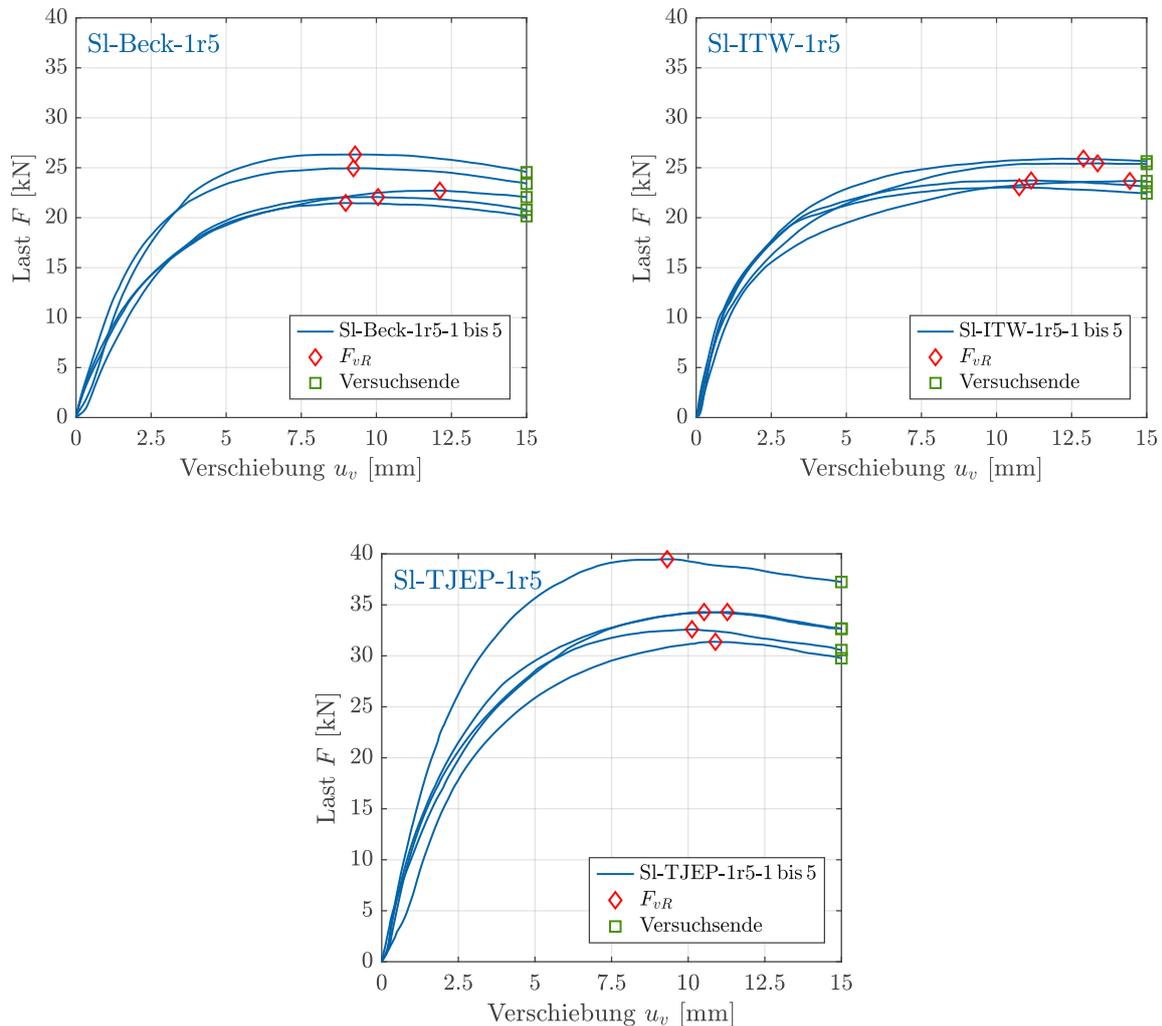


Abb. 4.3: Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der vorauswertenden Slip Block Bruchversuche | Versuchsreihe SI-Beck-1r5 (oben links), Versuchsreihe SI-ITW-1r5 (oben rechts), Versuchsreihe SI-TJEP-1r5 (unten)

Bezug auf die erreichbaren charakteristischen Schubtragfähigkeiten $F_{vR,k}$ gemäß Abb. 4.4 definieren sich die Versuchsreihen SI-Beck-1r5 und SI-ITW-1r5 dabei durch eine ähnliche Charakteristik mit Zahlenwerten in einem Bereich von $F_{vR,k} \approx 18$ kN bzw. $F_{vR,k} \approx 21$ kN, sowie kann die Versuchsreihe SI-TJEP-1r5 einen vergleichsweise erhöhten Wert von $F_{vR,k} \approx 27$ kN vorweisen. Im weiterführenden Kontext der mittleren Verschiebungsmoduln $K_{ser,mean}$ charakterisiert sich die Versuchsreihe SI-ITW-1r5 demgegenüber durch den höchst erreichten Zahlenwert von $K_{ser,mean} \approx 30$ kN/mm, während die übrigen Versuchsreihen vergleichsweise leicht verminderte (Versuchsreihe SI-TJEP-1r5 $K_{ser,mean} \approx 26$ kN/mm) bzw. deutlich verminderte Werte (Versuchsreihe SI-Beck-1r5 $K_{ser,mean} \approx 19$ kN/mm) aufweisen. Mit Hinblick auf die kontextuellen Versuchsergebnisse in Form der maßgebenden mechanischen Eigenschaften der jeweiligen Verbindungsmitteltypen zeigen demnach schlussfolgernd alle Typologien eine grundsätzliche Applikationseignung, der Verbindungsmitteltyp TJEP 4.0 x 50 mm kann aber als geeignetste Untersuchungsvariante hervorgehoben werden.

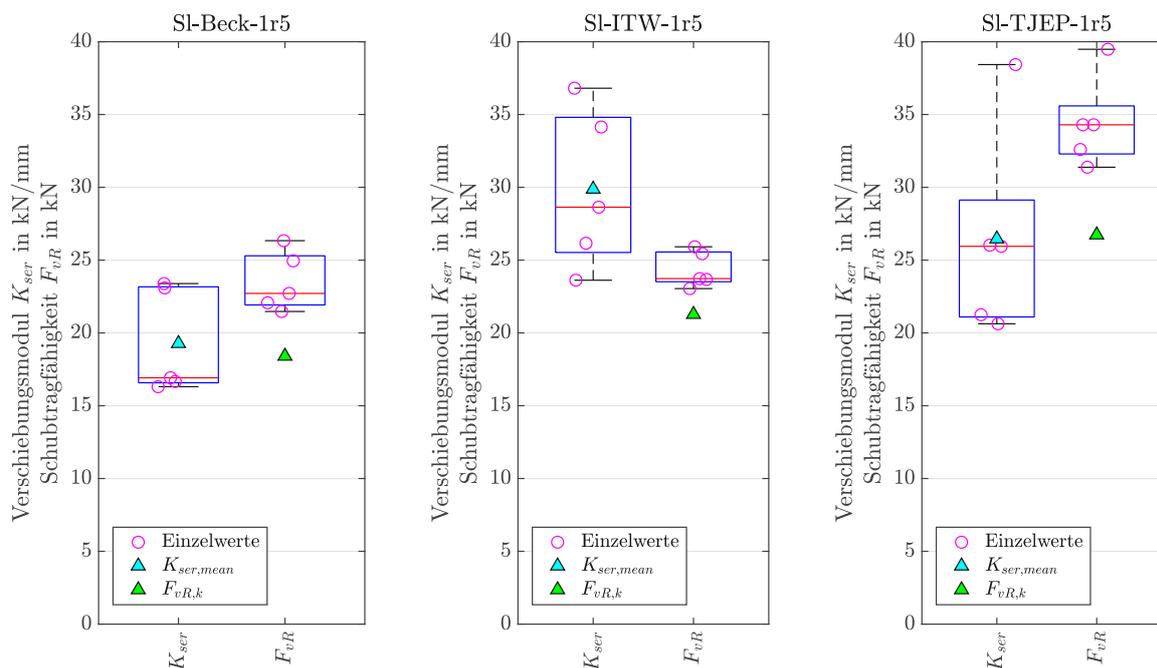


Abb. 4.4: Verschiebungsmodul K_{ser} und Schubtragfähigkeiten F_{vR} der vorauswertenden Slip Block Bruchversuche | Versuchsreihe SI-Beck-1r5 (links), Versuchsreihe SI-ITW-1r5 (mittig), Versuchsreihe SI-TJEP-1r5 (rechts)

Mit darüber hinaus folgendem Hinblick auf die kontextuellen Versuchsergebnisse in Form der maßgebenden Verarbeitungseigenschaften der jeweiligen Verbindungsmitteltypen weisen die Typologien demgegenüber allerdings gegensätzliche Eigenschaften auf. So definiert die Versuchsreihe SI-Beck-1r5 sich demnach durch geeignetste Vernagelungseigenschaften in Form eines gleichmäßigen Einschlagbilds bzw. einer gleichmäßigen Einschlagtiefe bei einer zeitgleich sehr hohen Verarbeitungsgeschwindigkeit, während sich die Versuchsreihe SI-ITW-1r5 dahingegen nur durch ein ungleichmäßiges Einschlagbild bzw. durch eine nur ungleichmäßige Einschlagtiefe bei allerdings wiederum hoher Verarbeitungsgeschwindigkeit kennzeichnet. Demgegenüber charakterisiert sich die Versuchsreihe SI-TJEP-1r5 durch ein wiederum sehr gleichmäßiges Einschlagbild bzw. durch eine sehr gleichmäßige Einschlagtiefe, kann allerdings nur eine sehr geringe Verarbeitungsgeschwindigkeit (kontinuierlicher Einschlagprozess anstelle eines ruckartigen Einschlagprozesses) vorweisen.

Basierend auf einer gleichzeitigen Beurteilung sowohl der mechanischen, als auch der verarbeitungstechnischen, Eigenschaften der unterschiedlichen Verbindungsmitteltypen kann demnach schlussfolgernd die Typologie Beck 3.3 x 40 mm (Versuchsreihe SI-Beck-1r5) mit moderaten mechanischen Charakteristiken und gleichzeitig gepaarten idealen Verarbeitungseigenschaften als holistisch geeignetestes Verbindungsmittel detektiert werden. Alle weiterführenden Untersuchungen zum forschungsrelevanten neuartigen Vollholz-Beton-Verbunddeckensystem sollen demnach auf Basis dieses Verbindungsmitteltyps erfolgen.

4.2 Weiterführende Eigenschaften des gewählten stiftförmigen Verbindungsmittels

Nach der Vorauswahl des Verbindungsmitteltyps Beck 3.3 x 40 mm als gesamtheitlich geeignetste Form zur ballistischen Vernagelung der Puzzle Strip Schubleche sollen für diese Typologie weiterführende Voruntersuchungen zur Detektion von Geometrieinflüssen innerhalb möglicher Vernagelungsschemata durchgeführt werden. Hierzu werden wiederum Slip Block (SI) Bruchversuche durchgeführt, welche in diesem Kontext jedoch nicht hinsichtlich des verwendeten Verbindungsmitteltyps, sondern lediglich mit Bezug auf Form und Art des applizierten Vernagelungsschemas der festgelegten Typologie Beck 3.3 x 40 mm variieren. Darüber hinaus sollen die für die charakteristischen Versuchsreihen materialspezifischen Eigenschaften der hölzernen Versuchskomponente (Holzfeuchte und Rohdichte) detektiert werden, um eine weiterführende normative Vergleichsbetrachtung mit Hinblick auf *ÖNORM B 1995-1-1* [12] im Kontext der vorhandenen mechanischen Verbindungseigenschaften (Verschiebungsmodul K_{ser} bzw. Schubtragfähigkeit F_{vR}) zu ermöglichen. Die begleitenden Untersuchungen zur Ermittlung der Feuchtegehalte und Rohdichten der Holzkomponenten der einzelnen Versuchsproben werden hierbei mittels Darmmethode in Anlehnung an *ÖNORM EN 13183-1* [45], sowie gemäß *ÖNORM EN 384* [46] durchgeführt.

4.2.1 Versuchskonzeption der Slip Block Bruchversuche

Die Slip Block (SI) Bruchversuche umfassen im Allgemeinen insgesamt drei Versuchsreihen basierend auf dem maßgeblichen Verbindungsmitteltyp Beck 3.3 x 40 mm (die Versuchsergebnisse selbst beinhalten aufgrund der vorliegenden Similaritäten weiterführend allerdings ebenso die Versuchsreihe SI-Beck-1r5), wobei die Anzahl n der einzelnen Probekörper innerhalb der Versuchsreihen hierbei zwischen 5 und 12 Proben liegt. Darüber hinaus liegen im weiteren Kontext einer grundsätzlichen strukturellen Versuchsgestaltung, sowie auch mit Hinblick auf die Versuchsdurchführung und -auswertung äquivalente Charakteristiken wie bei den vorauswertenden Slip Block (SI) Bruchversuchen vor. Mit Bezug auf eine kontextuell detaillierte Beschreibung der genannten Eigenschaften darf in diesem Zusammenhang daher weiterführend auf die Inhalte aus *Kapitel 4.1.1* verwiesen werden.

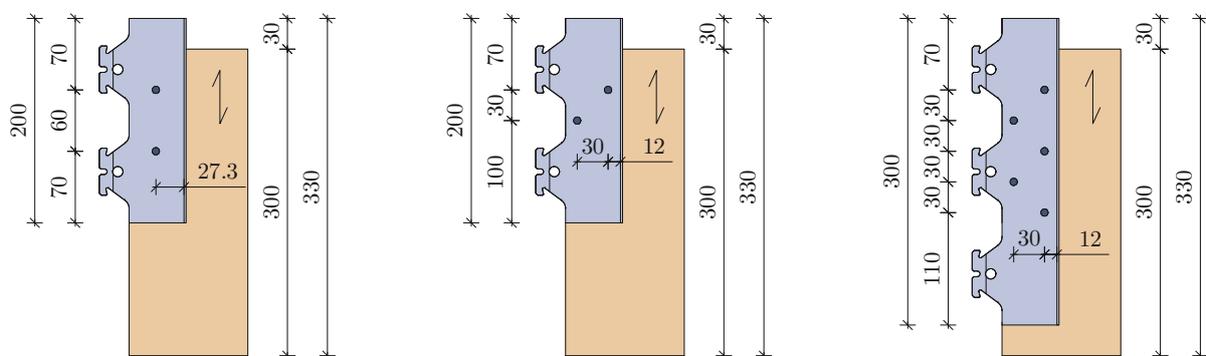


Abb. 4.5: Geometrische Versuchsdetails Slip Block Bruchversuche | Versuchsreihe SI-Beck-1r2 (links), Versuchsreihe SI-Beck-2rd2 (mittig), SI-Beck-2rd5 (rechts)

Ferner stellen sich die angewendeten Vernagelungsschemata innerhalb der Versuchsreihen durch eine einerseits wiederum einreihige Charakteristik mit zwei Verbindungsmitteln pro Scherfläche (Versuchsbezeichnung 1r2) dar, sowie definieren sich diese andererseits darüber hinaus durch zweireihige, diagonal angeordnete, Schemata mit zwei bzw. fünf Verbindungsmitteln pro Scherfläche (Versuchsbezeichnungen 2rd2 bzw. 2rd5), wie ebenso aus Abb. 4.5 ersichtlich wird. Auf Basis dieser Versuchsanordnung soll es demnach möglich werden den Geometrieinfluss einer zweireihigen diagonalen Vernagelungscharakteristik im Vergleich zu einer einreihigen linienförmigen Typologie zu detektieren, wobei die zweireihigen, diagonal angeordneten, Schemata hierbei schlussfolgernd dem fest definierten, im tatsächlichen Verbunddeckensystem applizierten, charakteristischen winkelgleichen Zickzack-Muster der Vernagelung gemäß *Kapitel 2* entsprechen.

4.2.2 Versuchsergebnisse der Slip Block Bruchversuche

Mit Hinblick auf die kontextuellen Versuchsergebnisse in Form der maßgebenden mechanischen Eigenschaften der jeweiligen Versuchsreihen weisen die untersuchten Typologien äquivalent zu den Versuchsreihen aus *Kapitel 4.1* ein wiederum ganzheitlich homogenes, stetiges Trag- und Verformungsverhalten auf. Wie aus Abb. 4.6 bzw. Abb. 4.7 ersichtlich, definieren sich die maßgebenden Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der einzelnen Versuchsreihen dabei ebenso durch vollständig kontinuierliche Spektren, bestehend aus einem nur in geringem Maße vorhandenen linear-elastischen Verformungsanteil gefolgt von einem weitreichenden Fließbereich mit großteils vorhandenem Fließplateau bis zum Erreichen der maximalen Grenzverschiebung u_u . Betrachtet man die maßgebenden mechanischen Enitäten der jeweiligen Versuchsreihen dabei, wie aus Abb. 4.8 ersichtlich, weiterführend auf Basis einer auf ein einzelnes Verbindungsmittel normierten Darstellung, wird der geometrische Einfluss einer zweireihigen diagonalen Vernagelungscharakteristik im Vergleich zu einer einreihigen Form deutlich erkennbar.

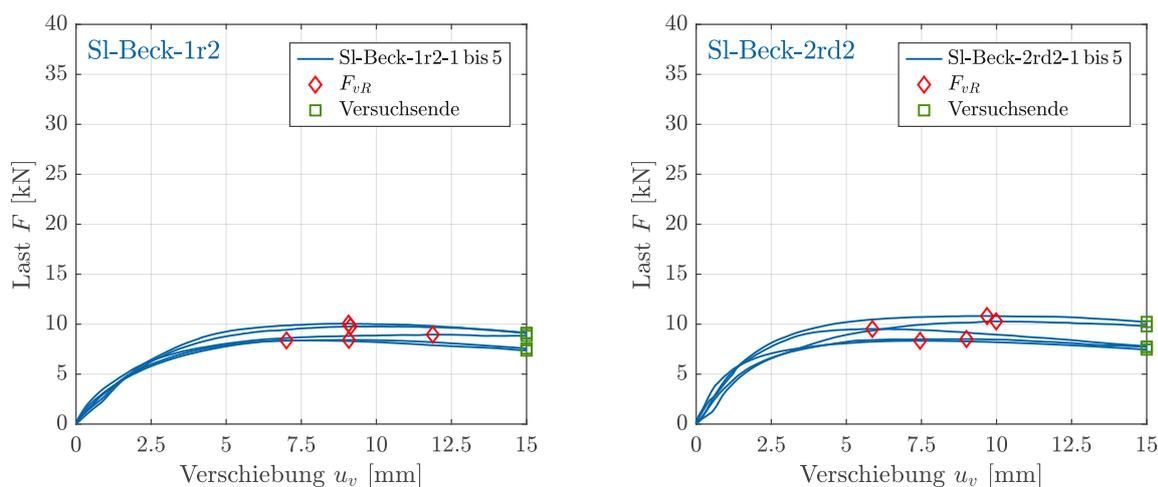


Abb. 4.6: Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der Slip Block Bruchversuche | Versuchsreihe Sl-Beck-1r2 (links), Versuchsreihe Sl-Beck-2rd2 (rechts)

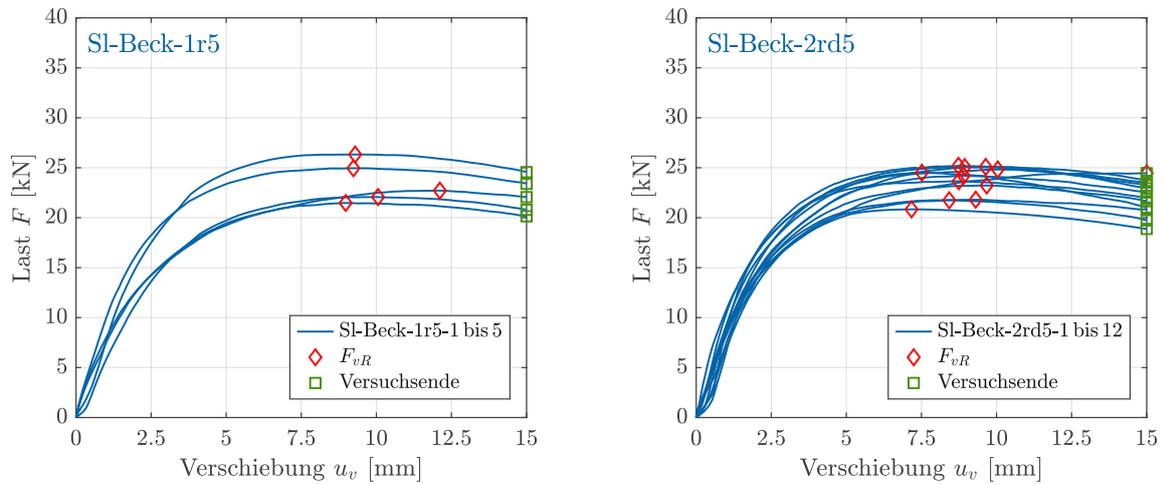


Abb. 4.7: Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der Slip Block Bruchversuche | Versuchsreihe Sl-Beck-1r5 (links), Versuchsreihe Sl-Beck-2rd5 (rechts)

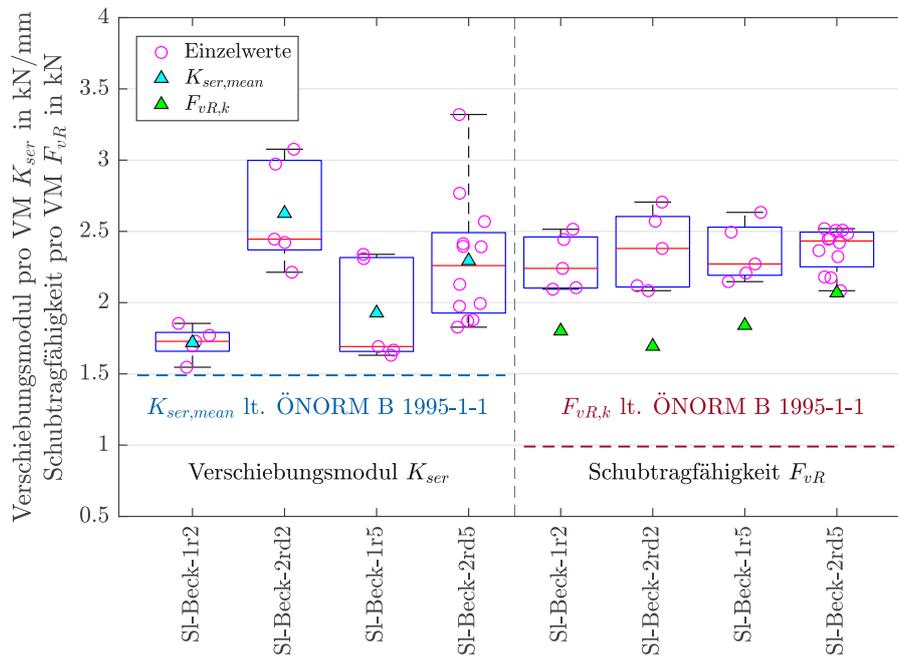


Abb. 4.8: Verschiebungsmodul K_{ser} und Schubtragfähigkeiten F_{vR} der Slip Block Bruchversuche

So definieren sich die zweireihig diagonal vernagelten Versuchsreihen (Sl-Beck-2rd2 und Sl-Beck-2rd5) mit Bezug auf die mittleren Verschiebungsmoduln $K_{ser,mean}$ durch verhältnismäßig gesteigerte Werte im Vergleich zu den Versuchsreihen mit einreihiger Vernagelung

(SI-Beck-1r2 und SI-Beck-1r5). Während die einreihigen Versuchsreihen in diesem Zusammenhang hierbei nur Zahlenwerte in einem Bereich von $K_{ser,mean} = 1.72$ kN/mm bzw. $K_{ser,mean} = 1.93$ kN/mm vorweisen können, reichen die einzelnen Ergebnisgrößen der zweireihigen diagonalen Typologien von $K_{ser,mean} = 2.29$ kN/mm bis $K_{ser,mean} = 2.63$ kN/mm. Mit Bezug auf die maßgebenden Verschiebungsmoduln K_{ser} kann demnach eine zweireihige diagonale Charakteristik als geometrisch wesentlich vorteilhaftes Vernagelungsschema bezeichnet werden.

Ein ähnliches Bild zeigt sich weiterführend ebenso mit Bezug auf die charakteristischen Schubtragfähigkeiten $F_{vR,k}$. Auch wenn die charakteristische Schubtragfähigkeit $F_{vR,k}$ der Versuchsreihe SI-Beck-2rd2 aufgrund einer größeren Ergebnisstreuung unter jenen der einreihigen Typologien SI-Beck-1r2 und SI-Beck-1r5 liegt ($F_{vR,k} = 1.69$ kN im Vergleich zu $F_{vR,k} = 1.80$ kN bzw. $F_{vR,k} = 1.84$ kN), so zeigen sich hierbei jedoch die Mediane der zweireihig diagonalen Versuchsreihe als verhältnismäßig erkennbar gesteigert. Ebenso definiert sich die charakteristische Schubtragfähigkeit $F_{vR,k}$ der Versuchsreihe SI-Beck-2rd5 als entsprechend erhöhte Ergebnisgröße ($F_{vR,k} = 2.07$ kN) im Vergleich zu den Entitäten der einreihigen Versuchsreihen, wodurch wiederum eine zweireihige diagonale Charakteristik als geometrisch vorteilhaftes Vernagelungsschema bezeichnet werden kann.

Als durchwegs positiv können die resultierenden Ergebnisgrößen auch mit Hinblick auf eine normative Vergleichsbetrachtung im Kontext von *ÖNORM B 1995-1-1* [12] beschrieben werden. Basierend auf den gegebenen Verbindungsmiteleigenschaften des maßgebenden Verbindungsmitteltyps Beck 3.3 x 40 mm, sowie auf der resultierenden mittleren Rohdichte der hölzernen Versuchskomponenten ρ_{mean} aufbauend, können die normativen Vergleichswerte für den mittleren Verschiebungsmodul $K_{ser,mean}$ und die charakteristische Schubtragfähigkeit $F_{vR,k}$ demnach als auf der sicheren Seite liegend bestätigt werden. Laut *ÖNORM B 1995-1-1* [12] ergeben sich hierbei ein resultierender mittlerer Verschiebungsmodul von $K_{ser,mean} = 1.49$ kN/mm sowie eine resultierende charakteristische Schubtragfähigkeit von $F_{vR,k} = 0.99$ kN. Vergleicht man diese theoretischen Ergebnisgrößen mit jenen aus den tatsächlichen Versuchsreihen wird deutlich, dass die maßgebenden Entitäten aus den Untersuchungen weiterführend ausreichende bis teils deutliche Sicherheitsreserven aufweisen. Der Einsatz der beschriebenen ballistischen Vernagelung innerhalb des tatsächlichen Verbunddeckensystems lässt sich demnach abschließend als nicht nur technisch sondern auch normativ adäquates Lösungskonzept bezeichnen.

Kapitel 5

Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten unter Kurzzeitbeanspruchung

Aufbauend auf der in den Vorkapiteln beschriebenen allgemeinen Systemcharakterisierung der untersuchten Strukturtypologie sollen im nachfolgenden *Kapitel 5* die maßgebenden Hauptuntersuchungen des forschungsrelevanten neuartigen Verbunddeckensystems mit Bezug auf die zeitliche Kurzzeitskalenebene vorgestellt werden. Unter einer allgemeinen Betrachtung umfassen die vorliegenden Forschungsinhalte dabei experimentelle und numerische Untersuchungen an unterschiedlichen Typologien von alleinstehend bzw. kombiniert ausgeführten Verbundprobekörpern, sowie an diesen Versuchsreihen orientierte begleitende experimentelle Untersuchungen an Materialprobekörpern der Verbundpartner Holz und Beton, jeweils durchgeführt auf strukturell variierenden, klein- und großmaßstäblichen Skalenebenen.

Ziel dieser vollumfänglichen Untersuchungen soll hierbei sein, das systemindividuelle Trag- und Verformungsverhalten des neuartigen Verbunddeckensystems einerseits allgemein zu identifizieren und weiterführend zu evaluieren, sowie andererseits auch die dabei auftretenden alleinstehenden und kombinierten Eigenschaften bzw. die Interaktionsmechanismen der untersuchten Systemtypologien zu detektieren und diese anhand von mechanischen Kenngrößen zu quantifizieren. In diesem Sinne soll es abschließend somit nicht nur möglich werden maßgebende systemische Einflussparameter auf das systemindividuelle Trag- und Verformungsverhalten abzuleiten, sondern diese Systemgrößen ebenso anhand von numerischen Untersuchungen zu evaluieren und deren Auswirkungen gleichermaßen festzuhalten.

5.1 Umfang und Aufbau der Untersuchungen

Die maßgebenden Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten unter Kurzzeitbeanspruchung umfassen gemäß der einleitenden Beschreibung, bzw. ebenso entsprechend der Beschreibung aus *Kapitel 1*, konzeptionell und strukturell variierende Untersuchungen auf maßstäblich unterschiedlichen Skalenebenen, wie nachfolgend auch aus Abb. 5.1 grafisch zusammengefasst entnommen werden kann.

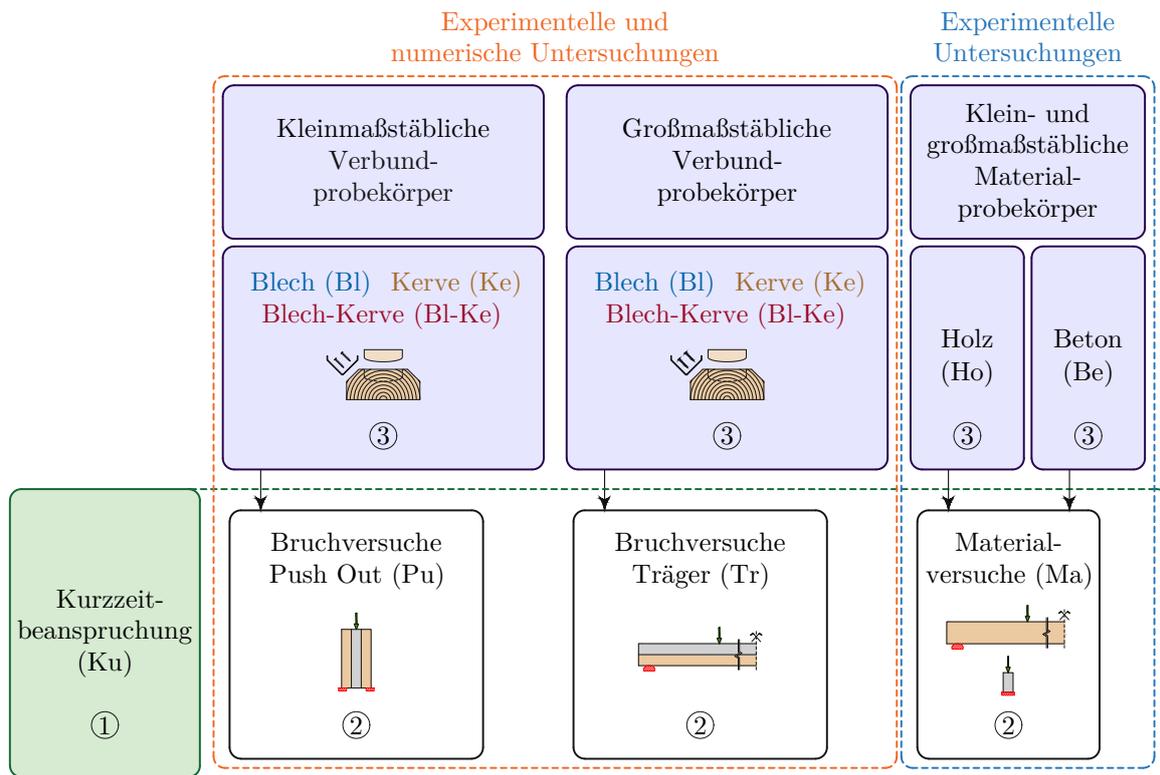


Abb. 5.1: Versuchsspektrum der Untersuchungen an Verbundprobekörpern und der begleitenden Untersuchungen an Materialprobekörpern unter Kurzzeitbeanspruchung

Gemäß dargestellter Abb. 5.1 umfasst das vorliegende Spektrum der Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung hierbei insgesamt acht verschiedene Versuchsreihen, bestehend aus jeweils drei unterschiedlichen Typologien der klein- bzw. großmaßstäblichen Verbundprobekörper (Blech, Kerve und Blech-Kerve), sowie aus zwei Varianten der klein- und großmaßstäblichen Materialprobekörper (Holz und Beton).

Die konzeptionellen Kategorien der Verbundprobekörper umfassen hierbei sowohl experimentelle als auch numerische Untersuchungen, während die Kategorie der Materialprobekörper im Vergleich dazu lediglich begleitende experimentelle Untersuchungen (zur Detektion der vorhandenen Materialeigenschaften) beinhaltet. Neben den vollumfänglichen experimentellen Untersuchungen an allen Versuchsreihen beziehen die numerischen Untersuchungen demnach schlussfolgernd sechs verbleibende unterschiedliche Typologien von Versuchsaufbauten mit ein.

Hinsichtlich der dabei verwendeten Versuchsreihenbezeichnungen können dahingehend weiterführend die Indexierungsnummern gemäß Abb. 5.1 zur Hilfe genommen werden, wobei die jeweilige Versuchsreihenbezeichnung sich hierbei immer gemäß der Indexierungsfolge ①② - ③ (z.B. KuPu-Bl, KuTr-Bl-Ke oder KuMa-Ho) gliedert. Auf dieser Systematik aufbauend, können die maßgebenden Versuchsreihen hinsichtlich Bezeichnung und Anzahl der Probekörper n innerhalb der Versuchsreihen abschließend wie folgt kumuliert tabellarisch dargestellt werden.

Tab. 5.1: Versuchsreihenbezeichnung der Untersuchungen an Verbundprobekörpern und der begleitenden Untersuchungen an Materialprobekörpern unter Kurzzeitbeanspruchung

Versuchsreihe	n	Versuchsreihe	n
KuPu-Bl	12	KuTr-Ke	3
KuPu-Ke	12	KuTr-Bl-Ke	3
KuPu-Bl-Ke	12	KuMa-Ho	70
KuTr-Bl	3	KuMa-Be	18

Gemäß den Darstellungen in Tab. 5.1 umfassen die Versuchsreihen der klein- und großmaßstäblichen Verbundprobekörper jeweils 12 bzw. 3 Proben je Versuchsreihe und bilden den maßgeblichen Schwerpunkt der Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung ab. Demgegenüber definieren sich die Versuchsreihen der Materialprobekörper durch eine Anzahl von 70 bzw. 18 Proben je Versuchsreihe und stellen eine zu den Hauptuntersuchungen begleitende Detektionsgrundlage zur Beschreibung der vorhandenen Materialeigenschaften dar. Gemäß diesem Konzept soll nachfolgend zu Beginn auch die Vorstellung der einhergehenden Untersuchungen zur Detektion der Materialeigenschaften in Form der begleitenden experimentellen Untersuchungen an klein- und großmaßstäblichen Materialprobekörpern stattfinden, bevor weiterführend die wesentlichen Untersuchungsschwerpunkte in Form der experimentellen und numerischen Untersuchungen an klein- und großmaßstäblichen Verbundprobekörpern dargebracht werden.

5.2 Begleitende experimentelle Untersuchungen an klein- und großmaßstäblichen Materialprobekörpern

Die begleitenden experimentellen Untersuchungen an klein- und großmaßstäblichen Materialprobekörpern umfassen Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Materialprobekörpern aus Beton (KuMa-Be) zur Ermittlung mechanischer und physikalischer Kenngrößen in Form von Betondruckfestigkeit f_c und Rohdichte ρ , sowie entsprechende Untersuchungen an großmaßstäblichen Materialprobekörpern aus Holz (KuMa-Ho) zur Ermittlung mechanischer und physikalischer Kenngrößen in Form von lokalem Biege-Elastizitätsmodul E_0 , Rohdichte ρ und Holzfeuchte u .

Die jeweilige Versuchsdurchführung erfolgt dabei unter der ausdrücklichen Berücksichtigung wesentlicher Eigenschaften der klein- und großmaßstäblichen Verbundprobekörper, alle maßgebenden Untersuchungen werden in diesem Zusammenhang demnach an explizit für die Herstellung der Verbundprobekörper verwendeten Materialien durchgeführt.

5.2.1 Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Betonproben

5.2.1.1 Versuchskonzeption und normative Grundlagen

Die Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Betonproben (KuMa-Be) umfassen wie bereits eingangs erwähnt vollumfänglich 18 Probekörper, wobei diese herstellungsbedingt aus insge-

samt vier Betonagechargen (Ch1-KuMa-Be bis Ch4-KuMa-Be, siehe hierzu auch *Anhang C*) resultieren. Die hierbei angewendete Materialkonfiguration definiert sich dabei, wie bereits eingehend in *Kapitel 2* angemerkt, auf Basis eines vorhandenen Betons der Betongüte C 30/37 B2 F45 GK32 42.5N RRS, welcher sich weiterführend gemäß *ÖNORMEN 206* [6] und *ÖNORM B 4710-1* [7] charakterisiert.

Die allgemeine Versuchskonzeption zur Ermittlung der einzelnen Betondruckfestigkeiten f_c definiert sich dabei grundlegend in Anlehnung an *ÖNORM B 4710-3* [47], sowie auf Basis der damit in Verbindung stehenden normativen Dokumente *ÖNORMEN 12390-1* [48], *ÖNORMEN 12390-2* [49] und *ÖNORMEN 12390-3* [50]. In diesem Sinne werden hierbei entsprechende Druckprüfungen an zylindrischen Betonproben (Betonalter $t = 28 d$) durchgeführt, wie nachfolgend auch aus der allgemeinen Übersicht zum Versuchsaufbau gemäß *Abb. 5.2* entnommen werden kann.

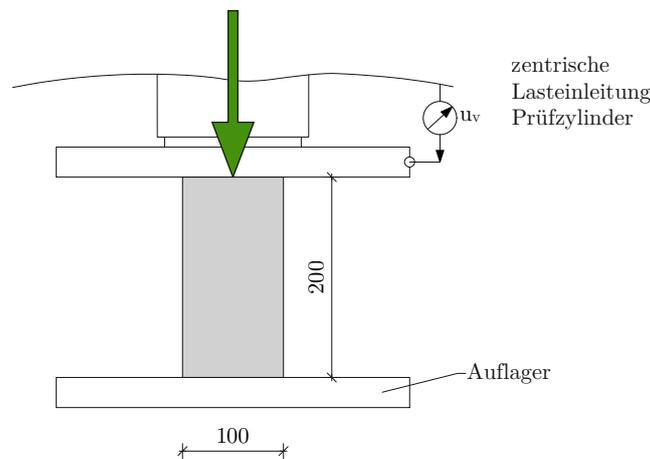


Abb. 5.2: Übersicht zum Versuchsaufbau der Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Betonproben | Ermittlung der Betondruckfestigkeiten f_c

Auf Basis dieser Druckprüfungen kann demnach eine einerseits allgemeine Detektion der vorliegenden Betondruckfestigkeiten f_c der einzelnen Proben erfolgen, sowie können in diesem Kontext darüber hinaus andererseits Identitätsprüfungen der jeweiligen Betonagechargen gemäß *ÖNORMEN 206* [6] und *ÖNORM B 4710-1* [7] zur folglichen Bestätigung der geforderten Betongüte stattfinden. Die sich in diesem Zusammenhang ergebende begleitende statistische Auswertung erfolgt hierbei weiterführend gemäß *ÖNORMEN 1990* [18]. Neben den genannten Druckprüfungen werden ebenfalls Untersuchungen zur Ermittlung der jeweiligen Rohdichten ρ der einzelnen Proben durchgeführt. Die allgemeine Versuchskonzeption basiert hierbei auf einem gravimetrischen Prinzip in Form einer Gewichtsmessung nach dem Ausschalvorgang der Proben (Betonalter $t = 1 d$). Bei dieser Versuchskonzeption handelt es sich weiterführend um ein, im Vergleich zur aktuellen Normenlage vereinfachtes Messprinzip, in diesem Zusammenhang sei daher explizit erwähnt, dass das durchgeführte Bestimmungsverfahren hinsichtlich einer normativen Bewertung schlussfolgernd keine Konformität in Bezug auf *ÖNORMEN 12390-7* [51] aufweist und die Ergebnisse dieser Untersuchungen im vorliegenden Kontext lediglich informellen, aufgrund der allgemeinen Untersuchungsziele jedoch quantitativ repräsentativen, Charakter besitzen.

5.2.1.2 Darstellung und Interpretation der Versuchsergebnisse

Mit Bezug auf die Versuchsergebnisse der Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Betonproben weisen die einzelnen Proben, sowie auch die damit in Verbindung stehenden Betonagechargen, grundsätzlich die für die geforderte Betongüte zu erwartenden Eigenschaften auf.

Betrachtet man die kumulativ vorhandenen Betondruckfestigkeiten f_c aller Betonagechargen gemäß Abb. 5.3 (links), stellen sich diese als normalverteilte Größen mit einem Mittelwert der Betondruckfestigkeit f_{cm} von 37.14 MPa bei einer Standardabweichung σ von 1.59 MPa und einem Variationskoeffizienten CV von 0.04 dar. Der experimentell ermittelte Mittelwert der Betondruckfestigkeit f_{cm} zeigt sich demnach als quantitativ angenähert an dessen normativen Vergleichswert ($f_{cm} = 38$ MPa) gemäß *ÖNORMEN 1992-1-1* [52]. Darüber hinaus stellen sich alle Identitätsprüfungen der einzelnen Betonagechargen als für die geforderte Betongüte positiv erfüllt (vollständige Erfüllung der Kriterien 1 und 2, siehe hierzu auch *Anhang C*) dar. Mit Hinblick auf die vorhandene Betondruckfestigkeit f_c können die Versuchsergebnisse der Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Betonproben demnach als der geforderten Betongüte entsprechend, sowie als von einer konformen Grundgesamtheit stammend, bezeichnet werden.

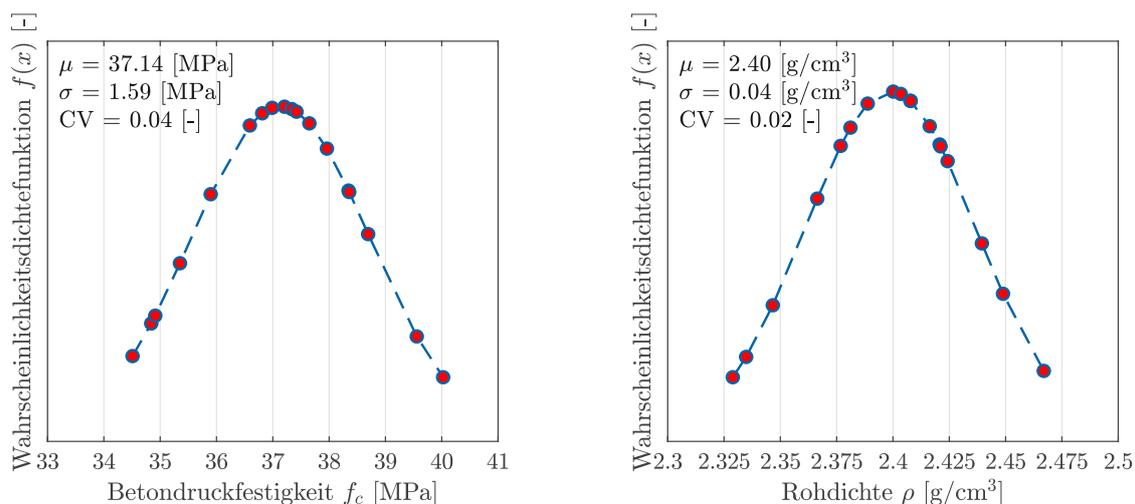


Abb. 5.3: Versuchsergebnisse der Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Betonproben | Histogramm der Betondruckfestigkeiten f_c (links), Histogramm der Rohdichten ρ (rechts)

Auch mit weiterführendem Hinblick auf die in den Untersuchungen vorhandenen Rohdichten ρ gemäß Abb. 5.3 (rechts) weisen die einzelnen Proben die zu erwartenden Eigenschaften auf. Die mittlere Rohdichte ρ_{mean} liegt hierbei bei einem Wert von 2.40 g/cm³, sowie charakterisieren sich die damit in Verbindung stehenden statistischen Parameter durch eine Standardabweichung σ von 0.04 g/cm³ bzw. durch einen Variationskoeffizienten CV von 0.02. Auch im Kontext der vorhandenen Rohdichten ρ können die Versuchsergebnisse der Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Betonproben somit abschließend als der geforderten Betongüte entsprechend beschrieben werden.

5.2.2 Untersuchungen an großmaßstäblichen Holzproben

5.2.2.1 Versuchskonzeption und normative Grundlagen

Die Untersuchungen an großmaßstäblichen Holzproben (KuMa-Ho) umfassen wie bereits einleitend erwähnt vollumfänglich 70 Probekörper, wobei diese vollständig aus einer einzelnen Liefercharge technisch getrockneter, gehobelter Vollholzbalken der Holzart Fichte (*Picea abies*) entstammen. Entsprechend einer konventionellen Nomenklatur handelt es sich dabei wie bereits in *Kapitel 2* angemerkt, im näheren Detail um rechteckige Nadelschnitthölzer in Form von Kanthölzern ohne vorhandene Keilzinkung gemäß *ÖNORM DIN 4074-1* [5]. Die allgemeine Versuchskonzeption zur Ermittlung der lokalen Biege-Elastizitätsmoduln E_0 definiert sich im vorliegenden Kontext dabei grundsätzlich auf Basis von Vierpunkt-Biegeprüfungen gemäß *ÖNORM EN 408* [53], sowie anhand einer damit in Verbindung stehenden statistischen Auswertung gemäß *ÖNORM EN 384* [46] und *ÖNORM EN 14358* [44]. Eine grafische Darstellung der genannten Versuchskonzeption kann dazu aus der nachfolgenden allgemeinen Übersicht zum Versuchsaufbau gemäß Abb. 5.4 entnommen werden.

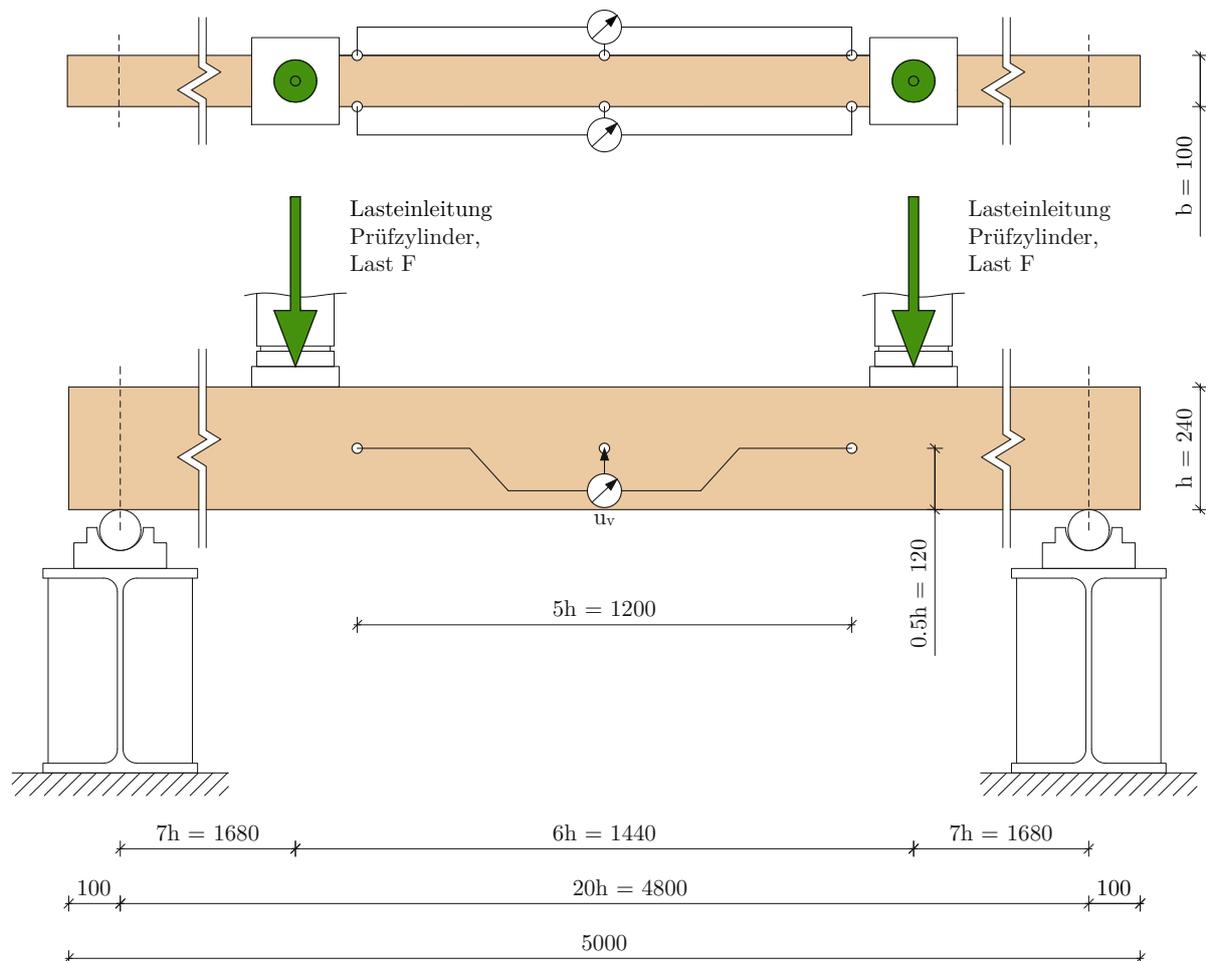


Abb. 5.4: Übersicht zum Versuchsaufbau der Untersuchungen an großmaßstäblichen Holzproben | Ermittlung der lokalen Biege-Elastizitätsmoduln E_0 | Grundriss (oben), Ansicht (unten)

Neben den genannten Vierpunkt-Biegeprüfungen werden ebenfalls Untersuchungen zur Ermittlung der jeweiligen Rohdichten ρ sowie der damit in Verbindung stehenden Holzfeuchten u der einzelnen Proben durchgeführt. Die allgemeine Versuchskonzeption zur Ermittlung dieser physikalischen Größen basiert hierbei auf einem gravimetrischen Prinzip in Form einer Gewichtsmessung unter Anwendung der Darmmethode in Anlehnung an *ÖNORMEN 13183-1* [45], sowie weiterführend auf Grundlage einer damit in Verbindung stehenden statistischen Auswertung gemäß *ÖNORMEN 384* [46] und *ÖNORMEN 14358* [44].

5.2.2.2 Darstellung und Interpretation der Versuchsergebnisse

Mit Bezug auf die Versuchsergebnisse der Untersuchungen an großmaßstäblichen Holzproben weisen die einzelnen Proben chargenübliche, zu erwartende Eigenschaften auf. Betrachtet man die vorhandenen lokalen Biege-Elastizitätsmoduln E_0 der Gesamtcharge gemäß Abb. 5.5 (links), bzw. ebenfalls laut *Anhang C*, stellen sich diese als normalverteilte Größen mit einem Mittelwert des lokalen Biege-Elastizitätsmoduls $E_{0,mean}$ von 11.32 GPa bei einer Standardabweichung σ von 1.73 GPa und einem Variationskoeffizienten CV von 0.15 dar. Gemäß einer Festigkeitsklassifikation nach *ÖNORMEN 338* [54] entspricht dies einer Festigkeitsklasse der Güte C24 ($E_{0,mean} = 11.00$ GPa) und somit der Klassifikation einer konventionellen Holzcharge. Dieser Umstand wird insofern auch in seiner Gültigkeit bestätigt als die ermittelten Holzfeuchten u der einzelnen Proben in einem Bereich zwischen 10% und 18% und somit in einem normativ akzeptablen Spektrum liegen.

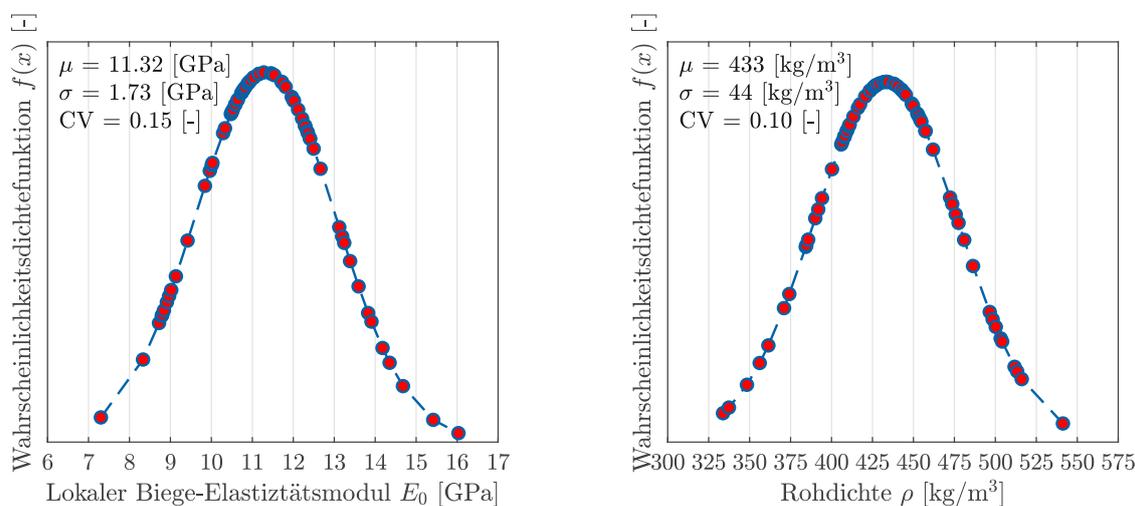


Abb. 5.5: Versuchsergebnisse der Untersuchungen an großmaßstäblichen Holzproben | Histogramm der lokalen Biege-Elastizitätsmoduln E_0 (links), Histogramm der Rohdichten ρ (rechts)

Auch mit weiterführendem Hinblick auf die in den Untersuchungen vorhandenen Rohdichten ρ gemäß Abb. 5.5 (rechts), bzw. ebenfalls laut *Anhang C*, weisen die einzelnen Proben kontextuell äquivalente Eigenschaften auf. In diesem Sinne stellen sich die einzelnen Rohdichten ρ wiederum als normalverteilte Größen dar, und liegt die mittlere Rohdichte ρ_{mean}

hierbei bei einem Wert von 433 kg/m^3 (normativer Vergleichswert $\rho_{mean} = 420 \text{ kg/m}^3$ für C24), bzw. charakterisieren sich die kontextuellen statistischen Parameter durch eine Standardabweichung σ von 44 kg/m^3 und durch einen Variationskoeffizienten CV von 0.10. Des Weiteren lässt sich aus der Charakteristik einer Einzelcharge darüber hinaus eine charakteristische Rohdichte ρ_k von 358 kg/m^3 ableiten, was im Kontext eines normativen Vergleichswerts ($\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ für C24) wiederum einer Klassifikation der Güte C24 entspricht. Als wesentliches Merkmal der Untersuchungen an großmaßstäblichen Holzproben lässt sich demnach abschließend die Zuordnung der vollständigen Holzcharge zu einer Festigkeitsklasse der Güte C24 festhalten.

5.3 Experimentelle Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern

Wie die gegebene Nomenklatur bereits zum Ausdruck bringt, umfassen die experimentellen Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern alle Forschungsinhalte mit Bezug auf die strukturell maßgebende kleinmaßstäbliche Skalenebene. In diesem Sinne werden hierbei kleinmaßstäbliche doppelsymmetrische Push Out Bruchversuche (KuPu-BI, KuPu-Ke und KuPu-BI-Ke) an den drei maßgebenden divergenten Typologien von Schubverbindern Blech, Kerbe und Blech-Kerbe durchgeführt und weiterführend hinsichtlich ihrer vorhandenen mechanischen Eigenschaften und Entitäten in Form von Verschiebungsmodul K_{ser} , Schubtragfähigkeit F_{vR} und Duktilitätsmaß D_s bewertet und vergleichend analysiert. Ziel des gegebenen Forschungsgegenstands soll es demnach sein, einerseits die alleinstehenden, sowie auch die kombinierten Eigenschaften der einzelnen Schubverbindersysteme zu identifizieren, sowie andererseits auch die dabei vorhandenen Interaktionsmechanismen zwischen ebendiesen zu evaluieren und das resultierende systemindividuelle Trag- und Verformungsverhalten, sowie auftretende Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen abschließend zu charakterisieren.

5.3.1 Versuchskonzeption und normative Grundlagen

Die experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern umfassen wie bereits eingangs erwähnt insgesamt 36 Probekörper, wobei diese genannte Gesamtanzahl hierbei aus den drei maßgebenden Versuchsreihen KuPu-BI, KuPu-Ke und KuPu-BI-Ke zu je 12 Proben resultiert.

Die allgemeine Versuchskonzeption zur Detektion der beschriebenen mechanischen Entitäten erfolgt im weiteren Zusammenhang auf Basis eines Lastregimes in Anlehnung an *ÖNORMEN 26891* [17], sowie werden die gegebenen Versuche in detaillierter Form gemäß *ÖNORMEN 14358* [44] und *ÖNORMEN 12512* [23] ausgewertet, wie auch aus *Anhang C* entnommen werden kann. Im darüber hinaus weiters vorhandenen Kontext einer gegebenen geometrischen Ausgestaltung der Versuche charakterisieren sich die einzelnen Versuchsreihen durch doppelsymmetrische Holz-Beton-Verbindungen bzw. durch entsprechende Holz-Blech-Beton-Verbindungen mit zweireihigem diagonalem Vernagelungsschema in den Scherflächen, wie auch aus der allgemeinen Übersicht zum Versuchsaufbau gemäß den nachfolgenden Abbildungen Abb. 5.6, Abb. 5.7 und Abb. 5.8 entnommen werden kann.

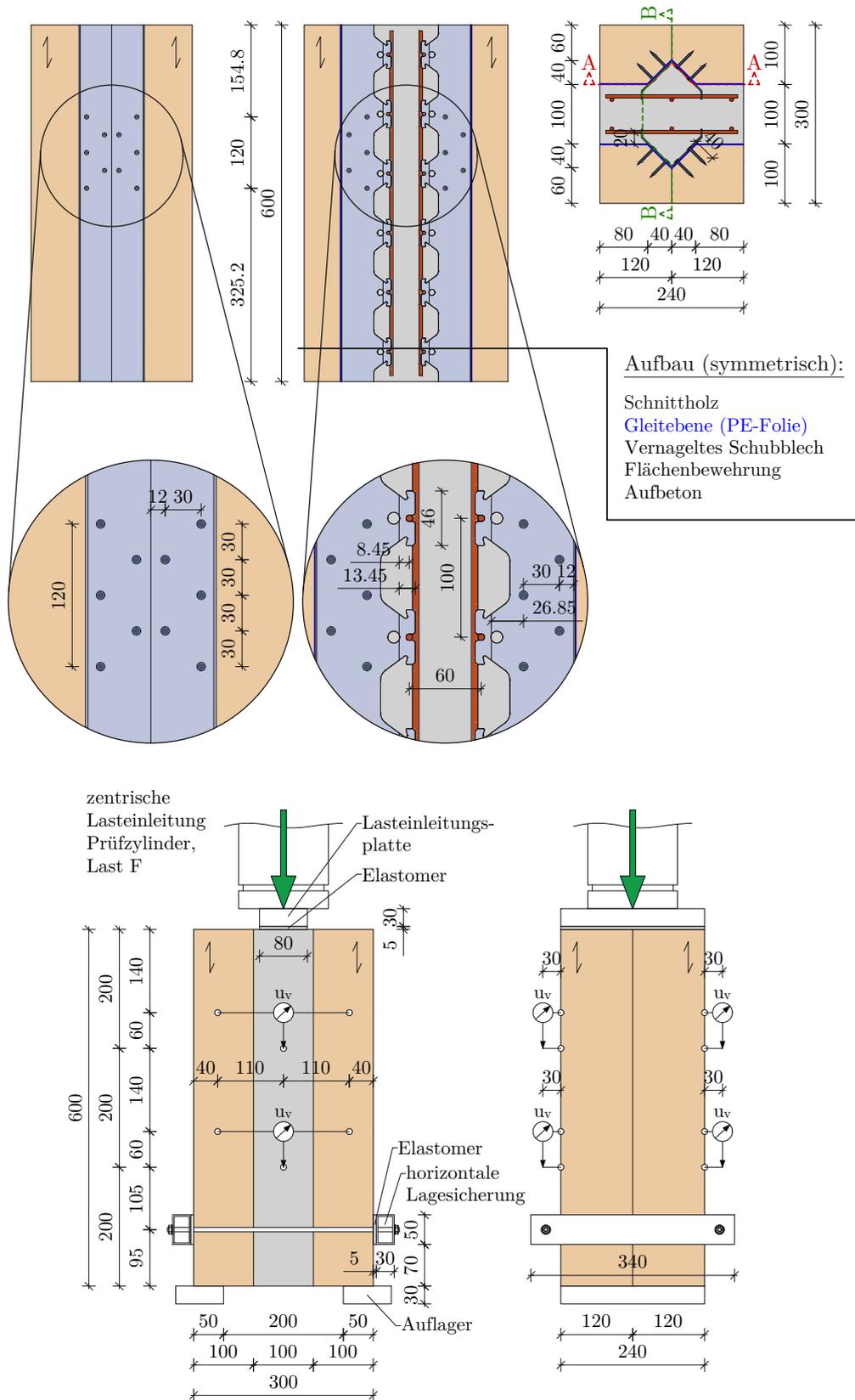


Abb. 5.6: Übersicht zum Versuchsaufbau der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe KuPu-BI | Schnitte A-A, B-B und Querschnitt (oben), Ansichten (unten)

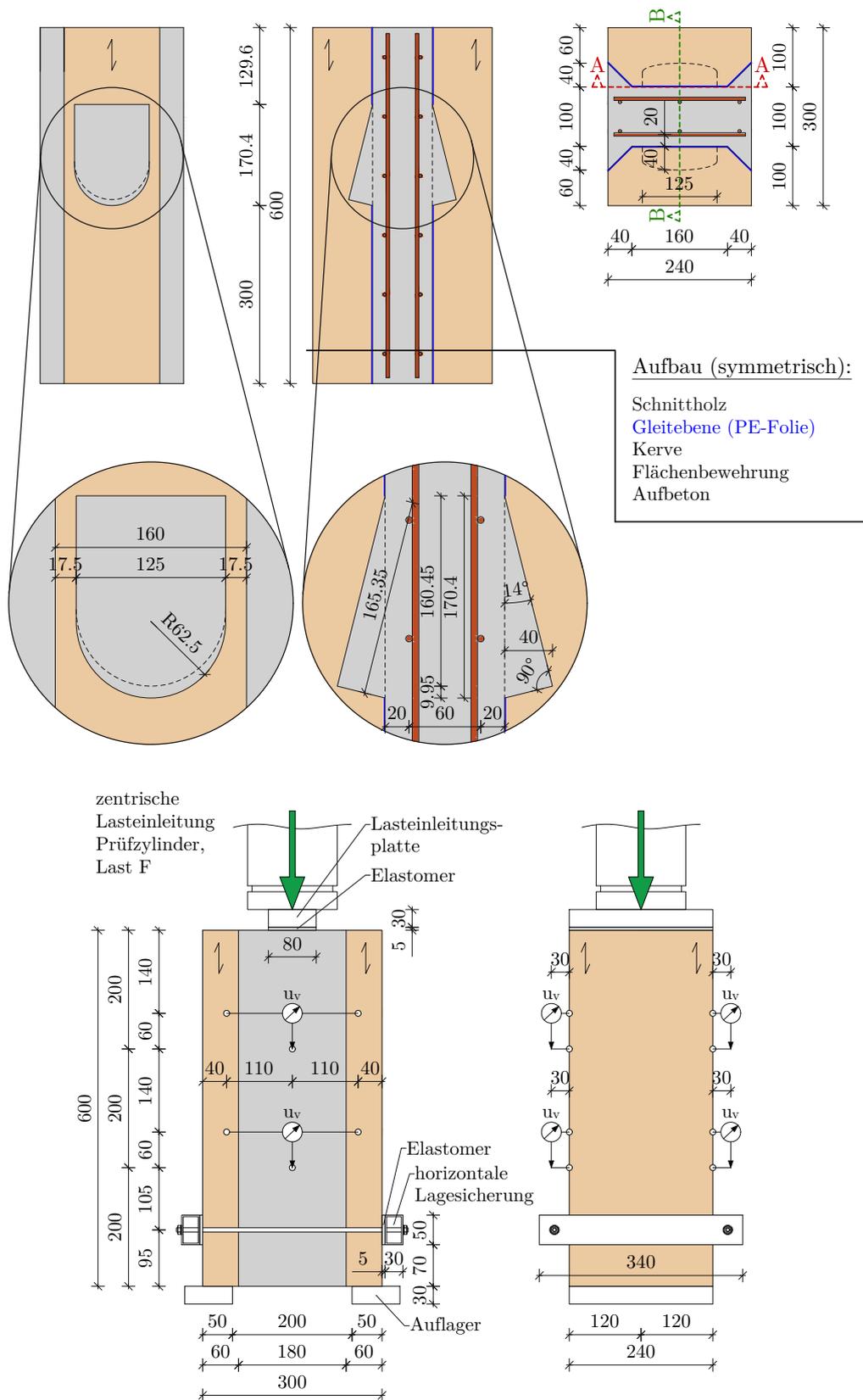


Abb. 5.7: Übersicht zum Versuchsaufbau der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe KuPu-Ke | Schnitte A-A, B-B und Querschnitt (oben), Ansichten (unten)

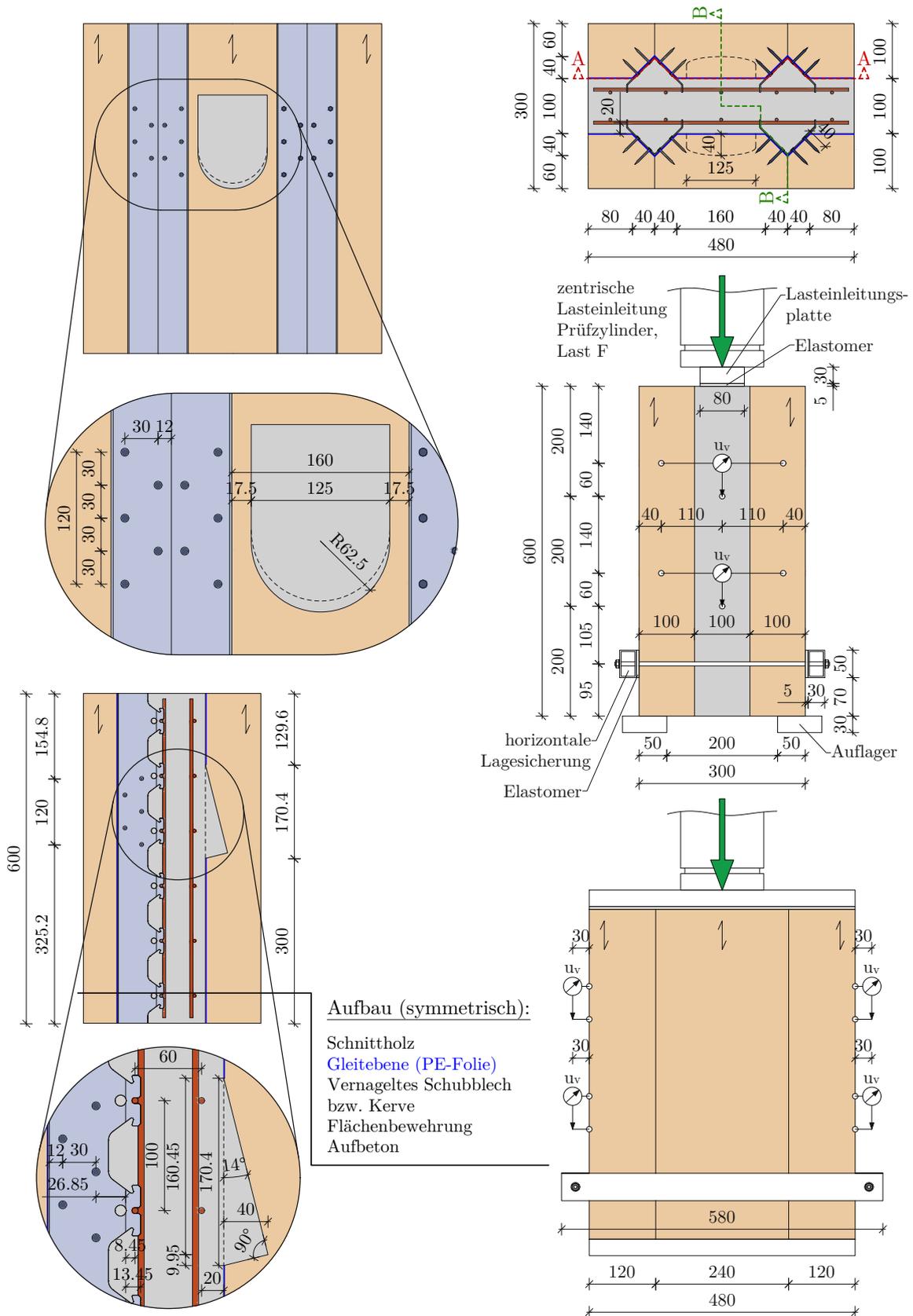


Abb. 5.8: Übersicht zum Versuchsaufbau der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe KuPu-BI-Ke | Schnitte A-A, B-B (links), Querschnitt (oben rechts), Ansichten (mittig und unten rechts)

5.3.2 Darstellung der Versuchsergebnisse

Repräsentative Darstellungen der Versuchsergebnisse der Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern können in grafischer Form den nachfolgenden Abbildungen Abb. 5.9, Abb. 5.10 und Abb. 5.11 entnommen werden.

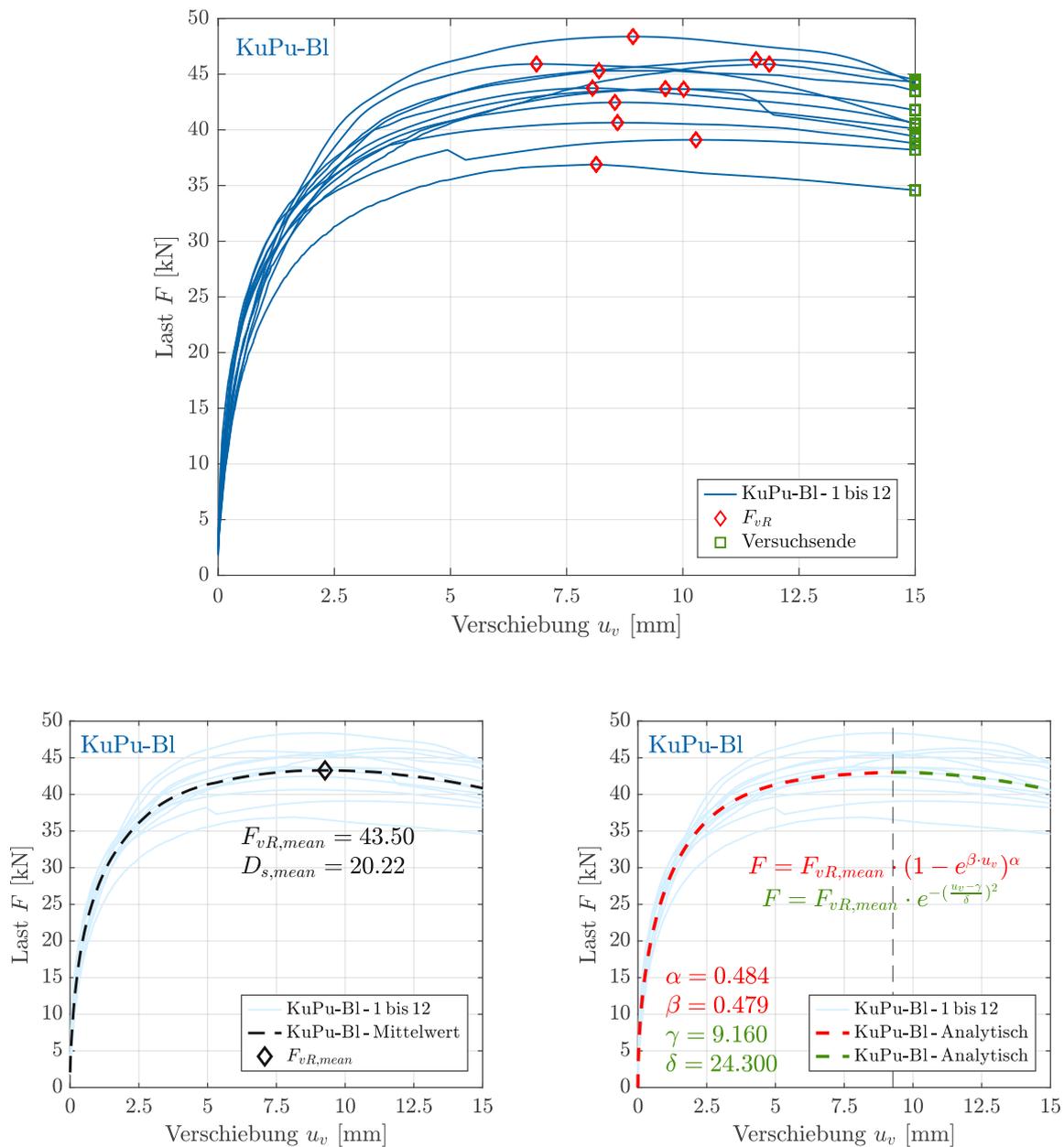


Abb. 5.9: Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe KuPu-BI | Darstellung der Einzelkurven (oben), Darstellung der Mittelwertkurve (unten links), Darstellung der analytischen Kurve (unten rechts)

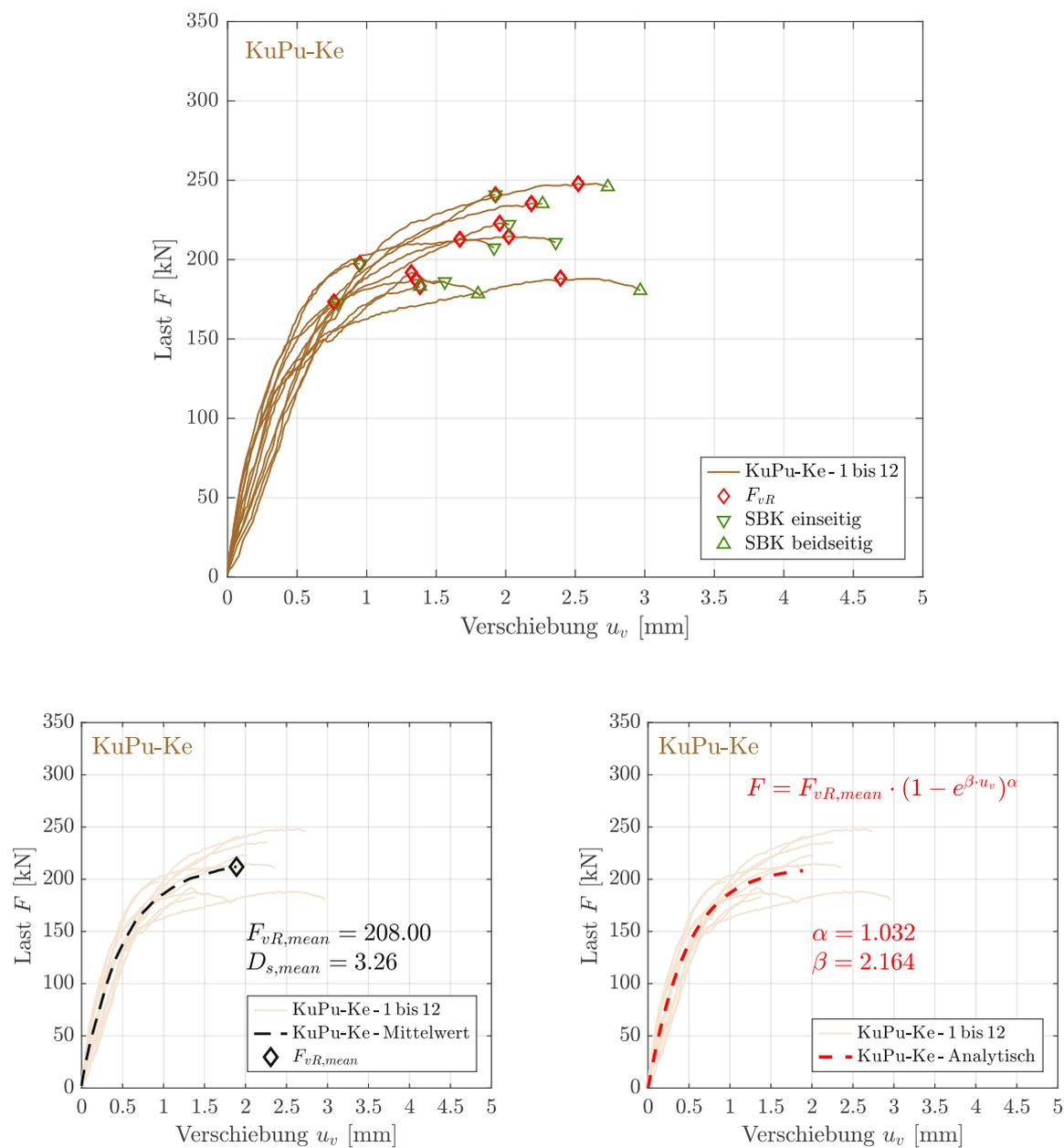


Abb. 5.10: Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe KuPu-Ke | Darstellung der Einzelkurven (oben), Darstellung der Mittelwertkurve (unten links), Darstellung der analytischen Kurve (unten rechts)

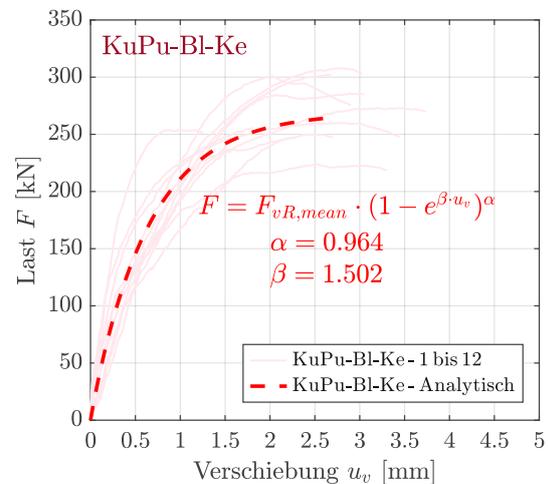
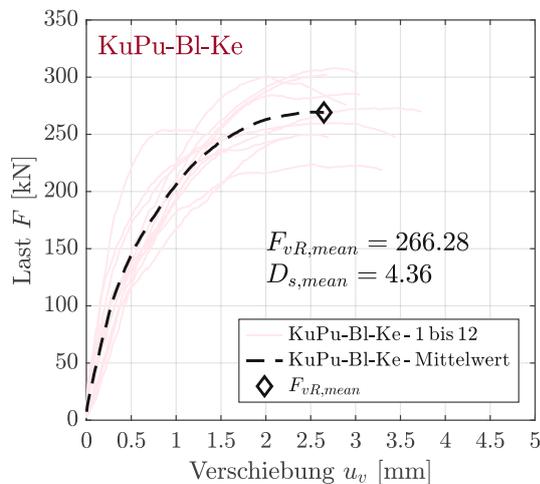
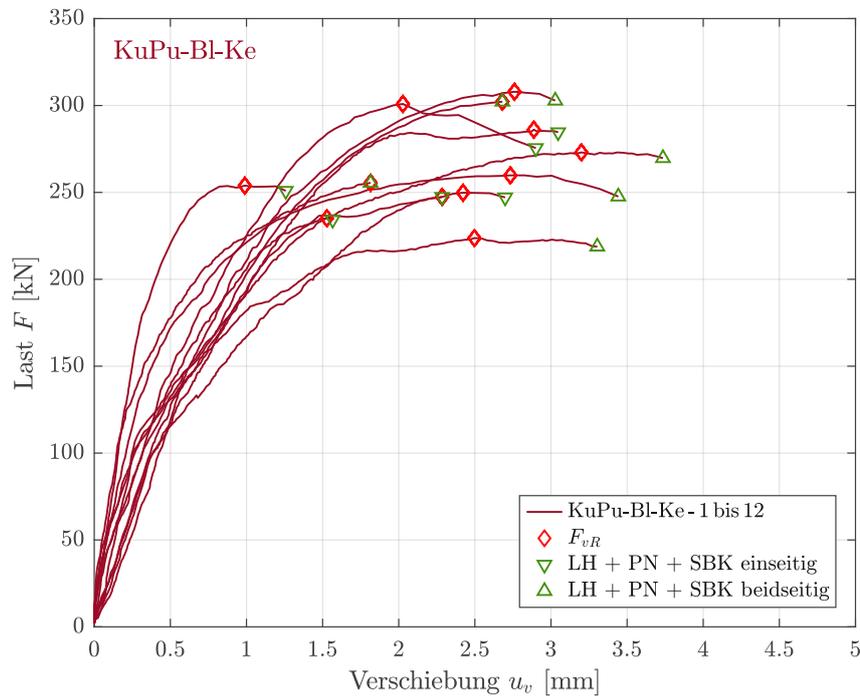


Abb. 5.11: Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe KuPu-BI-Ke | Darstellung der Einzelkurven (oben), Darstellung der Mittelwertkurve (unten links), Darstellung der analytischen Kurve (unten rechts)

Wie aus den gegebenen Abbildungen Abb. 5.9, Abb. 5.10 und Abb. 5.11 ersichtlich wird, gliedert sich die Darstellung der Versuchsergebnisse hierbei in jeweils drei maßgebende Bereiche. So beinhalten die Abbildungen einerseits die jeweiligen Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der vorliegenden Einzelkurven der Proben, sowie andererseits auch die daraus resultierenden Last-Verschiebungs-Zusammenhänge für die Mittelwertkurve und

die hieraus abgeleitete analytische Näherungskurve auf Basis von Exponentialfunktionen. Basierend auf diesen Zusammenhängen kann demnach eine vollständige Interpretation bzw. Charakterisierung des maßgebenden Trag- und Verformungsverhaltens der kleinmaßstäblichen Verbundprobekörper erfolgen, wie nachfolgend aus *Kapitel 5.3.3* ersichtlich wird.

5.3.3 Interpretation der Versuchsergebnisse

Wie bereits einleitend in *Kapitel 2* beschrieben, charakterisiert sich der strukturelle Aufbau des untersuchten Verbunddeckensystems durch den Einsatz einer Kombination von zwei typologisch divergenten Schubverbindersystemen mit einer einerseits hohen Duktilität bei zeitgleich geringer Verbindungssteifigkeit (linienförmige ballistisch vernagelte Puzzle Strip Schubleche), sowie mit einer andererseits geringen Duktilität bei zeitgleich hoher Verbindungssteifigkeit (punktuelle ausgerundete Kerven ohne zusätzliche Verbindungsmittel zur Abhebesicherung). Diese gemäß *Kapitel 2* postulierte, und gemäß *Kapitel 3* bekräftigte These kann grundsätzlich auch anhand der vorliegenden Versuchsergebnisse qualitativ und quantitativ bestätigt werden, wie auch aus der zusammenfassenden Darstellung der Versuchsergebnisse gemäß Abb. 5.12 ersichtlich wird.

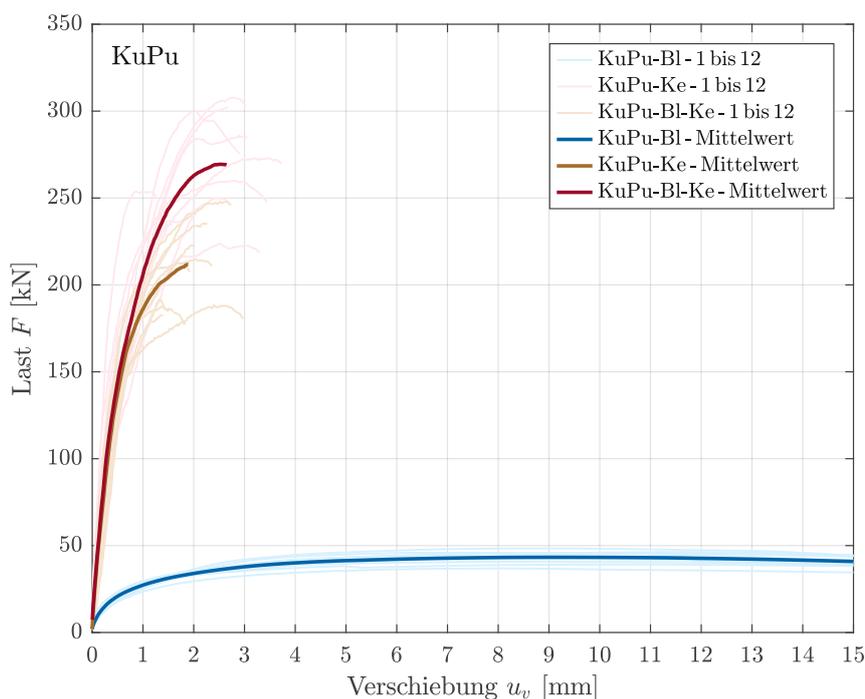


Abb. 5.12: Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Zusammenfassung der Versuchsreihen KuPu-BI, KuPu-Ke und KuPu-BI-Ke

So charakterisiert sich das allgemeine Trag- und Verformungsverhalten der Versuchstypologie Blech (Versuchsreihe KuPu-BI, Abb. 5.9 bzw. Abb. 5.12) erwartungsgemäß durch

ein entsprechend hochduktilen Verhalten bei einer gleichzeitig allerdings nur geringen Tragfähigkeit und Steifigkeit der Verbindung. Vergleichend dazu zeigen sich die Versuchstypologien Kerne und Blech-Kerne (Versuchsreihen KuPu-Ke und KuPu-BI-Ke, Abb. 5.10 und Abb. 5.11 bzw. Abb. 5.12) durch ein entsprechend konträres Verhalten bestimmt, als diese beträchtlich verringerte Duktilitäten, gleichzeitig aber wesentlich gesteigerte Tragfähigkeiten und Steifigkeiten der Verbindungen aufweisen können.

Mit Bezug auf die hierbei vorhandenen Duktilitäten der Versuchstypologien zeigt sich die Versuchsreihe KuPu-BI gemäß Abb. 5.9 (unten links) demnach durch einen äußerst hohen Mittelwert des Duktilitätsmaßes $D_{s,mean}$ von 20.22 bestimmt, während die Versuchsreihen KuPu-Ke und KuPu-BI-Ke gemäß Abb. 5.10 und Abb. 5.11 (jeweils unten links) vergleichsweise nur wesentlich verringerte Werte (Mittelwerte der Duktilitätsmaße $D_{s,mean} = 3.26$ bzw. 4.36) aufweisen.

Durch den Einsatz einer blechernen Komponente stellt sich im Allgemeinen demzufolge ein erhöhtes Plastifizierungspotential innerhalb der Versuchsreihen ein, wie weiterführend auch deutlich aus einer vergleichenden Betrachtung der Versuchstypologien Kerne und Blech-Kerne hervorgeht. So führt der additive Einsatz der blechernen Komponente (Versuchsreihe KuPu-BI-Ke) demnach zu einem um 34 % gesteigerten mittleren Duktilitätsmaß $D_{s,mean}$ im Vergleich zur rein kernenbasierten Versuchstypologie (Versuchsreihe KuPu-Ke), und somit, bei in den beiden Versuchsreihen ähnlicher vorhandener Fließverschiebung u_y , zu einer expliziten Erhöhung der maximal erreichbaren Grenzverschiebung u_u . Mit Hinblick auf die vorhandenen mittleren Duktilitätsmaße $D_{s,mean}$ kann demnach schlussfolgernd ein entsprechend vorhandener Interaktionsmechanismus zwischen den beiden typologisch divergenten Schubverbindersystemen Blech und Kerne erkannt werden, welcher sich speziell auf Basis eines Vergleichs der Versuchsreihen KuPu-Ke und KuPu-BI-Ke ableiten lässt.

Mit darüber hinaus vorliegendem Bezug auf die weiteren kontextuell maßgebenden Größen der Verbindungen im Kontext von Tragfähigkeit und Steifigkeit können die mittleren Verschiebungsmoduln $K_{ser,mean}$, sowie die Mittelwerte der Schubtragfähigkeit $F_{vR,mean}$ und die damit in Verbindung stehenden charakteristischen Schubtragfähigkeiten $F_{vR,k}$ gemäß Abb. 5.13 betrachtet werden. So definiert sich in diesem Zusammenhang die Versuchsreihe KuPu-BI durch einen mittleren Verschiebungsmodul $K_{ser,mean}$ von 47.32 kN/mm, durch einen Mittelwert der Schubtragfähigkeit $F_{vR,mean}$ von 43.50 kN, sowie durch eine charakteristische Schubtragfähigkeit $F_{vR,k}$ von 37.06 kN. Betrachtet man dazu vergleichend die Versuchsreihen KuPu-Ke und KuPu-BI-Ke werden auch in diesem Zusammenhang wiederum die eingangs beschriebenen, erwartbaren konträren Eigenschaften dieser Versuchstypologien erkennbar.

So charakterisiert sich die Versuchsreihe KuPu-Ke demgegenüber durch einen mittleren Verschiebungsmodul $K_{ser,mean}$ von 336.58 kN/mm, durch einen Mittelwert der Schubtragfähigkeit $F_{vR,mean}$ von 208.00 kN und durch eine charakteristische Schubtragfähigkeit $F_{vR,k}$ von 162.71 kN. Die genannte Versuchsreihe KuPu-Ke definiert sich im Vergleich zur Versuchsreihe KuPu-BI demnach durch einen sowohl wesentlich gesteigerten mittleren Verschiebungsmodul $K_{ser,mean}$ (+611 %), als auch durch einen ebenso signifikant erhöhten Mittelwert der Schubtragfähigkeit $F_{vR,mean}$ (+378 %) bzw. durch eine gleichermaßen gesteigerte charakteristische Schubtragfähigkeit $F_{vR,k}$ (+339 %). Ein qualitativ äquivalentes Abbild zeigt sich in diesem Zusammenhang grundsätzlich ebenso mit Bezug auf die Versuchsreihe KuPu-BI-Ke. Vergleicht man in diesem Zusammenhang weiterführend wiederum

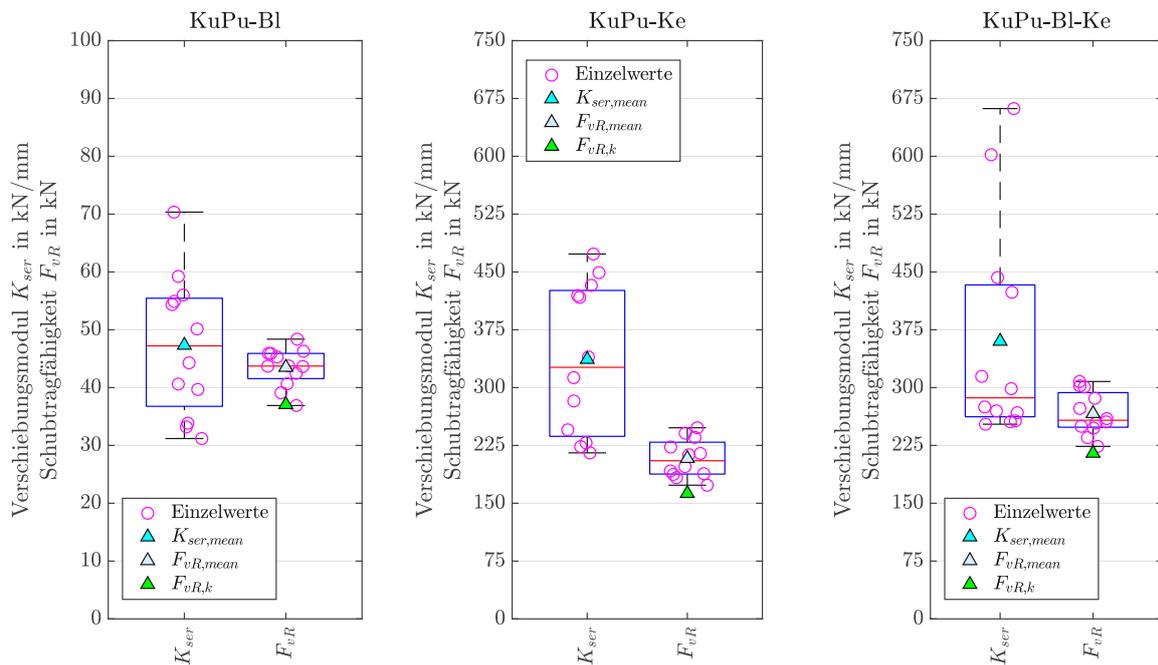


Abb. 5.13: Verschiebungsmodul K_{ser} und Schubtragfähigkeiten F_{vR} der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe KuPu-BI (links), Versuchsreihe KuPu-Ke (mittig), Versuchsreihe KuPu-BI-Ke (rechts)

die Versuchsreihen KuPu-Ke und KuPu-BI-Ke, wird durch den additiven Einsatz einer blechernen Komponente (Versuchsreihe KuPu-BI-Ke) abermalig ein gewisser Interaktionsmechanismus zwischen den beiden Versuchstypologien erkennbar. In diesem Kontext charakterisiert sich die Versuchsreihe KuPu-BI-Ke durch einen mittleren Verschiebungsmodul $K_{ser,mean}$ von 360.04 kN/mm, durch einen Mittelwert der Schubtragfähigkeit $F_{vR,mean}$ von 266.28 kN, sowie durch eine charakteristische Schubtragfähigkeit $F_{vR,k}$ von 214.85 kN. Demnach führt der additive Einsatz einer blechernen Komponente (Versuchsreihe KuPu-BI-Ke) hierbei wiederum zu maßgeblich gesteigerten mechanischen Eigenschaften im Vergleich zur rein kernenbasierten Versuchstypologie (Versuchsreihe KuPu-Ke). Während in diesem Zusammenhang der mittlere Verschiebungsmodul $K_{ser,mean}$ in einem nur geringen Bereich um 7% erhöht werden kann, zeigen sich der Mittelwert der Schubtragfähigkeit $F_{vR,mean}$ sowie auch die charakteristische Schubtragfähigkeit $F_{vR,k}$ deutlich um 28% bzw. um 32% gesteigert. Mit Bezug auf den Interaktionsmechanismus zwischen den typologisch divergenten Schubverbindersystemen kann durch den additiven Einsatz einer blechernen Komponente demnach nicht nur eine erhöhte Duktilität sondern eine ebenso signifikante Erhöhung der vorhandenen Bruchlast F_u festgehalten werden.

Im darüber hinaus weiterführenden Kontext auftretender Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen innerhalb der Versuchsreihen zeichnen sich ebendiese gleichfalls durch ein erwartbares, vollständig homogenes Verhalten aus. So können in diesem Zusammenhang wiederum charakteristische Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen für die unterschied-

lichen blech- bzw. kernenbasierten Versuchstypologien festgestellt werden, wie auch aus zugehöriger Abb. 5.14 ersichtlich wird.



Abb. 5.14: Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe KuPu-BI (oben), Versuchsreihe KuPu-Ke (mittig), Versuchsreihe KuPu-BI-Ke (unten)

Mit Bezug auf die rein blechbasierte Versuchsreihe KuPu-BI liegt in diesem Zusammenhang, wie auch aus Abb. 5.14 (oben) ersichtlich, kein expliziter Versagensmechanismus der Verbindung bei einem Erreichen der Bruchlast F_u , sondern lediglich ein im fortschreitenden Versuchslauf vorhandener Schädigungsmechanismus in Form einer Lochleibung der Strukturhölzer (Schädigungsmechanismus LH), sowie einer Plastifizierung der dar-

in vernagelten ballistischen Glattschaftsnägeln (Schädigungsmechanismus PN) vor. Diese gegebenen Schädigungsmechanismen bilden sich hierbei konstant während des gesamten Versuchsverlaufs aus und können weiterführend als vollständig symmetrisch an jeweils beiden Scherflächen auftretend beschrieben werden. Die genannte kombinierte auftretende Form von Schädigungsmechanismen definiert sich schlussfolgernd demnach als maßgebend für die vorhandene hochduktilen Charakteristik der rein blechernen Versuchstypologie.

Im Vergleich zu diesen konstant auftretenden Schädigungsmechanismen charakterisiert sich die rein kervenbasierte Versuchsreihe KuPu-Ke demgegenüber durch einen plötzlich auftretenden, alleinigen Versagensmechanismus in Form eines Schubversagens des Betons im Ansatz der Kervenflanke (Versagensmechanismus SBK), wie auch aus Abb. 5.14 (mittig) entnommen werden kann. Dieser gegebene Versagensmechanismus tritt hierbei ausschließlich bei einem Erreichen der Bruchlast F_u bzw. bei einem Erreichen der Schubtragfähigkeit F_{vR} (für den vorliegenden Fall $F_u = F_{vR}$) auf und kann darüber hinaus als teilweise symmetrisch an beiden Scherflächen, sowie teilweise antimetrisch an nur einer Scherfläche auftretend beschrieben werden. Im konträren Vergleich zu den vorhandenen Schädigungsmechanismen der rein blechbasierten Versuchstypologie KuPu-Bl definiert sich die genannte gegebene Form von Versagensmechanismus schlussfolgernd demnach als maßgebend für die vorhandene spröde Charakteristik der rein kervenbasierten Versuchstypologie.

Wie demnach vorgegeben, können für die beiden rein blech- bzw. rein kervenbasierten Versuchstypologien jeweils divergente charakteristische Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen festgestellt werden. Entsprechend diesen Charakteristiken zeigt sich für die kombinierte, blech- und kervenbasierte Versuchsreihe KuPu-Bl-Ke weiterführend demgemäß auch eine Kombination aus diesen vorgestellten Schädigungsmechanismen bzw. aus diesem aufgezeigten Versagensmechanismus, wie auch aus Abb. 5.14 (unten) ersichtlich wird. So stellt sich bei dieser Versuchsreihe ein mit fortschreitendem Versuchsverlauf zunehmender kombinierter Schädigungsmechanismus (Schädigungsmechanismen LH+PN, charakteristisch für die blecherne Komponente) ein, und ist dieser gefolgt von einem bei Bruchlast F_u bzw. Schubtragfähigkeit F_{vR} (für den vorliegenden Fall wiederum $F_u = F_{vR}$) auftretenden Versagensmechanismus (SBK, charakteristisch für die kervenbasierte Komponente), welcher äquivalent zur Versuchsreihe KuPu-Ke teilweise symmetrisch an beiden Scherflächen, sowie teilweise antimetrisch an nur einer Scherfläche in Erscheinung tritt. Diese auftretende Form von kombinierten Schädigungs- und Versagensmechanismen definiert sich demnach abschließend auch als maßgebend für die vorhandene Charakteristik der kombinierten blech- und kervenbasierten Versuchstypologie.

5.4 Experimentelle Untersuchungen an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern

Wie die gegebene Nomenklatur bereits zum Ausdruck bringt, umfassen die experimentellen Untersuchungen an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern alle Forschungsinhalte mit Bezug auf die strukturell maßgebende großmaßstäbliche Skalenebene. In diesem Sinne werden hierbei großmaßstäbliche symmetrische Bruchversuche an Biegeträgern (KuTr-Bl, KuTr-Ke und KuTr-Bl-Ke) der drei maßgebenden divergenten Typologien von Schubverbindern Blech, Kerne und Blech-Kerne durchgeführt und weiterführend hinsichtlich ihres

vorhandenen Trag- und Verformungsverhaltens bewertet und vergleichend analysiert. Ziel des gegebenen Forschungsgegenstands soll es demnach äquivalent zu den kleinmaßstäblichen Untersuchungen an Verbundprobekörpern sein, einerseits die alleinstehenden, sowie auch die kombinierten Eigenschaften der einzelnen Schubverbindersysteme zu identifizieren, sowie andererseits auch die dabei vorhandenen Interaktionsmechanismen zwischen ebendiesen zu evaluieren und das resultierende systemindividuelle Trag- und Verformungsverhalten, sowie auftretende Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen abschließend zu charakterisieren.

5.4.1 Versuchskonzeption und normative Grundlagen

Die experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern umfassen wie bereits eingangs erwähnt insgesamt 9 Probekörper, wobei diese genannte Gesamtanzahl hierbei aus den drei maßgebenden Versuchsreihen KuTr-BI, KuTr-Ke und KuTr-BI-Ke zu je 3 Proben resultiert. Die allgemeine Versuchskonzeption zur Detektion des vorhandenen Trag- und Verformungsverhaltens erfolgt im weiteren Zusammenhang auf Basis eines Lastregimes in Anlehnung an *ÖNORMEN 26891* [17], wie auch aus *Anhang C* entnommen werden kann. Im darüber hinaus weiteren vorhandenen Kontext einer gegebenen geometrischen Ausgestaltung der Versuche charakterisieren sich die einzelnen Versuchsreihen auf Basis von symmetrischen Biegeträgern mit entsprechend applizierten Holz-Beton-Verbindungen bzw. mit demgemäßen Holz-Blech-Beton-Verbindungen mit zweireihigem diagonalem Vernagelungsschema in der Scherfläche, wie auch aus der allgemeinen Übersicht zum Versuchsaufbau gemäß den Abbildungen Abb. 5.15, Abb. 5.16, Abb. 5.17 und Abb. 5.18 entnommen werden kann.

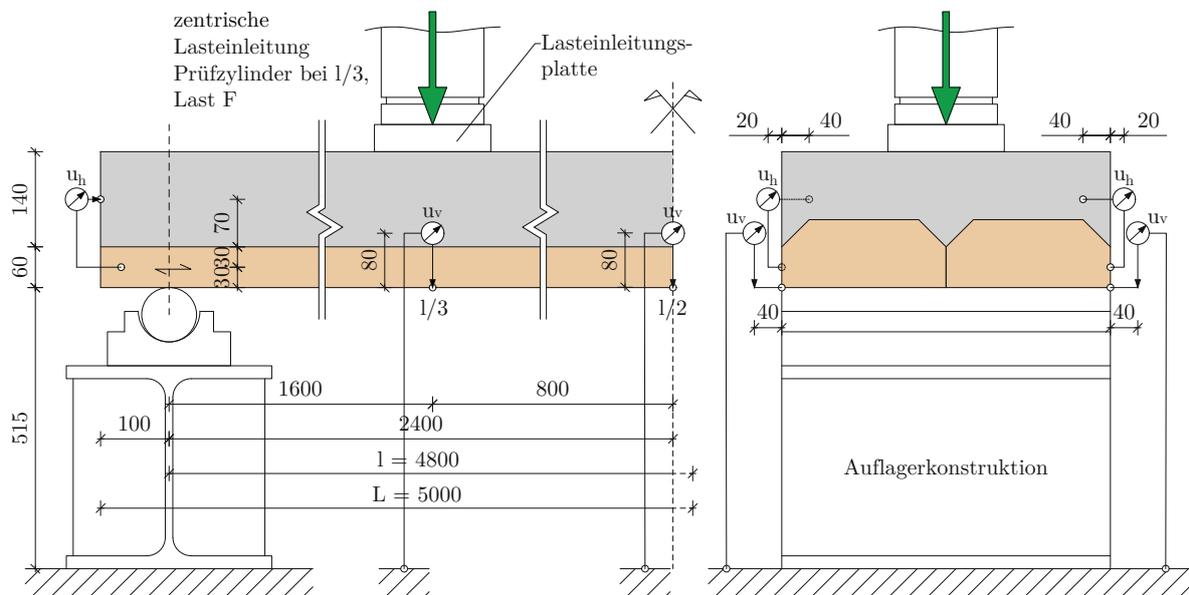


Abb. 5.15: Übersicht zum Versuchsaufbau der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Allgemeiner Versuchsaufbau | Ansichten (links und rechts)

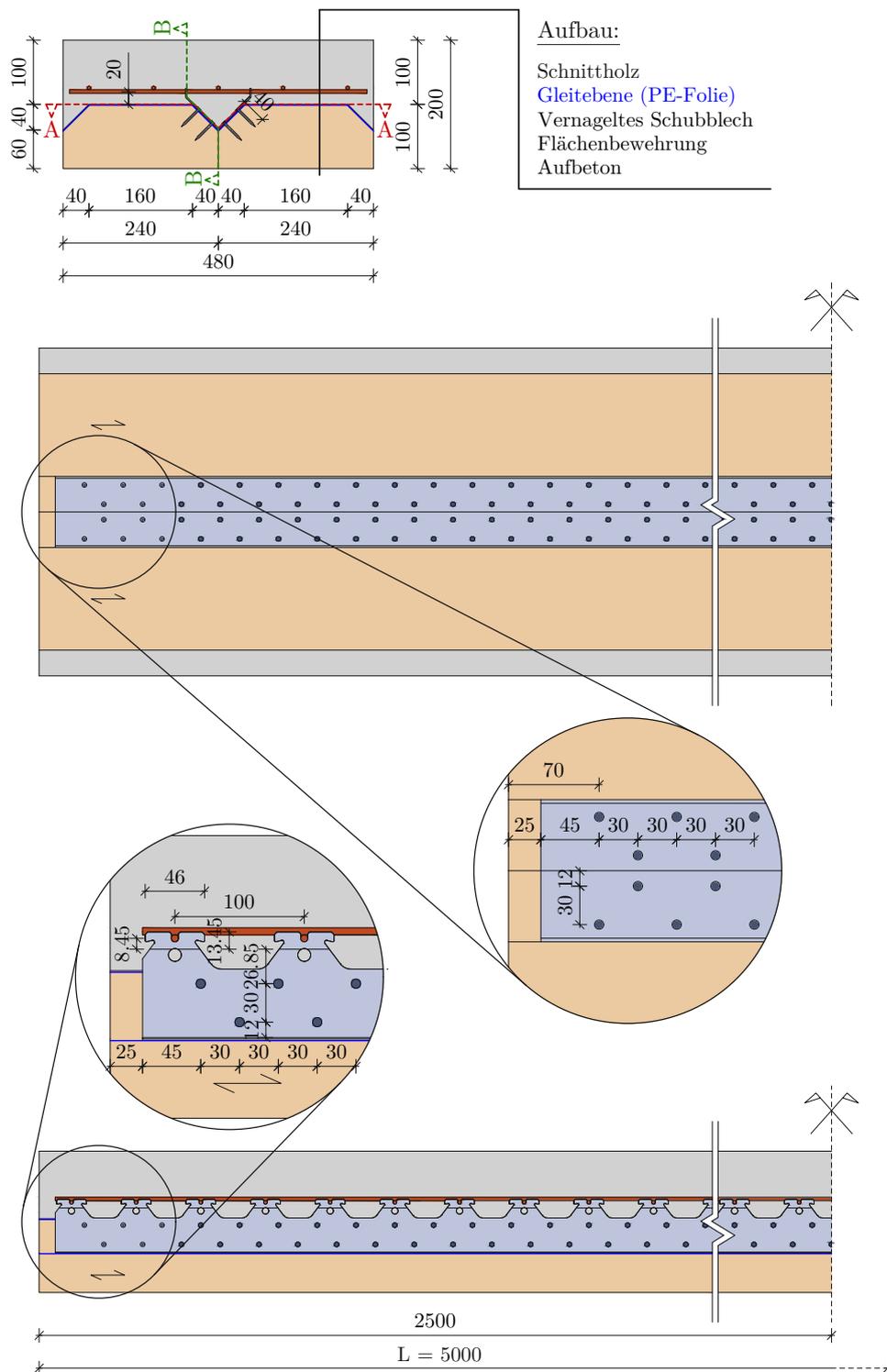


Abb. 5.16: Übersicht zum Versuchsaufbau der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe KuTr-BI | Querschnitt (oben), Schnitt A-A (mittig), Schnitt B-B (unten)

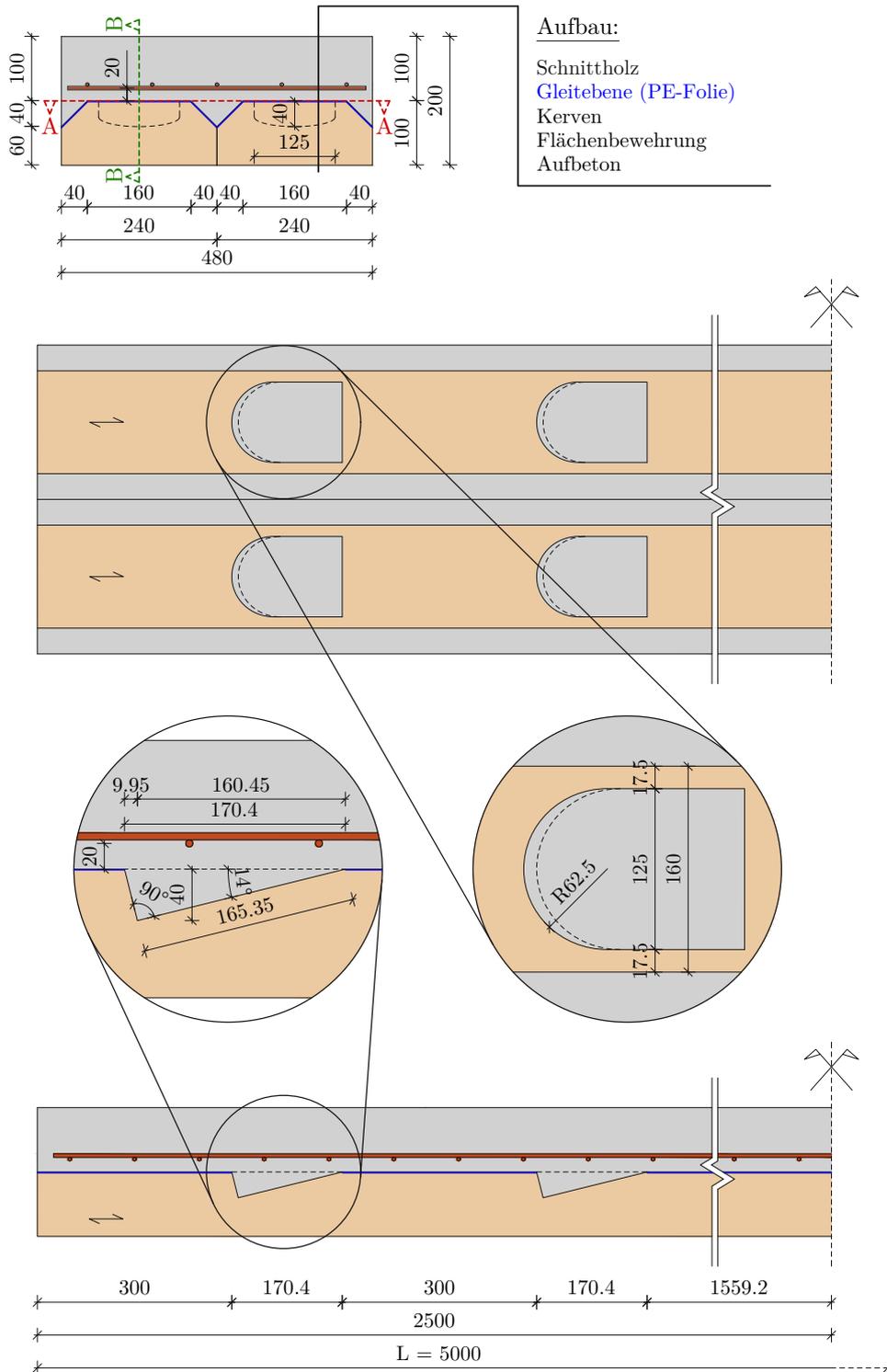
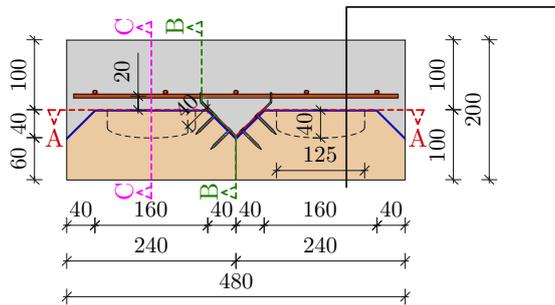
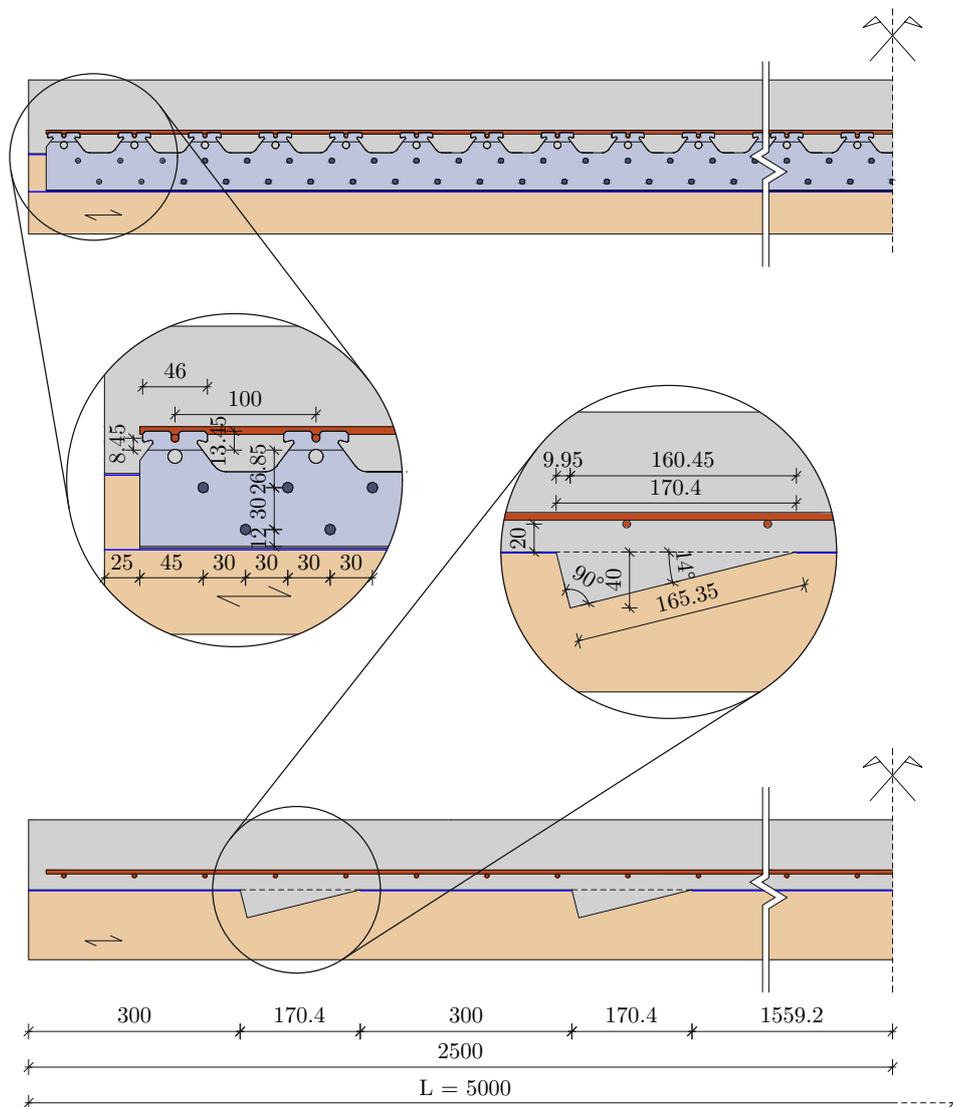


Abb. 5.17: Übersicht zum Versuchsaufbau der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe KuTr-Ke | Querschnitt (oben), Schnitt A-A (mittig), Schnitt B-B (unten)



Aufbau:

- Schrittholz
- Gleit Ebene (PE-Folie)
- Vernageltes Schublech bzw. Kerfen
- Flächenbewehrung
- Aufbeton



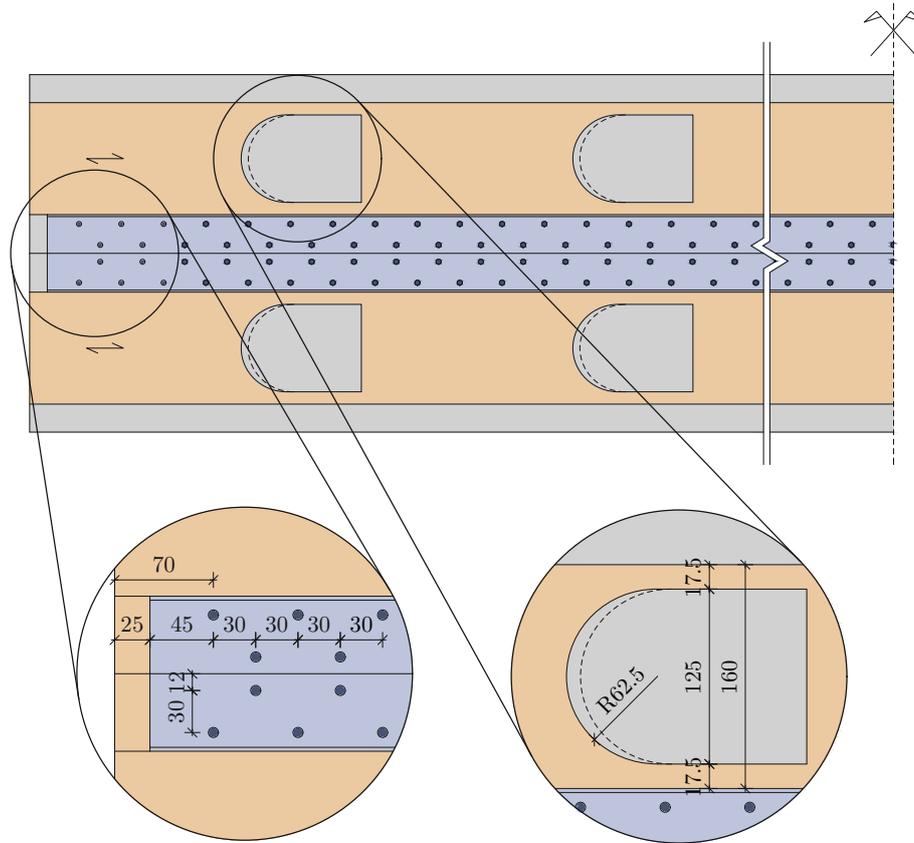


Abb. 5.18: Übersicht zum Versuchsaufbau der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe KuTr-BI-Ke | Querschnitt (ganz oben), Schnitt B-B (mittig oben), Schnitt C-C (mittig unten), Schnitt A-A (ganz unten)

5.4.2 Darstellung der Versuchsergebnisse

Repräsentative Darstellungen der Versuchsergebnisse der Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern können in grafischer Form den nachfolgenden Abbildungen Abb. 5.19, Abb. 5.20 und Abb. 5.21 entnommen werden. Wie aus den gegebenen Abbildungen ersichtlich wird, gliedert sich die Darstellung der Versuchsergebnisse hierbei in jeweils drei maßgebende Bereiche.

So beinhalten die Abbildungen einerseits die Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der absoluten vertikalen Verschiebungen in Feldmitte ($u_{v,l/2mi}$) inklusive auftretender Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen, sowie andererseits ebenso die Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der relativen horizontalen Verschiebungen zwischen den Verbundpartnern Holz und Beton im linken und rechten Auflager- bzw. Randbereich ($u_{h,li}$ und $u_{h,re}$). Basierend auf diesen Zusammenhängen kann demnach eine vollständige Interpretation bzw. Charakterisierung des maßgebenden Trag- und Verformungsverhaltens der großmaßstäblichen Verbundprobekörper erfolgen, wie nachfolgend aus *Kapitel 5.4.3* ersichtlich wird.

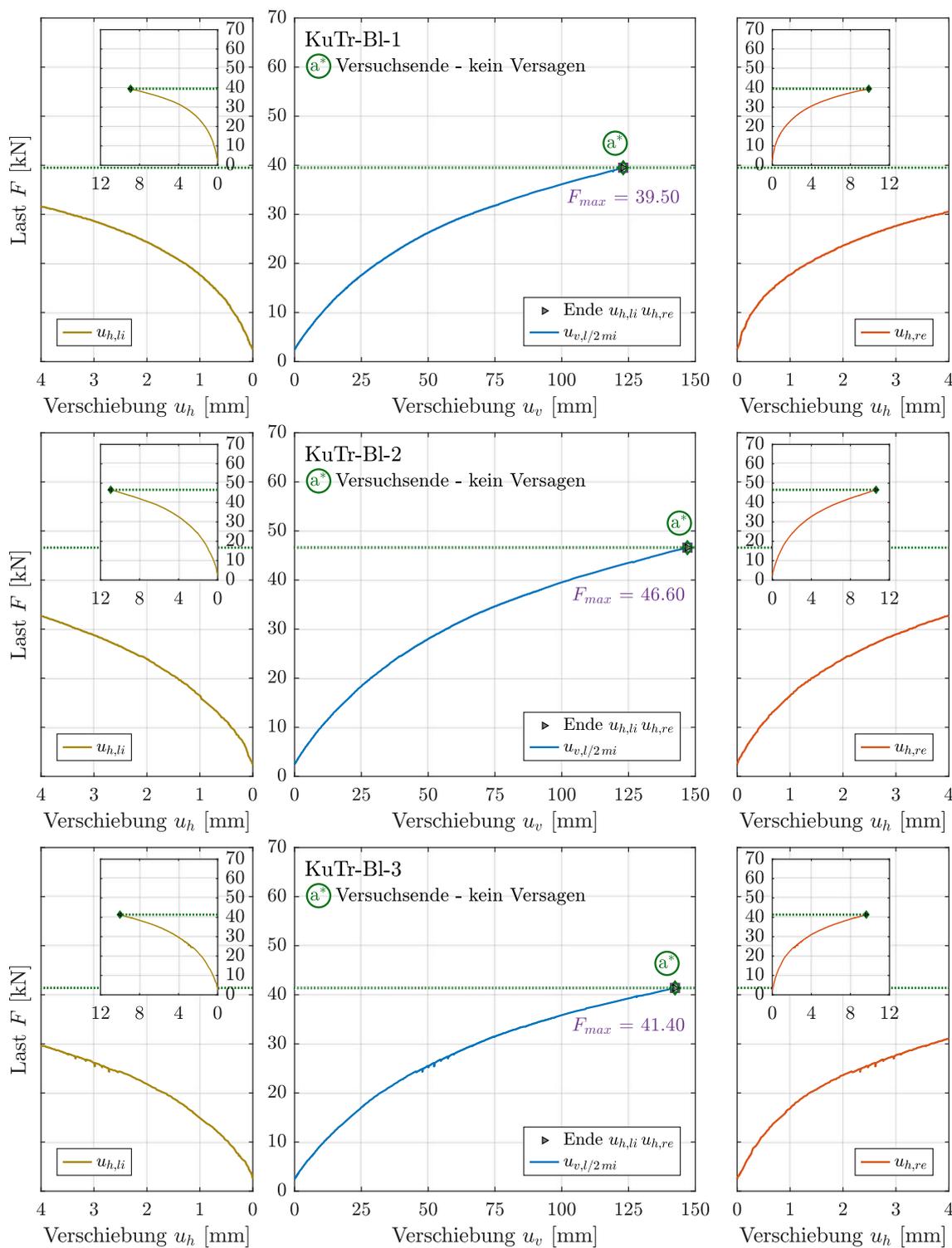


Abb. 5.19: Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe KuTr-BI | Darstellung der hor. Verschiebungen u_h (links und rechts), Darstellung der vert. Verschiebungen u_v inkl. Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen (mittig)

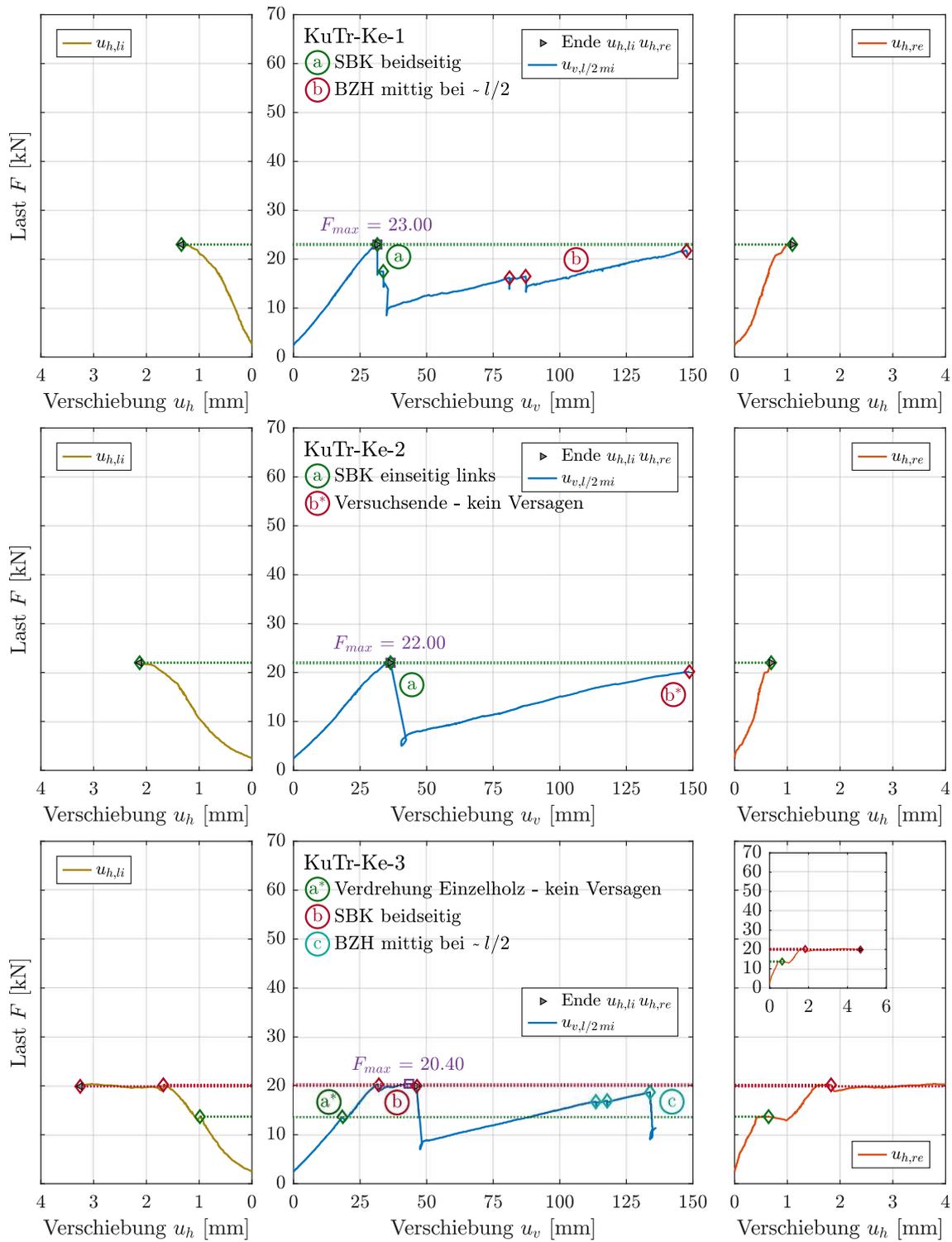


Abb. 5.20: Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe KuTr-Ke | Darstellung der hor. Verschiebungen u_h (links und rechts), Darstellung der vert. Verschiebungen u_v inkl. Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen (mittig)

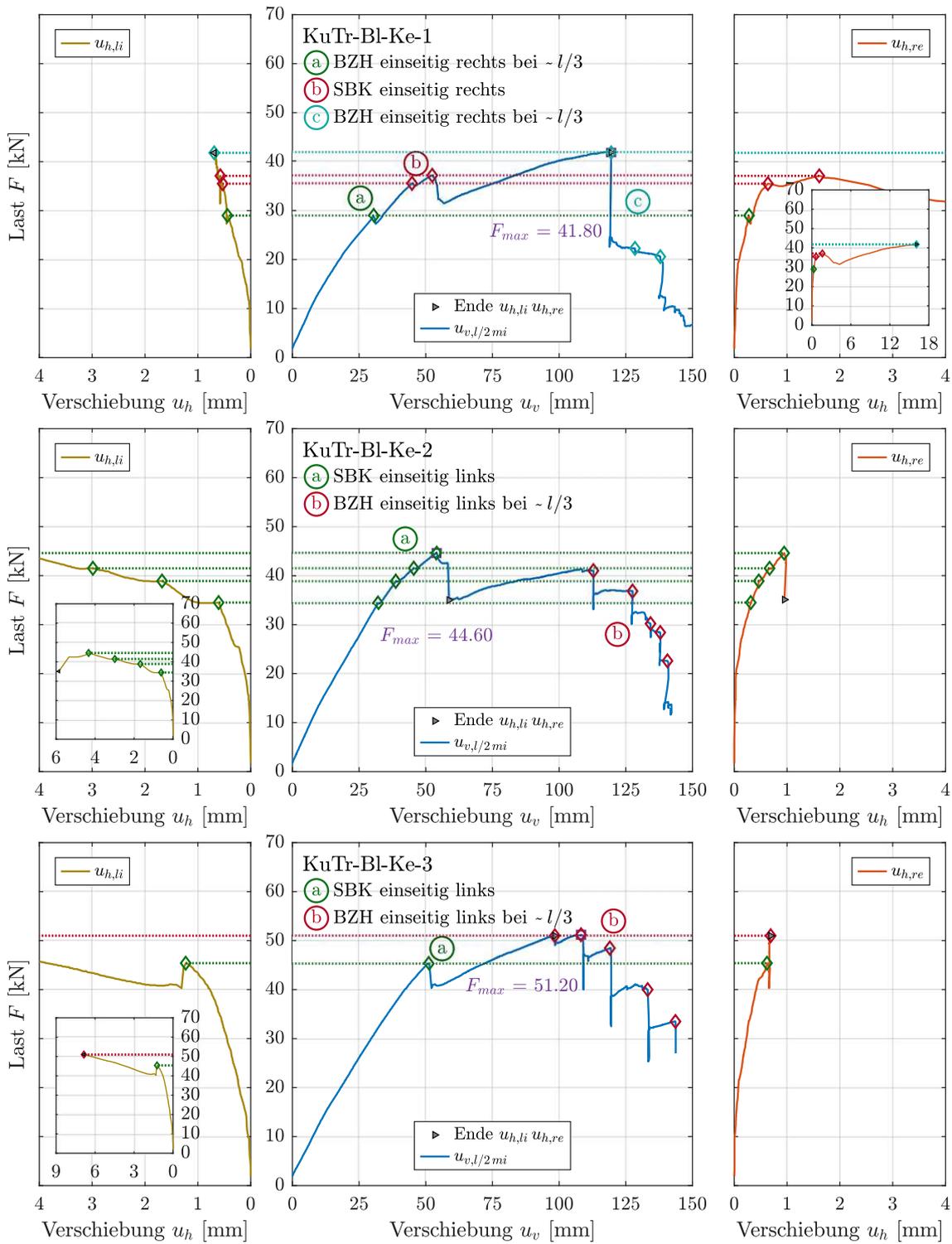


Abb. 5.21: Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe KuTr-BI-Ke | Darstellung der hor. Verschiebungen u_h (links und rechts), Darstellung der vert. Verschiebungen u_v inkl. Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen (mittig)

5.4.3 Interpretation der Versuchsergebnisse

Äquivalent zu den Versuchsergebnissen der kleinmaßstäblichen Verbundprobekörper gemäß den Kapiteln *Kapitel 5.3.2* und *Kapitel 5.3.3*, definiert sich das maßgebende Trag- und Verformungsverhalten der einzelnen großmaßstäblichen Versuchsreihen KuTr-BI, KuTr-Ke und KuTr-BI-Ke durch jeweils divergente Charakteristiken innerhalb der unterschiedlichen Versuchstypologien. So kann in diesem Sinne das in *Kapitel 2* postulierte, und gemäß den Kapiteln *Kapitel 3* und *Kapitel 5* bestätigte grundsätzliche Verhalten der unterschiedlichen Typologien von Schubverbindern in qualitativ äquivalenter Form auch an den großmaßstäblichen Verbundprobekörpern beobachtet werden, wie auch aus der zusammenfassenden Darstellung der Versuchsergebnisse gemäß Abb. 5.22 zu entnehmen ist.

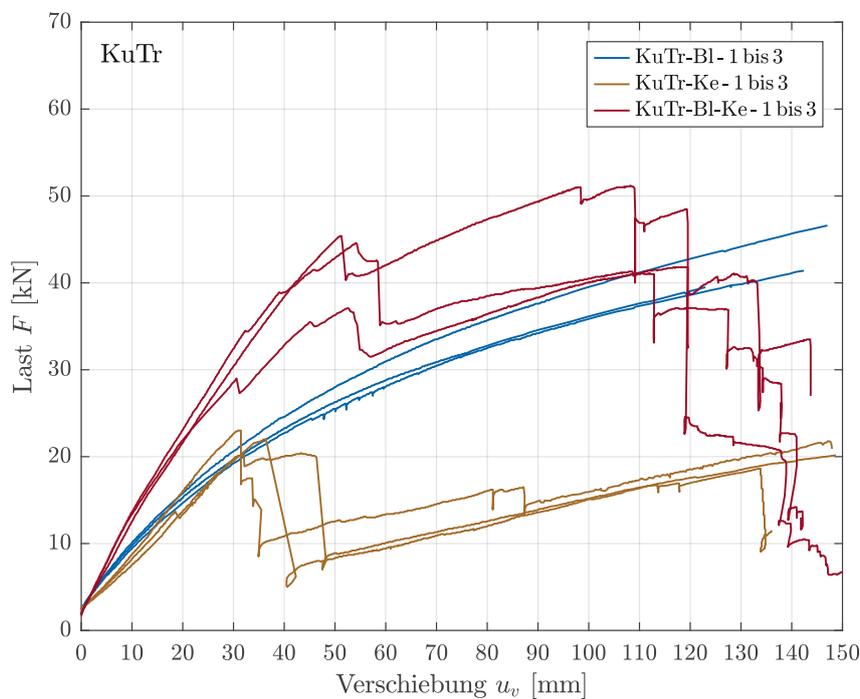


Abb. 5.22: Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Zusammenfassung der Versuchsreihen KuTr-BI, KuTr-Ke und KuTr-BI-Ke

So charakterisiert sich das allgemeine Trag- und Verformungsverhalten der Versuchstypologie Blech (Versuchsreihe KuTr-BI, Abb. 5.19 bzw. Abb. 5.22) durch ein einheitliches, wiederum entsprechend hochduktileres Verhalten bei einer allerdings zeitgleich nur in gemäßigtem Maße vorhandenen Tragfähigkeit und Steifigkeit des Verbundsystems.

Wie hierzu aus Abb. 5.19 ersichtlich wird, zeigt die genannte Versuchsreihe demnach ein grundsätzlich äußerst kontinuierliches, vollständig symmetrisches (äquivalente horizontale Verschiebungen $u_{h,li}$ und $u_{h,re}$ in den Auflager- bzw. Randbereichen der einzelnen Proben) Verformungsverhalten bis zum Erreichen der jeweiligen Höchstlast F_{max} (Höchstlasten F_{max} zwischen 39.50 und 46.60 kN), sowie kann darüber hinaus im gesamten Verschiebungsverlauf dieser Versuchstypologie kein expliziter spontan auftretender Versagensme-

chanismus (kein auftretendes Versagen bis zum Erreichen des maximalen Maschinenwegs des lastinduzierenden Bauteilprüfstands) festgestellt werden. Die vorgestellte Versuchsreihe charakterisiert sich schlussfolgernd wiederum durch einen konstant während des Versuchsverlaufs auftretenden Schädigungsmechanismus in Form einer Lochleibung der Strukturhölzer (Schädigungsmechanismus LH), einer Plastifizierung der darin vernagelten ballistischen Glattschaftnägel (Schädigungsmechanismus PN), sowie einer Plastifizierung der damit in Verbindung stehenden Puzzle Strip Schubleche (Schädigungsmechanismus PS). Darüber hinaus kann außerdem ein an der Verbundkomponente Beton kontinuierlich, symmetrisch fortschreitender Schädigungsmechanismus in Form von partiellen Rissbildungen in der Betonzugzone (Schädigungsmechanismus RB) detektiert werden, wie kumulativ dargestellt auch aus nachfolgender Abb. 5.23 ersichtlich wird.

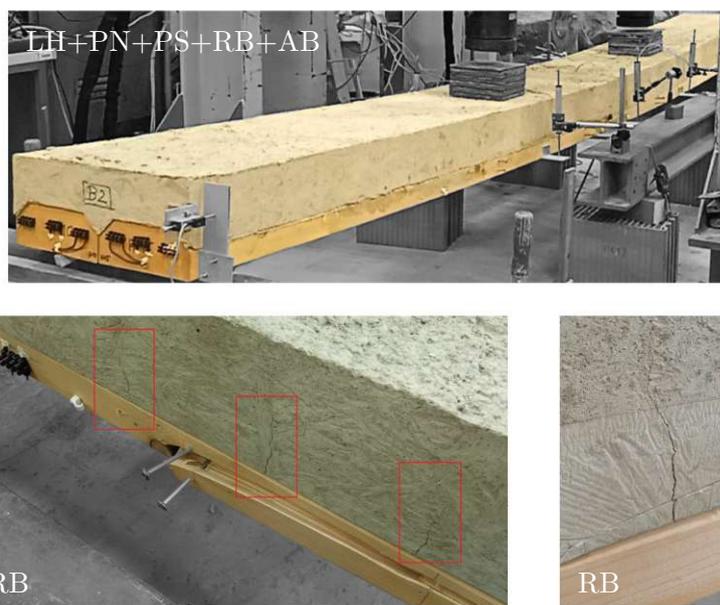


Abb. 5.23: Schädigungs-, Versagens und Systemmechanismen der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe KuTr-BI

Im des Weiteren vorliegenden Kontext einer projektspezifischen Ausformulierung der Kervencharakteristik ohne zusätzliche mechanische Verbindungsmittel zur Abhebesicherung kann für diese Versuchsreihe kein Abheben der Verbundkomponente Beton von der Verbundkomponente Holz (Systemmechanismus AB) festgestellt werden. Das beschriebene applizierte blechbasierte Schubverbindersystem kann demnach weiterführend als a priori gegebene Abhebesicherung innerhalb der Gesamtstruktur aufgefasst werden.

Abschließend zusammengefasst charakterisiert sich die Versuchsreihe KuTr-BI schlussfolgernd durch eine fortschreitende Schädigung des applizierten Schubverbindersystems, sowie der Verbundkomponente Beton bis zu einem Erreichen des Bereichs höchster Lasten F und höchster vertikaler Verschiebungen u_v ohne zusätzliche, lokal vorhandene Versagensmechanismen an der eigentlichen Tragstruktur selbst.

Mit weiterführendem Bezug auf das allgemeine Trag- und Verformungsverhalten der Versuchstypologie Kerbe (Versuchsreihe KuTr-Ke, Abb. 5.20 bzw. Abb. 5.22) definiert sich

ebendieses durch ein im Vergleich zur Versuchstypologie Blech entsprechend konträres, nicht duktiler Verhalten bei einer wiederum nur in gemäßigt, bzw. nur in geringem Maße vorhandenen Tragfähigkeit und Steifigkeit des Verbundsystems.

Wie hierzu aus Abb. 5.20 ersichtlich wird, charakterisiert sich die genannte Versuchsreihe demnach durch ein relativ lineares, großteils symmetrisches (größtenteils äquivalente horizontale Verschiebungen $u_{h,li}$ und $u_{h,re}$ in den Auflager- bzw. Randbereichen der einzelnen Proben) Verformungsverhalten bis zum Erreichen der jeweiligen Höchstlast F_{max} (Höchstlasten F_{max} zwischen 20.40 und 23.00 kN), gefolgt von einem spontan auftretenden Versagensmechanismus in Form eines Schubversagens des Betons im Ansatz der Kervenflanke (Versagensmechanismus SBK).



Abb. 5.24: Schädigungs-, Versagens- und Systemmechanismen der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe KuTr-Ke

Neben diesem maßgebenden Trag- und Verformungsverhalten im Bereich höchster Lasten F definiert sich die gesamte Versuchsreihe darüber hinaus durch ein entsprechend charakteristisches Nachbruchverhalten im Bereich hoher und höchster Verschiebungen u_v , welches sich abermalig durch ein relativ lineares, symmetrisches Verformungsverhalten un-

ter geringer Systemsteifigkeit ausdrücken lässt. In diesem Kontext kann auch in dem hierfür maßgebenden Bereich außerdem ein weiterer, teilweise vorhandener Versagensmechanismus in Form eines fortlaufenden Biegezugversagens der Strukturhölzer (Versagensmechanismus BZH) in einzelnen lokalen Bereichen (in Feldmitte) detektiert werden. Ebenso lässt sich in dem genannten Bereich ein, für die projektspezifische konzeptionelle Ausformulierung der Kervencharakteristik ohne zusätzliche mechanische Verbindungsmittel zur Abhebesicherung maßgebendes, Abheben der Verbundkomponente Beton von der Verbundkomponente Holz (Systemmechanismus AB) beobachten. Darüber hinaus kann, äquivalent zur Versuchstypologie Blech, des Weiteren außerdem ein wiederum im gesamten Versuchsverlauf kontinuierlich auftretender, symmetrisch fortschreitender Schädigungsmechanismus in Form von partiellen Rissbildungen in der Betonzugzone (Schädigungsmechanismus RB) festgestellt werden, wie kumulativ dargestellt auch aus Abb. 5.24 ersichtlich wird.

Abschließend zusammengefasst charakterisiert sich die Versuchsreihe KuTr-Ke demnach durch ein spontanes sprödebruchförmiges direktes Versagen des applizierten Schubverbindersystems im Bereich höchster Lasten F , sowie ist dieses gefolgt durch einzelne lokale Versagensmechanismen an der eigentlichen Tragstruktur selbst im Bereich höchster vertikaler Verschiebungen u_v , jeweils begleitet durch einen fortschreitenden Schädigungsmechanismus an der Verbundkomponente Beton, sowie durch ein charakteristisches Abheben ebendieser im Bereich hoher bis höchster vertikaler Verschiebungen u_v .

Mit darüber hinaus weiterführendem Bezug auf das allgemeine Trag- und Verformungsverhalten der Versuchstypologie Blech-Kerbe (Versuchsreihe KuTr-BI-Ke, Abb. 5.21 bzw. Abb. 5.22) definiert sich ebendieses durch kumulierte qualitative Eigenschaften der vorangegangenen beschriebenen Versuchstypologien Blech (Versuchsreihe KuTr-BI) und Kerbe (Versuchsreihe KuTr-Ke), wobei für diese Versuchstypologie darüber hinaus ein in diesem Kontext wesentlicher Interaktionsmechanismus auf Basis der Kombination der divergenten Schubverbindersysteme zu erkennen ist. Wie hierzu aus Abb. 5.21 ersichtlich wird, charakterisiert sich die genannte Versuchsreihe demnach durch eine einerseits kombinierte, wesentlich gesteigerte Tragfähigkeit und Steifigkeit des Verbundsystems, sowie andererseits auch durch ein in diesem Sinne koexistentes Spektrum an auftretenden Schädigungs- und Versagensmechanismen.

Die Versuchsreihe KuTr-BI-Ke zeigt dabei im Bereich geringer vertikaler Verschiebungen u_v ein kontinuierliches, symmetrisches, mit zunehmender Last leicht nicht-lineares duktileres Verformungsverhalten bis zum Eintreten eines vollständig antimetrisch (einseitig maßgebende horizontale Verschiebungen $u_{h,li}$ bzw. $u_{h,re}$ in den Auflager- bzw. Randbereichen der einzelnen Proben), teilweise spontan und teilweise fortschreitend auftretenden, maßgebenden Versagensmechanismus in Form eines Schubversagens des Betons im Ansatz der Kervenflanke (Versagensmechanismus SBK). Im Vergleich zur Versuchstypologie Kerbe kann hierbei nach dem Eintreten dieses Versagensmechanismus allerdings eine ausgebildete Traglastreserve im Nachbruchverhalten festgestellt werden. So fällt das aufnehmbare Lastniveau bei dieser Versuchsreihe nach dem Auftreten des Versagensmechanismus SBK zwar ab, kann daraufhin folgend aber noch maßgeblich gesteigert werden. In diesem Sinne findet sich die erreichbare Höchstlast F_{max} bei den Proben KuTr-BI-Ke-1 und 3 ($F_{max} = 41.80$ bzw. 51.20 kN) auch erst im Bereich höchster Verschiebungen u_v nach dem Auftreten des Versagensmechanismus SBK wieder. Demgegenüber zeigt sich die Probe KuTr-BI-Ke-2 zwar durch eine erreichbare Höchstlast F_{max} im Bereich des Versagensmechanismus SBK defi-

niert ($F_{max} = 44.60 \text{ kN}$), eine charakteristische Steigerung des aufnehmbaren Lastniveaus im Nachbruchverhalten kann qualitativ aber wiederum auch bei dieser Probe beobachtet werden. Im Detail zeigt sich das Nachbruchverhalten im Bereich hoher bis höchster Verschiebungen u_v hierbei als charakteristisch durch den Einsatz der blechernen Komponente bestimmt. So bildet sich nach dem Auftreten des maßgebenden Versagensmechanismus SBK wiederum ein kombinierter Schädigungsmechanismus in Form einer Lochleibung der Strukturhölzer (Schädigungsmechanismus LH), einer Plastifizierung der darin vernagelten ballistischen Glattschaftnägel (Schädigungsmechanismus PN), sowie einer Plastifizierung der damit in Verbindung stehenden Puzzle Strip Schubleche (Schädigungsmechanismus PS) aus. Darauf hin folgend ist darüber hinaus ebenso ein abermaliger abschließender Versagensmechanismus in Form eines fortlaufenden Biegezugversagens der Strukturhölzer (Versagensmechanismus BZH) in einzelnen lokalen Bereichen (im Felddrittel bzw. im Lasteinleitungsbereich) zu erkennen. Wiederum äquivalent zu den Versuchstypologien Blech und Kerne, kann außerdem ein an der Verbundkomponente Beton im gesamten Versuchsverlauf kontinuierlich auftretender, symmetrisch fortlaufender Schädigungsmechanismus in Form von partiellen Rissbildungen in der Betonzugzone (Schädigungsmechanismus RB) detektiert werden, wie kumulativ dargestellt auch aus Abb. 5.25 ersichtlich wird.



Abb. 5.25: Schädigungs-, Versagens- und Systemmechanismen der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe KuTr-BI-Ke

Im darüber hinaus vorliegenden Kontext einer projektspezifischen Ausformulierung der Kervencharakteristik ohne zusätzliche mechanische Verbindungsmittel zur Abhebesicherung kann für diese Versuchsreihe, im Vergleich zur Versuchstypologie Kerne, kein Abheben der Verbundkomponente Beton von der Verbundkomponente Holz (Systemmechanismus AB) festgestellt werden. Der festgehaltene Interaktionsmechanismus innerhalb der applizierten Schubverbindersysteme kann demnach weiterführend ebenso wiederum als a priori

gegebene Abhebesicherung innerhalb der Gesamtstruktur aufgefasst werden. Abschließend zusammengefasst charakterisiert sich die Versuchsreihe KuTr-BI-Ke demnach schlussfolgernd durch ein entsprechend kombiniertes charakteristisches Verhalten der Versuchstypologien Blech und Kerbe, welches sich im Bereich geringer vertikaler Verschiebungen u_v durch einen deutlichen Interaktionsmechanismus der beiden divergenten Verbindungstypologien darstellt und sich im Bereich hoher und höchster vertikaler Verschiebungen u_v durch ein qualitativ äquivalentes Trag- und Verformungsverhalten der blechernen Strukturkomponente unter besonderer Berücksichtigung einer Traglastreserve im Nachbruchverhalten ausdrücken lässt. Die allgemeine Konzeptidee des untersuchten Verbunddeckensystems als holistisch interagierendes Tragwerkskonzept, dessen vollständiges Potential ausschließlich auf Basis der kombinierten Applikation der divergenten Schubverbindersysteme abgerufen werden kann, lässt sich auf Basis der vorgestellten Versuchsergebnisse demnach schlussfolgernd final bestätigen.

5.5 Numerische Untersuchungen an klein- und großmaßstäblichen Verbundprobekörpern

Wie die gegebene Nomenklatur bereits zum Ausdruck bringt, umfassen die numerischen Untersuchungen an klein- und großmaßstäblichen Verbundprobekörpern alle simulationsbasierten Forschungsinhalte im Kontext der strukturell maßgebenden klein- und großmaßstäblichen Skalenebenen. In diesem Sinne werden hierbei numerische Modelle der kleinmaßstäblichen Versuchsreihen in Form der doppelsymmetrischen Push Out Proben (KuPu-BI, KuPu-Ke und KuPu-BI-Ke), sowie der großmaßstäblichen Versuchsreihen in Form der symmetrischen Biegeträger (KuTr-BI, KuTr-Ke und KuTr-BI-Ke) erstellt, im Sinne einer allgemeinen Kontinuumsmechanik simulativ bearbeitet und anschließend den real generierten, experimentellen Untersuchungsergebnissen gegenübergestellt. Ziel des gegebenen Forschungsgegenstands soll es demnach sein, einerseits das vorhandene Trag- und Verformungsverhalten der gegebenen Versuchsreihen auf Basis einer möglichst realitätsnahen Modellbildung demgemäß grundsätzlich numerisch zu beschreiben, sowie andererseits auf Basis dessen überdies demgemäße Rückschlüsse im Kontext mechanischer Eigenschaften bzw. auftretender Bruchmechanismen zu generieren und diese auch entsprechend zu charakterisieren. In diesem Sinne soll es abschließend folglich möglich werden, die real vorhandenen experimentellen Untersuchungsergebnisse nicht nur numerisch zu validieren, sondern im weiteren Kontext ebenso einen tieferen strukturbasierten Einblick in die kontinuumsmechanischen Charakteristiken der einzelnen Versuchsreihen zu gewährleisten.

5.5.1 Numerische Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern

Der kontextuelle Umfang der numerischen Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern beinhaltet, wie auch bereits einleitend erwähnt, grundsätzlich alle simulationsbasierten Forschungsinhalte mit Bezug auf die drei kleinmaßstäblichen Versuchstypologien Blech, Kerbe und Blech-Kerbe in Form der hierbei maßgebenden Versuchsreihen KuPu-BI, KuPu-Ke und KuPu-BI-Ke. In diesem Sinne werden hierbei dreidimensionale

numerische Modelle der genannten Versuchsreihen entwickelt, in einem kontinuumsmechanischen Kontext mittels des Programmpakets **Abaqus FEA** weiterführend ausgewertet und auf dieser Basis gründend folglich abschließend analysiert und bewertet. Mit Bezug auf den innerhalb dieser Simulationen angewendeten Detaillierungsgrad, kann dieser unter der Berücksichtigung der vorhandenen genannten dreidimensionalen Modellbildung als grundsätzlich hoch bis sehr hoch bezeichnet werden, die gegebenen numerischen Modelle zielen schlussfolgernd auf eine explizite detailgetreue Modellierung (inklusive allfälliger detailgetreuer Materialmodelle) aller einzelnen Teilkomponenten der jeweiligen Proben ab, wie im näheren Detail auch nachfolgend aus *Kapitel 5.5.1.1* ersichtlich wird.

5.5.1.1 Struktureigenschaften und Aufbau der Simulationsmodelle

Die vorliegenden Simulationsmodelle der Versuchsreihen KuPu-Bl, KuPu-Ke und KuPu-Bl-Ke definieren sich grundsätzlich, wie auch bereits einleitend erwähnt, durch eine vollständig dreidimensionale Modellbildung bestehend aus entsprechenden jeweils kontinuumsförmigen dreidimensionalen einzelnen Teilkomponenten. In diesem Sinne charakterisieren sich die jeweiligen numerischen Modelle durch demgemäße kontinuumsförmige Bauteilgruppen mit entsprechend gegebenen Assemblierungs- und Materialeigenschaften, wie überblicksmäßig auch aus nachfolgender *Abb. 5.26* entnommen werden kann.

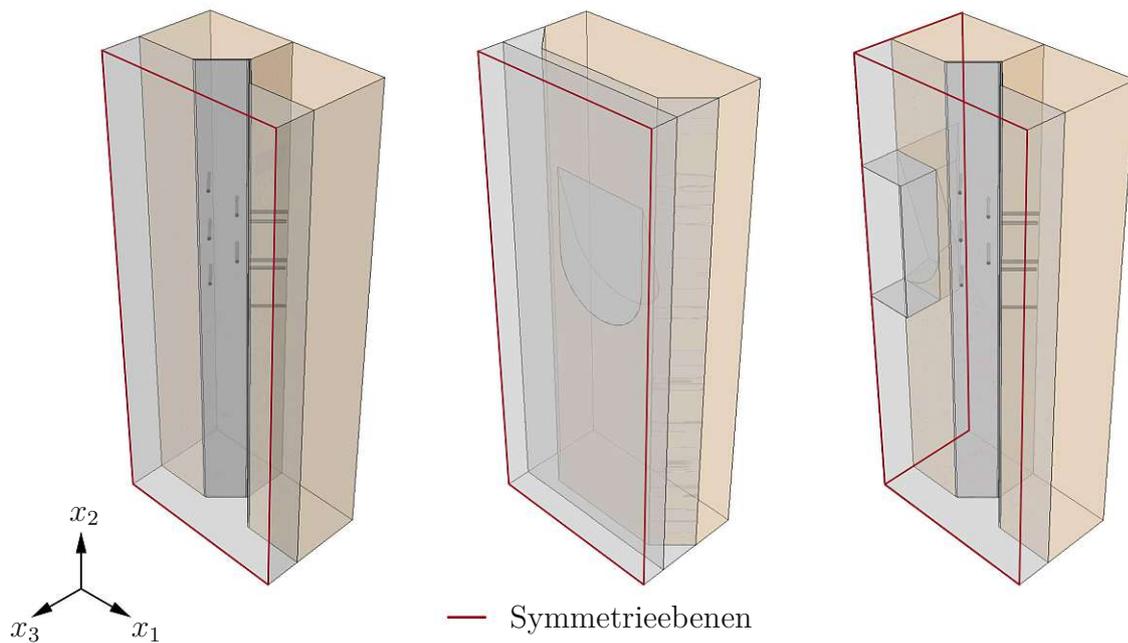


Abb. 5.26: Überblick zur numerischen Modellbildung der kleinmaßstäblichen Verbundprobekörper | Versuchsreihen KuPu-Bl (links), KuPu-Ke (mittig) und KuPu-Bl-Ke (rechts)

Wie aus *Abb. 5.26* ersichtlich wird, definieren sich die gegebenen dreidimensionalen numerischen Modelle der Versuchsreihen KuPu-Bl, KuPu-Ke und KuPu-Bl-Ke im Sinne einer real vorhandenen Probenkonfiguration, wie auch entsprechend aus *Kapitel 5.3.1* zu entnehmen ist, nicht anhand von demgemäßen doppelsymmetrischen Holz-Beton-Verbindungen,

sondern charakterisieren sich demgegenüber durch einen symmetrieeingetragenen reduzierten Komponentenaufbau. In diesem Sinne werden zur Steigerung der gegebenen numerischen Effizienz Symmetrieeigenschaften der real vorhandenen doppelsymmetrischen Proben genutzt und in der vorhandenen Modellbildung berücksichtigt. Die Versuchsreihen KuPu-BI und KuPu-Ke (Abb. 5.26 (links) bzw. (mittig)) definieren sich demnach durch einen im Vergleich zur realen Probenkonfiguration resultierend halbierten Komponentenaufbau mit einer Symmetrieeingung in der x_1x_2 -Ebene, sowie zeigt sich die Versuchsreihe KuPu-BI-Ke (Abb. 5.26 (rechts)) durch einen im Vergleich zur realen Probenkonfiguration demgemäß resultierend geviertelten Komponentenaufbau mit Symmetrieeingungen in der x_1x_2 -Ebene, sowie der x_2x_3 -Ebene bestimmt. Darüber hinaus zeigt sich die vorliegende Assemblierung der einzelnen vorhandenen Komponenten im weiteren Detail durch jeweils charakteristische Kontaktbedingungen der einzelnen Versuchstypologien bestimmt, wobei diese dabei grundsätzlich sowohl auf Basis von entsprechend gegebener Literatur, als auch mit Bezug auf vorliegende systemindividuelle Eigenschaften festgelegt werden. Die in diesem Sinne vollumfassend gegebenen Kontaktbedingungen können demnach nachfolgend beschrieben werden, anzumerken sei in diesem Kontext schlussfolgernd aber überdies hinweg, dass die jeweilige Zuordnung der einzelnen beschriebenen Kontaktbedingungen in den Simulationsmodellen hierbei natürlich grundsätzlich allerdings nur in Abhängigkeit des jeweiligen tatsächlichen Vorhandenseins innerhalb der einzelnen Versuchsreihen KuPu-BI, KuPu-Ke und KuPu-BI-Ke erfolgt.

In diesem Kontext werden für die allgemeinen (nicht durch eine eventuell vorhandene Gleitebene in Form einer PE-Folie beeinflussten) Kontaktbereiche zwischen den Komponenten Holz und Beton, zwischen der Komponente Holz und dem applizierten Puzzle Strip Schublech und zwischen der Komponente Holz und den einzelnen ballistischen Glattschaftnägeln einerseits entsprechend nachgiebige, mit jeweiligen Reibungskoeffizienten μ nach *Dias* [55] bzw. *Miriano* [56] behaftete, Kontaktbedingungen definiert (siehe hierzu in detaillierterer Form auch *Anhang C*), sowie werden den weiteren mit dem applizierten Puzzle Strip Schublech überdies in Verbindung stehenden Kontaktbereichen (Kontaktbereiche zwischen dem Puzzle Strip Schublech und der Komponente Beton bzw. dem Puzzle Strip Schublech und den einzelnen ballistischen Glattschaftnägeln) andererseits starre Kontakteigenschaften zugewiesen. Die Applikation dieser genannten starren Kontaktbedingungen stellt hierbei grundsätzlich eine gewisse Vereinfachung der realen Probencharakteristik dar (Modellierung eines direkten starren Verbunds zwischen der Komponente Beton und dem gegebenen Puzzle Strip Schublech unter der Vernachlässigung der tatsächlich vorhandenen Laschen der Bleche und der darin applizierten Flächenbewehrung bzw. Modellierung eines direkten starren Verbunds zwischen dem gegebenen Puzzle Strip Schublech und den einzelnen ballistischen Glattschaftnägeln unter der Vernachlässigung einer gegebenen Nagelkopfgeometrie), ist aufgrund der vorhandenen Struktureigenschaften im Sinne einer möglichst effizienten Simulationscharakteristik aber zulässig und sinnvoll, als die kontextuellen realen Versuchsdurchführungen gemäß *Kapitel 5.3* diese Schlussfolgerungen folglich auch zulassen. Zusätzlich zu diesen gegebenen, im eigentlichen Sinne komponentenbezogenen, Kontaktbedingungen zwischen den einzelnen jeweiligen Modellkomponenten wird abschließend darüber hinaus zusätzlich ebenso eine notwendige strukturbezogene Kontaktbedingung in der erwartbaren Scher- bzw. Bruchfläche der eigentlichen betonbasierten Kerbe definiert, auf Basis derer eine detailgetreue Abbildung des Bruchverhaltens

dieser expliziten Schubverbindertypologie erfolgen soll. Im genaueren Detail handelt es sich hierbei somit um keine physische Kontaktbedingung zwischen zwei verschiedenen Komponenten, sondern lediglich um einen in Form einer kohäsiven Versagensfläche a priori definierten Versagensbereich innerhalb der entsprechenden Komponente Beton, welcher folglich auch erst bei einem versagensrelevanten Spannungszustand der kervenbasierten Versuchsreihen maßgebend wird.

Mit weiterem Bezug auf die verwendeten Materialmodelle innerhalb der vorliegenden numerischen Modellierung der kleinmaßstäblichen Versuchsreihen können diese darüber hinaus im Allgemeinen als entsprechend werkstoffspezifisch und demgemäß als jeweils individuell im Kontext richtungs- und verformungsabhängiger Eigenschaften beschrieben werden. Als sich die genannten Modellkonfigurationen dabei im Generellen darüber hinaus durch eine Vielzahl an einzelnen Materialparametern definieren, soll nachfolgend daher auch nur eine überblicksmäßige Darstellung der jeweiligen Modelleigenschaften erfolgen, für demgemäß explizit genauere Details der einzelnen Materialmodelle darf weiterführend überdies auf *Anhang C* verwiesen werden.

In diesem Sinne und im weiteren Kontext definiert sich die materialspezifische Modellbildung der Verbundkomponente Holz auf Basis eines grundsätzlich orthotropen elastisch-plastischen Materialmodells, wobei der hierbei gegebene plastische Verhaltensanteil bei genauerer Betrachtung anhand einer isotropen Verfestigung in Verbindung mit dem Fließkriterium nach *Hill* [57] realisiert wird (**Abaqus FEA** Funktionen **Elastic** und **Plastic - Potential**). Explizite für diese Modellkonfiguration notwendige Materialparameter und -zusammenhänge bauen im weiteren Kontext dabei in Anlehnung an normative und literarische Quellen nach *ÖNORM EN 338* [54] und *Kretschmann* [58], sowie auf Basis der Inhalte der Materialdatenbank *MatWeb* [59] auf. Mit weiterem Hinblick auf die materialspezifische Modellbildung der Verbundkomponente Beton definiert sich diese auf Basis eines grundsätzlich isotropen elastisch-plastischen Materialmodells, wobei das hierbei gegebene plastische bzw. im weiteren Sinne auch bruchmechanische Verhalten der gegebenen Materialkomponente im genaueren Detail auf Basis eines Fließkriteriums nach *Drucker-Prager* [60] realisiert wird (**Abaqus FEA** Funktionen **Elastic** und **Concrete Damaged Plasticity**). Explizite für diese Modellkonfiguration notwendige Materialparameter und -zusammenhänge definieren sich in diesem Kontext dabei weiterführend in Anlehnung an die normativen Gegebenheiten gemäß *ÖNORM EN 1992-1-1* [52], sowie bauen diese darüber hinaus auf Basis der literarischen Zusammenhänge nach *Elkady* [61] in Form des weiterführenden **Abaqus FEA** Plugins **Abaqus CDP Generator** auf. Mit darüber hinaus vorliegendem Hinblick auf die materialspezifische Modellbildung der vorhandenen metallischen Strukturkomponenten in Form der gegebenen Puzzle Strip Schubleche bzw. der darin applizierten ballistischen Glattschaftnägel zeichnen sich diese überdies durch grundsätzlich isotrope elastisch-plastische Materialmodelle aus, wobei das dabei vorhandene elastische bzw. plastische Materialverhalten im näheren Detail hierbei anhand von jeweils multi-linearen Spannungs-Dehnungs-Zusammenhängen abgebildet wird.

Unter der weiteren Berücksichtigung dieser beschriebenen Eigenschaften bzw. Zuordnungen ist eine vollumfassende Definition der angestrebten numerischen Modellbildungen folglich möglich, eine demgemäße Darstellung der aus diesem Kontext heraus resultierenden Untersuchungsergebnisse der maßgebenden Versuchsreihen KuPu-Bl, KuPu-Ke und KuPu-Bl-Ke kann demnach schlussfolgernd gemäß nachfolgendem *Kapitel 5.5.1.2* erfolgen.

5.5.1.2 Darstellung und Interpretation der numerischen Untersuchungsergebnisse

Mit Bezug auf eine allgemeine verifizierende Darstellung der Untersuchungsergebnisse der numerischen Modellbildungen im Vergleich zu den experimentell generierten Versuchsergebnissen sollen im weiterführend vorliegenden Kontext demgemäß die resultierenden Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der einzelnen Versuchsreihen KuPu-BI, KuPu-Ke und KuPu-BI-Ke betrachtet werden, wie dementsprechend auch aus den gegenständlichen Abbildungen Abb. 5.27 und Abb. 5.28 ersichtlich wird.

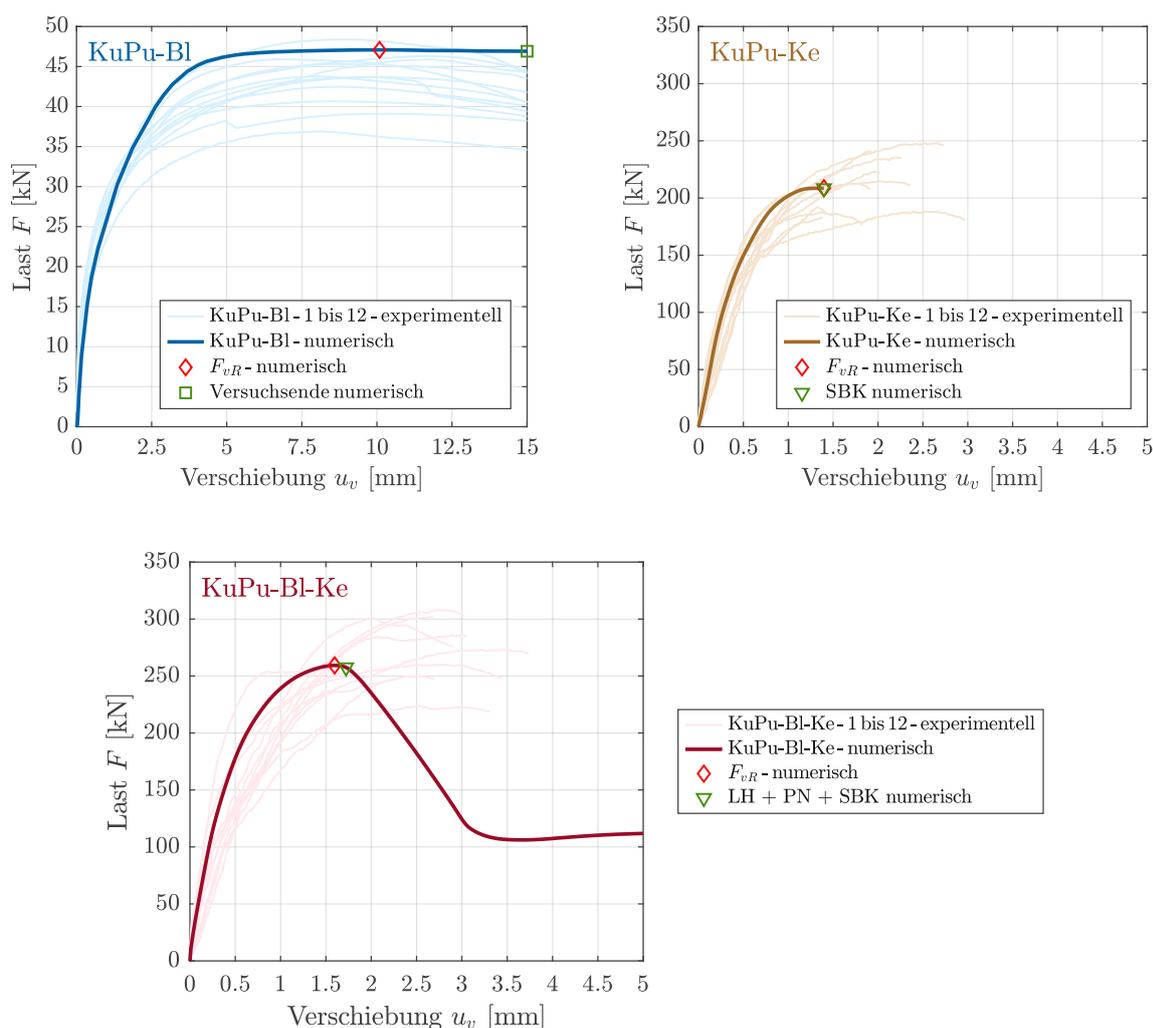


Abb. 5.27: Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der numerischen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe KuPu-BI (oben links), Versuchsreihe KuPu-Ke (oben rechts), Versuchsreihe KuPu-BI-Ke (unten)

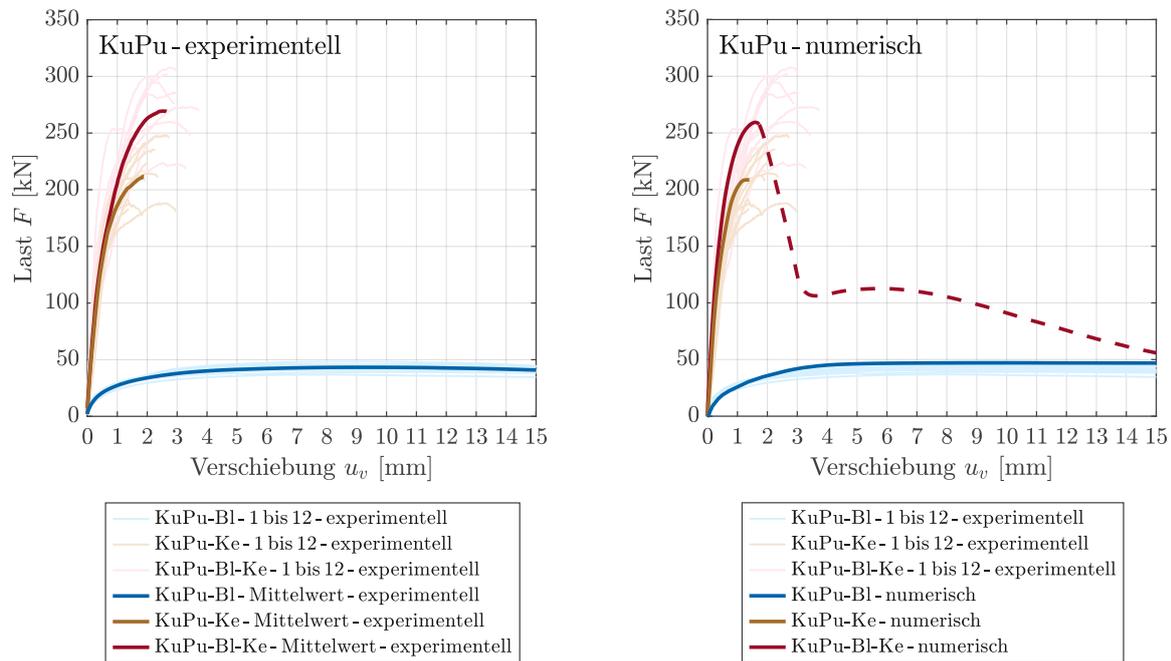


Abb. 5.28: Vergleich der Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen und numerischen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Experimentelle Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der Versuchsreihen KuPu-BI, KuPu-Ke und KuPu-BI-Ke (links), Numerische Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der Versuchsreihen KuPu-BI, KuPu-Ke und KuPu-BI-Ke (rechts)

Gemäß den in Abb. 5.27 und Abb. 5.28 dargestellten Zusammenhängen lassen sich die Untersuchungsergebnisse der numerischen Modellbildungen im allgemeinen Sinne als grundsätzlich vollständig repräsentativ für alle drei maßgebenden blech- bzw. kervenbasierten Versuchsreihen bezeichnen. Entsprechend dieser gegebenen Charakteristik stellen sich die vorhandenen numerisch generierten Last-Verschiebungs-Zusammenhänge als demgemäß realitätsnah dar, ein weiterführender simulations-, sowie auch verifikationsbasierter, Einblick in die strukturmechanischen Gegebenheiten der einzelnen Versuchstypologien Blech, Kerne und Blech-Kerne wird auf Basis der vorliegenden numerischen Modelle demnach schlussfolgernd möglich.

Betrachtet man im weiteren Zusammenhang folglich das Trag- und Verformungsverhalten der rein blechbasierten Versuchsreihe KuPu-BI, zeichnet sich dieses, äquivalent zu dem der experimentellen Untersuchungen gemäß *Kapitel 5.3*, durch ein grundsätzlich entsprechend hochduktilen Verhalten bei einer gleichzeitig allerdings nur in geringem Maße vorhandenen Tragfähigkeit und Steifigkeit der Verbindung aus, wobei sich das elastisch-plastische Materialverhalten der Verbundkomponente Holz, sowie ebendieses der applizierten ballistischen Glattschaftsnägel hierbei als wesentlichstes kontextuelles Charakteristikum darstellt. In diesem Sinne können das vorhandene Trag- und Verformungsverhalten, sowie im genaueren Detail auch der daraus resultierende Last-Verschiebungs-Zusammenhang der vorliegenden

Versuchsreihe KuPu-BI, auf Basis dieser Gegebenheiten numerisch klar abgeleitet werden, eine demgemäß sinnverwandte Darstellung dieser Ergebnisse kann schlussfolgernd nachfolgend auch entsprechend aus Abb. 5.29 entnommen werden.

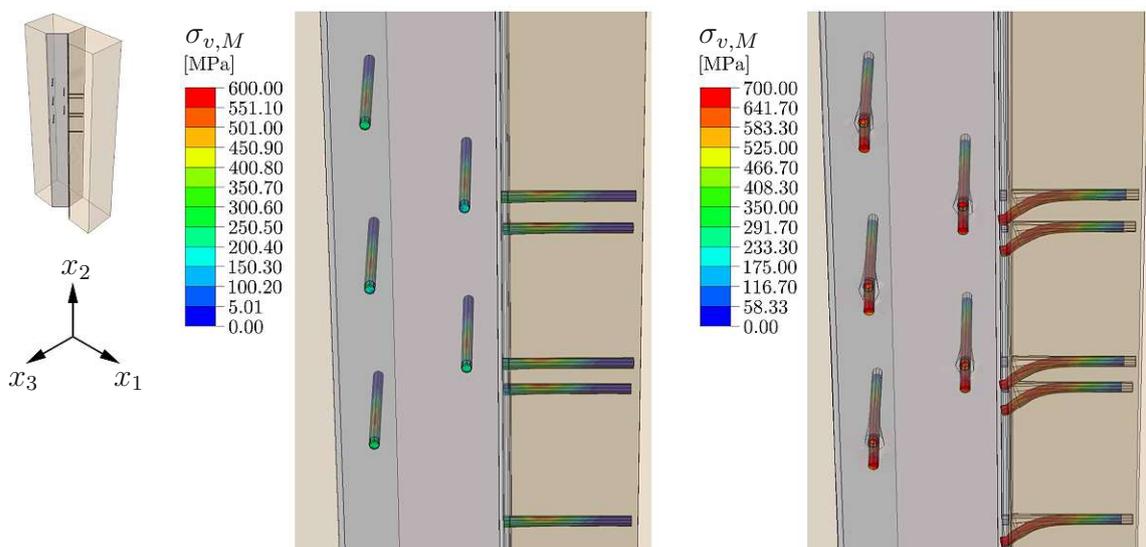


Abb. 5.29: Untersuchungsergebnisse der numerischen Modellbildung der kleinmaßstäblichen Verbundprobekörper | Versuchsreihe KuPu-BI | Übersicht zur Modellbildung (links), von Mises Vergleichsspannung $\sigma_{v,M}$ und Deformationen der ballistischen Glattschaftnägel bei Erreichen der Streckgrenze f_y ebendieser (mittig), von Mises Vergleichsspannung $\sigma_{v,M}$ und Deformationen der ballistischen Glattschaftnägel bei Erreichen der Zugfestigkeit f_u ebendieser (rechts)

Wie aus vorliegender Abb. 5.29, bzw. ebenso aus Abb. 5.27 und Abb. 5.28 ersichtlich wird, charakterisiert sich das numerisch abgebildete resultierende Trag- und Verformungsverhalten der rein blechbasierten Versuchsreihe KuPu-BI demnach durch keinen explizit vorhandenen Versagensmechanismus, sondern vielmehr durch einen entsprechend voranschreitenden, kombiniert auftretenden Schädigungsmechanismus in Form einer Lochleibung der Strukturhölzer (Schädigungsmechanismus LH), sowie einer überdies vorhandenen Plastifizierung der darin vernagelten ballistischen Glattschaftnägel (Schädigungsmechanismus PN). Diese Charakteristiken stellen sich hierbei als grundsätzlich äquivalent im Vergleich zu jenen aus den experimentellen Beobachtungen dar, mithilfe der vorliegenden numerischen Modellbildung können diese Prozesse aber zusätzlich in maßgeblich detaillierterer Form beschrieben werden. So zeigt sich in diesem Sinne bereits bei einer in einem nur geringen bis mittleren Bereich angesiedelten Last F ein demgemäßes Erreichen der Streckgrenze f_y ($f_y = 600$ MPa) der ballistischen Glattschaftnägel, überdies weisen die besagten Verbindungsmittel in diesem Stadium allerdings noch keine bis nur sehr geringe vertikale Verschiebungen u_v auf, wie auch aus Abb. 5.29 (mittig) deutlich wird. Schlussfolgernd stellt sich die Verbundkomponente Holz ebenso durch noch keine bzw. nur sehr geringe Lochleibungsanteile dar, die vorhandene Verformung des Nagelbetts kann in diesem Lastbereich folglich weiterführend ebenso als dementsprechend elastisch beschrieben werden. Erst durch eine demgemäß weitere Steigerung der aufgebrachtten Last F bildet

sich ein für die rein blechbasierte Versuchsreihe charakteristischer Schädigungsmechanismus in Form einer Lochleibung der Strukturhölzer, sowie einer Plastifizierung der darin vernagelten ballistischen Glattschaftsnägel aus, wie weiterführend auch gemäß Abb. 5.29 (rechts) ersichtlich wird. In einem demgemäß erhöhten Lastbereich charakterisieren sich die ballistischen Glattschaftsnägel demnach einerseits durch ein Erreichen der Zugfestigkeit f_u ($f_u = 700$ MPa) und eine folglich charakteristische Fließgelenkbildung in den genannten Verbindungsmitteln, sowie stellt sich die Verbundkomponente Holz andererseits überdies durch eine entsprechende plastische Verformung des Nagelbetts (auftretende Lochleibung innerhalb des Nagelbetts) dar. Ebenso kommt es in einem dementsprechend gesteigerten Lastbereich zu einem überdies vorhandenen Herausziehen der ballistischen Glattschaftsnägel aus der Verbundkomponente Holz und somit zu einer des Weiteren resultierenden vertikalen Verschiebung u_v des an diese Verbindungsmittel gekoppelten Puzzle Strip Schublechs, sowie der damit starr verbundenen Komponente Beton. Resultierend aus diesen genannten Mechanismen ergibt sich schlussfolgernd das einleitend bereits beschriebene, für die rein blechbasierte Versuchsreihe KuPu-BI charakteristische, hochduktiler Trag- und Verformungsverhalten, wobei dieses resümierend zusammengefasst als wesentlich bestimmt durch einerseits die Plastifizierung und das damit einhergehende Herausziehen der ballistischen Glattschaftsnägel, sowie durch andererseits die vorhandene plastische Deformation der mit den genannten Verbindungsmitteln in Verbindung stehenden Verbundkomponente Holz beschrieben werden kann.

Mit weiterem Hinblick auf das Trag- und Verformungsverhalten der rein kervenbasierten Versuchsreihe KuPu-Ke, zeichnet sich dieses, wiederum äquivalent zu dem der experimen-

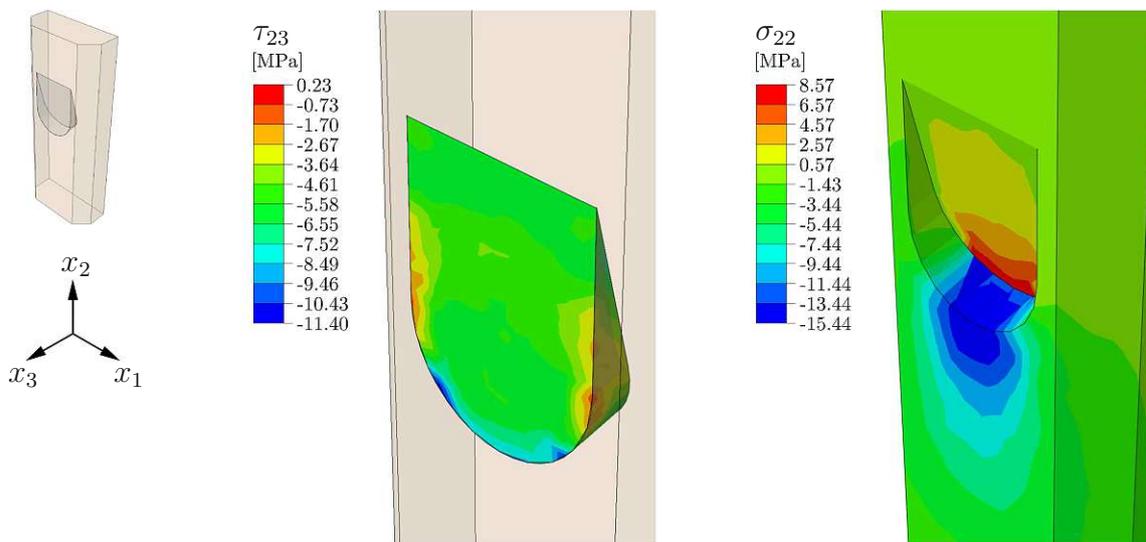


Abb. 5.30: Untersuchungsergebnisse der numerischen Modellbildung der kleinmaßstäblichen Verbundprobekörper | Versuchsreihe KuPu-Ke | Übersicht zur Modellbildung (links), Schubspannung τ_{23} in der Kerbe bzw. im Ansatz der Kervenflanke unmittelbar vor dem Auftreten des Schubversagens des Betons (mittig), Normalspannung σ_{22} im Holz unmittelbar vor dem Auftreten des Schubversagens des Betons (rechts)

tellen Untersuchungen gemäß *Kapitel 5.3*, durch ein, im Vergleich zur Versuchsreihe KuPu-BI konträres, grundsätzlich entsprechend sprödes Verhalten bei einer zeitgleich vergleichsweise aber wesentlich gesteigerten Tragfähigkeit und Steifigkeit der Verbindung aus, wobei sich das gegebene Material(bruch)verhalten der Verbundkomponente Beton hierbei überdies als wesentlichstes kontextuelles Charakteristikum darstellt. In diesem Sinne können das vorhandene Trag- und Verformungsverhalten, sowie im genaueren Detail auch der daraus resultierende Last-Verschiebungs-Zusammenhang der vorliegenden Versuchsreihe KuPu-Ke, auf Basis dieser Gegebenheiten numerisch wiederum klar abgeleitet werden, eine demgemäß sinnverwandte Darstellung dieser Ergebnisse kann schlussfolgernd auch entsprechend aus gegebener Abb. 5.30 entnommen werden bzw. ist überdies ebenso aus Abb. 5.27 und Abb. 5.28 ersichtlich. Gemäß diesen Zusammenhängen charakterisiert sich das numerisch abgebildete Trag- und Verformungsverhalten der rein kervenbasierten Versuchsreihe KuPu-Ke demnach durch einen plötzlich auftretenden, alleinigen Versagensmechanismus in Form eines Schubversagens des Betons im Ansatz der Kervenflanke (Versagensmechanismus SBK), wobei dieses Charakteristikum sich hierbei grundsätzlich als abermalig äquivalent im Vergleich zu jenem aus den experimentellen Beobachtungen darstellt, mithilfe der vorliegenden numerischen Modellbildung aber wiederum zusätzlich in maßgeblich detaillierterer Form beschrieben werden kann.

Demgemäß charakterisiert sich das resultierende Trag- und Verformungsverhalten dieser Versuchsreihe im allgemeinen Anfangsstadium bzw. auch im Bereich einer weiters zunehmenden Last F durch ebenso zunehmende elastische Deformationen der Verbundkomponenten Holz und Beton, aufgrund dieser genannten elastischen Charakteristik bildet sich in diesem Stadium allerdings kein gegebener plastischer Versagensmechanismus aus. Erst bei einer demgemäß wesentlich gesteigerten Last F bzw. bei einem folglich Erreichen der vorhandenen Schubtragfähigkeit F_{vR} kommt es im Ansatz der Kervenflanke zur Ausbildung eines entsprechend versagensrelevanten Spannungszustands, auf Basis dessen der bereits einleitend erwähnte, plötzlich auftretende, spröde Versagensmechanismus in der Form eines Schubversagens des Betons in der beschriebenen Versagensfläche eintritt. Betrachtet man in diesem Kontext die gemäß Abb. 5.30 unmittelbar vor dem Auftreten des Schubversagens des Betons vorhandenen Schub- und Normalspannungen in den Verbundkomponenten Beton und Holz, wird die weiterführende Charakteristik dieses versagensrelevanten Spannungszustands im näheren Detail darüber hinaus deutlich.

So zeigt sich die Verbundkomponente Holz durch eine maximale Normalspannung σ_{22} von ≈ -15 MPa bestimmt (siehe Abb. 5.30 (rechts)) und liegt die Schubspannung τ_{23} in der Versagensfläche der Kerbe im Mittel bei ≈ -4.5 bis ≈ -6.5 MPa (Spannungsspitzen bis ≈ -11 MPa, siehe Abb. 5.30 (mittig)). Hierbei handelt es sich demgemäß vollständig um vorhandene Druckspannungen in allerdings entsprechend unterschiedlichen Strukturbereichen, in Abhängigkeit der jeweiligen Komponenten können darauf aufbauend demnach auch variierende kontextuelle Schlussfolgerungen gezogen werden. In diesem Sinne liegt die resultierende Höchstspannung der Verbundkomponente Holz ($\sigma_{22} \approx -15$ MPa) in der kontaktbasierten Kervenflanke der beiden Verbundkomponenten Holz und Beton und somit in einem grundsätzlich druckbeanspruchten Bereich der Verbundkomponente Holz. Betrachtet man im weiteren Kontext die gegebene Quantität der in diesem Kontaktbereich resultierenden Normalspannung σ_{22} , wird deutlich, dass die Verbundkomponente Holz hierbei schlussfolgernd auch ausschließlich nur elastische Deformationen erfährt, ein

holzbasierendes plastisches Versagen der genannten Strukturkomponente kann aufgrund der vorliegenden numerischen Modellbildung folglich ausgeschlossen werden. Vollständig konträr dazu verhält es sich angesichts der vorliegenden Untersuchungsergebnisse weiterführend überdies mit Bezug auf die resultierenden Spannungsverhältnisse in der Versagensfläche der Kerbe, als die hierbei resultierend auftretenden Schubspannung τ_{23} (τ_{23} im Mittel bei ≈ -4.5 bis ≈ -6.5 MPa) bereits zu einem direkten Strukturversagen der vorliegenden Versuchsreihe KuPu-Ke führt. Die auftretende vorhandene Schubspannung τ_{23} kann demnach schlussfolgernd bereits als direktes Versagenskriterium der vorliegenden Versuchstypologie angesehen werden und darf demgemäß folglich ebenso als entsprechend maßgebendes Charakteristikum der vorliegenden Versuchsreihe verstanden werden. Basierend auf diesen angeführten Eigenschaften ergibt sich abschließend folglich das einleitend bereits beschriebene, für die rein kervenbasierte Versuchsreihe KuPu-Ke charakteristische, spröde Trag- und Verformungsverhalten, wobei dieses resümierend zusammengefasst als wesentlich bestimmt durch die Struktureigenschaften der vorliegenden Versagensfläche im Flankenansatz der Kerbe beschrieben werden kann.

Mit darüber hinaus vorliegendem Hinblick auf das Trag- und Verformungsverhalten der kombiniert ausgeführten, blech- und kervenbasierten Versuchsreihe KuPu-BI-Ke, zeichnet sich dieses durch eine grundsätzlich der rein kervenbasierten Versuchsreihe KuPu-Ke ähnliche Charakteristik in Form eines wiederum spröden Verhaltens bei einer zeitgleich allerdings vergleichsweise nochmalig gesteigerten Tragfähigkeit und Steifigkeit der Verbindung aus. Darüber hinaus lassen sich für die vorliegende Versuchsreihe KuPu-BI-Ke im Vergleich zur rein kervenbasierten Versuchstypologie überdies allerdings auch noch zusätzliche, der rein blechbasierten Versuchstypologie ähnliche, Systemcharakteristiken

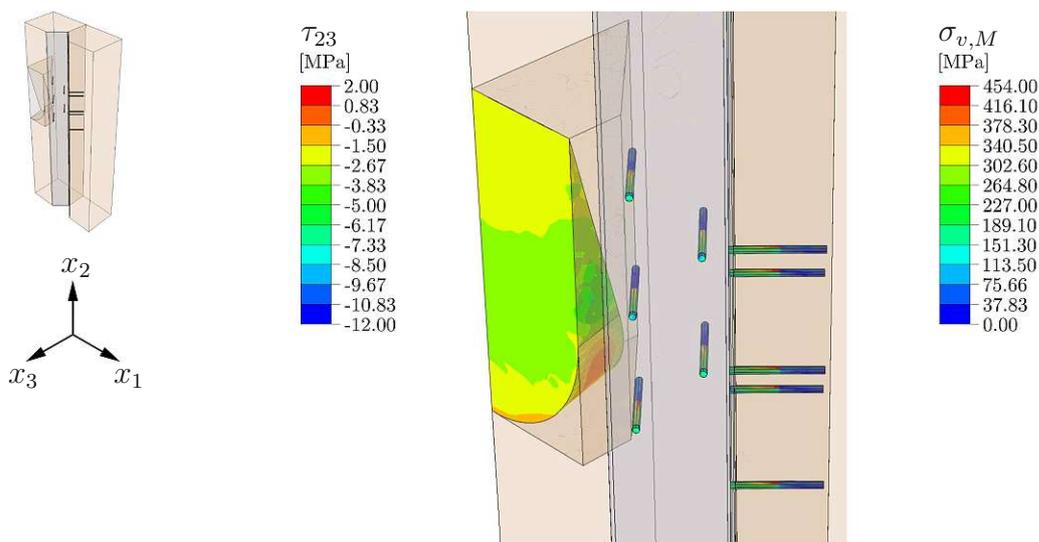


Abb. 5.31: Untersuchungsergebnisse der numerischen Modellbildung der kleinmaßstäblichen Verbundprobekörper | Versuchsreihe KuPu-BI-Ke | Übersicht zur Modellbildung (links), Schubspannung τ_{23} in der Kerbe bzw. im Ansatz der Kervenflanke bei geringer Last F (Bildmitte links), von Mises Vergleichsspannung $\sigma_{v,M}$ und Deformationen der ballistischen Glattschaftsnägel bei geringer Last F (Bildmitte rechts)

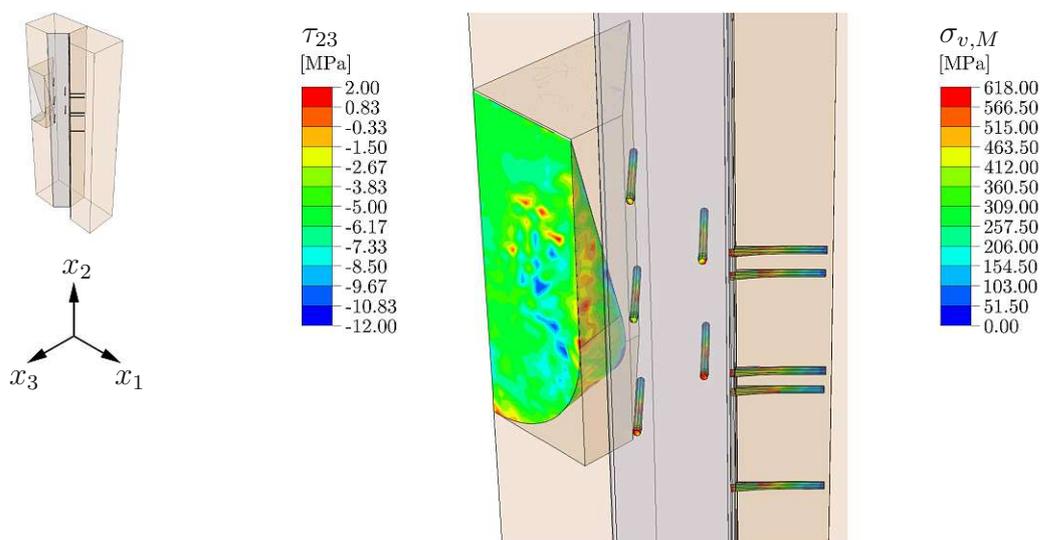


Abb. 5.32: Untersuchungsergebnisse der numerischen Modellbildung der kleinmaßstäblichen Verbundprobekörper | Versuchsreihe KuPu-BI-Ke | Übersicht zur Modellbildung (links), Schubspannung τ_{23} in der Kerbe bzw. im Ansatz der Kervenflanke unmittelbar vor dem Auftreten des Schubversagens des Betons (Bildmitte links), von Mises Vergleichsspannung $\sigma_{v,M}$ und Deformationen der ballistischen Glattschaftsnägel unmittelbar vor dem Auftreten des Schubversagens des Betons (Bildmitte rechts)

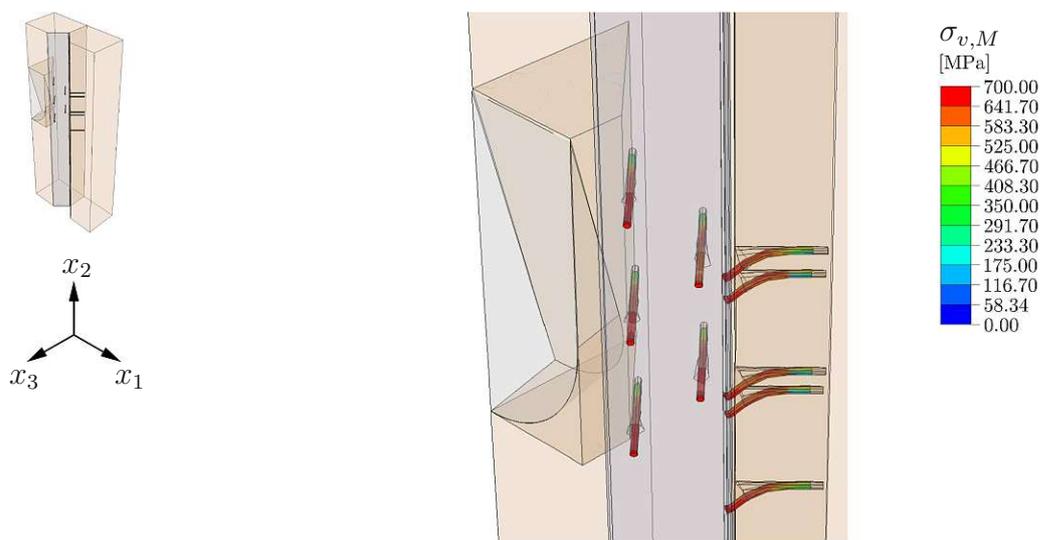


Abb. 5.33: Untersuchungsergebnisse der numerischen Modellbildung der kleinmaßstäblichen Verbundprobekörper | Versuchsreihe KuPu-BI-Ke | Übersicht zur Modellbildung (links), von Mises Vergleichsspannung $\sigma_{v,M}$ und Deformationen der ballistischen Glattschaftsnägel nach dem Auftreten des Schubversagens des Betons (Bildmitte rechts)

feststellen. In diesem Sinne können das vorhandene Trag- und Verformungsverhalten, sowie im genaueren Detail auch der daraus resultierende Last-Verschiebungs-Zusammenhang der vorliegenden Versuchsreihe KuPu-BI-Ke, auf Basis dieser Gegebenheiten demgemäß wiederum numerisch klar abgeleitet werden, im Vergleich zu den experimentellen Untersuchungen gemäß *Kapitel 5.3* besteht auf Basis dieser vorliegenden numerischen Modellbildung darüber hinaus aber ebenso die Möglichkeit einen detaillierten Einblick in das vorhandene Nachbruchverhalten der gegebenen Versuchstypologie zu geben, als dies bei den experimentellen Untersuchungen aufgrund des schlagartigen Schubversagens des Betons und der daraus resultierenden Beeinträchtigung bzw. unkontrollierten Bewegung der applizierten Wegaufnehmer kaum möglich ist.

Betrachtet man in diesem Kontext, wie demgemäß auch aus Abb. 5.27 und Abb. 5.28 ersichtlich wird, die für diese Versuchsreihe maßgebend auftretenden Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen, können diese grundsätzlich als eine Kombination auftretender Schädigungs- und Versagensmechanismen der rein blech- und rein kervenbasierten Versuchstypologien in Form einer Lochleibung der Strukturhölzer (Schädigungsmechanismus LH) bzw. einer Plastifizierung der darin vernagelten ballistischen Glattschaftnägel (Schädigungsmechanismus PN), sowie eines Schubversagens des Betons im Ansatz der Kervenflanke (Versagensmechanismus SBK) beschrieben werden, wobei die genannten Schädigungsmechanismen als hierbei jeweils repräsentativ für die rein blechbasierte Versuchsreihe KuPu-BI bezeichnet werden können und der dabei beschriebene Versagensmechanismus als kontextuell maßgeblich für die rein kervenbasierte Versuchsreihe KuPu-Ke beschrieben werden kann. Diese Charakteristiken stellen sich hierbei als grundsätzlich äquivalent im Vergleich zu jenen aus den experimentellen Beobachtungen dar, mithilfe der vorliegenden numerischen Modellbildung können diese Prozesse aber wiederum in explizit detaillierter Form beschrieben werden, wie demgemäß folglich auch aus Abb. 5.31 bis Abb. 5.33 ersichtlich wird. In diesem Sinne zeigt die vorliegende kombiniert ausgeführte, blech- und kervenbasierte Versuchstypologie im allgemeinen Anfangsstadium bzw. auch im Bereich einer weiters zunehmenden Last F ebenso zunehmende elastische Deformationen der Verbundkomponenten Holz und Beton, sowie auch der dabei applizierten ballistischen Glattschaftnägel, entsprechend dieser genannten elastischen Charakteristik bildet sich in diesem Stadium folglich aber kein plastischer Schädigungs- bzw. Versagensmechanismus aus (siehe Abb. 5.31 (Bildmitte links) bzw. (Bildmitte rechts)).

Erst bei einer demgemäß wesentlich gesteigerten Last F bzw. bei einem folglichen Erreichen der vorhandenen Schubtragfähigkeit F_{vR} kommt es, äquivalent zur Versuchsreihe KuPu-Ke, zur Ausbildung eines entsprechend versagensrelevanten Spannungszustands in der maßgebenden Versagensfläche der Kerne, auf Basis dessen der bereits einleitend erwähnte, plötzlich auftretende, spröde Versagensmechanismus in der Form eines Schubversagens des Betons eintritt (siehe Abb. 5.32 (Bildmitte links)). In diesem Sinne liegt die hierbei auftretende Schubspannung τ_{23} in der genannten Versagensfläche, ident zur Versuchsreihe KuPu-Ke, wiederum im Mittel in einem Bereich zwischen ≈ -4.5 und ≈ -6.5 MPa, sowie definiert sich diese überdies durch vorhandene Spannungsspitzen von bis zu ≈ -12 MPa, wobei diese im Vergleich zur Versuchsreihe KuPu-Ke allerdings nicht im direkten Ansatz der Kervenflanke auftreten, sondern sich konträr dazu über den eigentlichen Flächenbereich der maßgebenden Versagensfläche erstrecken. Ein gegebener Einfluss der vorhandenen Probengeometrie bzw. der dabei definierten Applikation der ballistischen Glattschaftnä-

gel auf die detaillierte Schubspannungsverteilung in der Versagensfläche der Kerne kann auf diesen Eigenschaften basierend darüber hinaus demgemäß schlussfolgernd festgestellt werden. Mit kontextuellem Hinblick auf die in diesem Stadium überdies vorhandene Spannungsverteilung bzw. die dabei auftretenden Deformationen im Interaktionsbereich der Verbundkomponente Holz und der ballistischen Glattschaftnägel können gemäß Abb. 5.32 (Bildmitte rechts) weiterführend auch für diese Strukturkomponenten maßgebende Eigenschaften des gegebenen vorhandenen Trag- und Verformungsverhalten der vorliegenden Versuchsreihe KuPu-BI-Ke abgeleitet werden.

So zeigen sich bis zum Erreichen der Schubtragfähigkeit F_{vR} grundsätzlich die einleitend bereits beschriebenen Schädigungsmechanismen in Form einer Lochleibung der Strukturhölzer sowie einer Plastifizierung der darin vernagelten ballistischen Glattschaftnägel (Schädigungsmechanismen LH bzw. PN), die gegebene Ausprägung dieser Charakteristiken kann gemäß den vorliegenden numerischen Untersuchungsergebnissen allerdings als in diesem Stadium eher gering beschrieben werden. Gemäß den kontextuell gegebenen Zusammenhängen zeigen sich demnach sowohl die applizierten ballistischen Glattschaftnägel als auch die Verbundkomponente Holz in dieser Phase durch nur verhältnismäßig geringe plastische Deformationen (bei einem allerdings bereits vorhandenen Überschreiten der Streckgrenze f_y von $f_y = 600$ MPa der ballistischen Glattschaftnägel) bestimmt, eine maßgebliche Fließgelenkbildung innerhalb der Verbindungsmittel und eine damit einhergehende deutliche plastische Verformung des Nagelbetts (auftretende Lochleibung innerhalb des Nagelbetts) tritt bis zu einem entsprechenden Erreichen der Schubtragfähigkeit F_{vR} schlussfolgernd aber nur in beginnenden Ansätzen auf. Erst nach einem gegebenen Schubversagen des Betons im Ansatz der Kervenflanke (Versagensmechanismus SBK) kommt es folglich zu einer wesentlichen Lastumleitung innerhalb der Gesamtstruktur und somit zu einer, für das eingangs beschriebene Nachbruchverhalten maßgeblichen, Fließgelenkbildung (bei einem gleichzeitig vorhandenen Erreichen der Zugfestigkeit f_u von $f_u = 700$ MPa) innerhalb der ballistischen Glattschaftnägel, als auch zu einem überdies vorhandenen Herausziehen ebendieser (siehe hierzu auch Abb. 5.33 (Bildmitte rechts)). Die beschriebenen kombiniert auftretenden Schädigungsmechanismen in der Form einer Lochleibung der Strukturhölzer sowie einer Plastifizierung der darin vernagelten ballistischen Glattschaftnägel (Schädigungsmechanismen LH bzw. PN) liegen demnach grundsätzlich bereits vor dem Auftreten des maßgeblichen Versagensmechanismus in der Form eines Schubversagens des Betons im Ansatz der Kervenflanke (Versagensmechanismus SBK) vor, finden ihre wesentliche Ausprägung überdies schlussfolgernd aber erst nach dem Auftreten des genannten Versagensmechanismus wieder, die genannten Charakteristiken können demnach abschließend als hauptsächlich maßgeblich für das gegebene Nachbruchverhalten der vorliegenden Versuchsreihe KuPu-BI-Ke beschrieben werden.

Resümierend zusammengefasst definiert sich das numerisch abgeleitete Trag- und Verformungsverhalten der kombiniert ausgeführten, blech- und kervenbasierten Versuchstypologie demnach durch eine schlussfolgernd ebenso kombiniert auftretende Form von vorhandenen Schädigungs- und Versagensmechanismen, wobei die dabei applizierten divergenten Schubverbindersysteme in einerseits der Form der Kerven sowie andererseits der ballistisch vernagelten Puzzle Strip Schubleche dabei grundsätzlich auch demgemäß entsprechend unterschiedliche Anteilsmäßigkeiten am vorhandenen Bruchverhalten aufweisen. Während sich der explizit gegebene Versagensmechanismus in Form des Schubversagens des Betons

im Ansatz der Kervenflanke (Versagensmechanismus SBK, charakteristisch für das Schubverbindersystem in Form der Kerven) in diesem Sinne demnach als wesentlich für das grundsätzliche Hauptbruchverhalten darstellt, zeigen sich die überdies vorhandenen auftretenden Schädigungsmechanismen in Form einer Lochleibung der Strukturhölzer bzw. einer Plastifizierung der darin vernagelten ballistischen Glattschaftsnägel (Schädigungsmechanismen LH bzw. PN, charakteristisch für das Schubverbindersystem in Form der ballistisch vernagelten Puzzle Strip Schubleche) demgegenüber als maßgeblich für das explizite Nachbruchverhalten der vorliegenden Versuchstypologie, ein demgemäß interagierendes Strukturverhalten innerhalb der kombiniert ausgeführten, blech- und kervenbasierten Versuchsreihe KuPu-BI-Ke kann, wie auch bereits aus den experimentellen Untersuchungen zu erkennen, abschließend auch auf numerischer Basis dementsprechend abgeleitet werden.

5.5.2 Numerische Untersuchungen an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern

Der kontextuelle Umfang der numerischen Untersuchungen an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern beinhaltet, wie auch bereits einleitend erwähnt, grundsätzlich alle simulationsbasierten Forschungsinhalte mit Bezug auf die drei großmaßstäblichen Versuchstypologien Blech, Kerne und Blech-Kerne in Form der hierbei maßgebenden Versuchsreihen KuTr-BI, KuTr-Ke und KuTr-BI-Ke. In diesem Sinne werden hierbei zweidimensionale bzw. pseudo-dreidimensionale numerische Modelle der genannten Versuchsreihen entwickelt, in einem kontinuumsmechanischen Kontext mittels des Programmpaketes **Abaqus FEA** weiterführend ausgewertet und auf dieser Basis gründend folglich abschließend analysiert und bewertet. Mit Bezug auf den innerhalb dieser Simulationen angewendeten Detaillierungsgrad, kann dieser unter der Berücksichtigung der vorhandenen genannten zweidimensionalen bzw. pseudo-dreidimensionalen Modellbildung als grundsätzlich mittel bis hoch bezeichnet werden, die gegebenen numerischen Modelle zielen allerdings, anders als bei den numerischen Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern, schlussfolgernd jedoch auf eine nur teilweise vorhandene explizite detailgetreue Modellierung (gleichwohl aber inklusive allfälliger detailgetreuer Materialmodelle) aller einzelnen Teilkomponenten der jeweiligen Proben ab. Anstelle dessen sollen hierbei konträr zu den numerischen Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern demgegenüber konzeptionell entsprechend vereinfachte Strukturmodelle für eine demgemäß möglichst effiziente Modellbildung zur Anwendung kommen, wie im näheren Detail auch nachfolgend aus *Kapitel 5.5.2.1* entnommen werden kann.

5.5.2.1 Struktureigenschaften und Aufbau der Simulationsmodelle

Die vorliegenden Simulationsmodelle der Versuchsreihen KuTr-BI, KuTr-Ke und KuTr-BI-Ke definieren sich grundsätzlich, wie auch bereits einleitend erwähnt, durch eine zweidimensionale bzw. pseudo-dreidimensionale Modellbildung basierend auf entsprechenden flächen- bzw. linienförmigen einzelnen Teilkomponenten, wobei ebendiesen entsprechend der jeweils vorhandenen Ausführung demgemäße dimensionsabhängige strukturelle Eigenschaften zugewiesen werden. In diesem Sinne charakterisieren sich die jeweiligen numerischen Modelle durch dementsprechende Bauteilgruppen mit strukturell jeweils unterschiedlichen Assemblierungs- und Materialeigenschaften, wie überblicksmäßig auch

aus nachfolgender Abb. 5.34 entnommen werden kann. Angemerkt sei im kontextuell vorliegenden Zusammenhang hierbei außerdem, dass sich die Simulationsmodelle der drei strukturell generell variierenden Versuchsreihen KuTr-BI, KuTr-Ke und KuTr-BI-Ke durch einen qualitativ allerdings grundsätzlich sinnverwandten Aufbau definieren, aus Gründen einer möglichst übersichtlichen Darstellung soll in nachfolgender Abb. 5.34 demnach auch nur einen Überblick zur Modellbildung der kombiniert ausgeführten, blech- und kernenbasierten Versuchsreihe KuTr-BI-Ke gegeben werden.

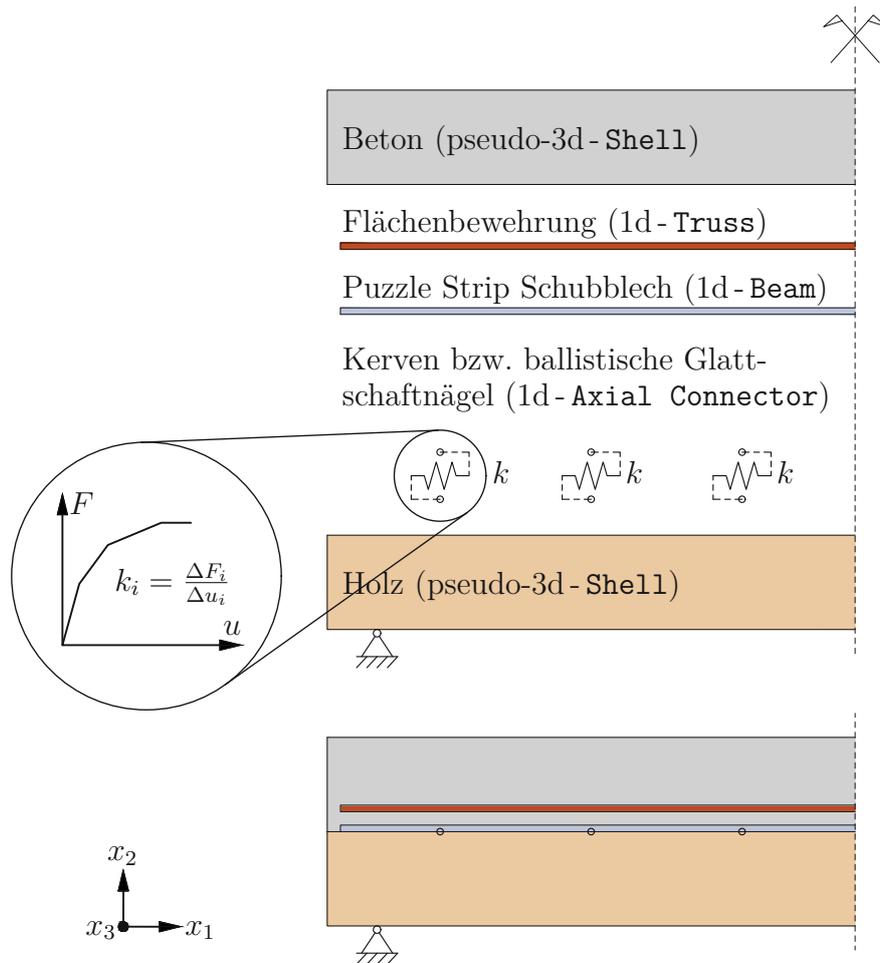


Abb. 5.34: Überblick zur numerischen Modellbildung der großmaßstäblichen Verbundprobekörper | Versuchsreihe KuTr-BI-Ke | konzeptionelle Systemdarstellung explosionsartig (oben), konzeptionelle Systemdarstellung assembliert (unten)

Wie aus dargestellter Abb. 5.34 ersichtlich wird, definiert sich die gegebene Versuchsreihe KuTr-BI-Ke, bzw. charakterisieren sich im weiteren Sinne ebenso die Versuchsreihen KuTr-BI und KuTr-Ke, auf Basis einer flächenförmigen, in der x_1x_2 -Ebene situierten, zweidimensionalen bzw. pseudo-dreidimensionalen generellen Tragstruktur (Verbundkomponenten Holz und Beton) in dabei jeweils vorhandener Verbindung mit entsprechenden additiven linienförmigen eindimensionalen, in x_1 -Richtung ausgerichteten, Modellkompo-

nenten (Puzzle Strip Schublech, Flächenbewehrung und Schubverbinder in Form der Kerven bzw. der ballistischen Glattschaftnägel). Betrachtet man die im vorliegenden Zusammenhang genannten flächen- bzw. linienförmigen Charakteristiken der einzelnen gegebenen Strukturelemente hierbei weiterführend im näheren Detail, können diese auf Basis ihrer jeweiligen strukturellen Eigenschaften demgemäß explizit beschrieben werden. In diesem Sinne definiert sich die genannte pseudo-dreidimensionale Modellbildung der Verbundkomponenten Holz und Beton durch grundsätzlich zweidimensionale Flächenelemente (vorliegende Ausdehnung in der x_1x_2 -Ebene), welche normal zu ihrer Ebene aber eine zusätzliche Längenausdehnung (vorliegende Ausdehnung in x_3 -Richtung) besitzen (Abaqus FEA Element Shell), auf Basis derer schlussfolgernd eine adäquate numerische Abbildung der realen beschriebenen Strukturkomponenten erreicht werden kann.

Mit weiters vorliegendem Hinblick auf die eindimensionale Modellbildung der demgemäß vorhandenen Modellkomponenten in Form des Puzzle Strip Schublechs, sowie der applizierten Flächenbewehrung definiert sich diese grundsätzlich auf den explizit vorhandenen strukturcharakteristischen Eigenschaften ebendieser. In diesem Sinne kennzeichnet sich das kontextuell gegebene Puzzle Strip Schublech als eindimensionaler Biegestab (mit der Biegesteifigkeit EI , Ausdehnung in x_1 -Richtung, Abaqus FEA Element Beam) und stellt sich die demgemäß vorhandene Flächenbewehrung als eindimensionaler Fachwerksstab (mit der Dehnsteifigkeit EA , Ausdehnung in x_1 -Richtung, Abaqus FEA Element Truss) dar. Mit darüber hinaus vorliegendem Bezug auf die eindimensionale Modellbildung der überdies gegebenen Strukturkomponenten in Form der jeweiligen Schubverbinder (Kerven bzw. ballistische Glattschaftnägel) können diese kontextuell generell als entsprechende nicht-lineare Federelemente beschrieben werden (Ausdehnungen in x_1 -Richtung, Abaqus FEA Elemente Axial Connector), wobei diese im Vergleich zu den anderen genannten Strukturkomponenten dabei überdies allerdings nicht nur modellbildenden Charakter aufweisen sondern sich vielmehr ebenso auch als entsprechende Assemblierungs- bzw. Kontaktelemente der maßgebenden Verbundkomponenten Holz und Beton darstellen. Hinsichtlich einer genaueren Beschreibung dieser Elemente darf demnach schlussfolgernd auch auf die nachfolgenden Inhalte zu den jeweiligen Assemblierungs- bzw. Kontaktbedingungen zwischen den einzelnen Modellkomponenten verwiesen werden.

Mit dementsprechend weiterführendem Bezug auf diese genannten Assemblierungs- bzw. Kontaktbedingungen zwischen den jeweiligen Strukturkomponenten lassen sich diese im Allgemeinen auf Basis einer generell separierten Gliederung für einerseits jene zwischen dem Beton und den in diesem situierten Strukturelementen (Puzzle Strip Schublech bzw. Flächenbewehrung), sowie für andererseits ebendiese zwischen den maßgeblichen Verbundkomponenten Holz und Beton selbst (Schubverbinder in Form der Kerven bzw. der ballistischen Glattschaftnägel) darstellen. Mit überdies vorhandenem Bezug auf das generelle Vorhandensein etwaiger Kontaktbedingungen zwischen den einzelnen Modellkomponenten lassen sich diese im allgemeinen Sinne als grundsätzlich dementsprechend variantenabhängig bezeichnen, gemäß den gegebenen Ausführungseigenschaften der unterschiedlichen Versuchstypologien liegen demnach einerseits für die Versuchsreihen KuTr-BI und KuTr-BI-Ke schlussfolgernd entsprechende Kontaktbedingungen zwischen dem Beton und dem Puzzle Strip Schublech bzw. der Flächenbewehrung vor und stellt sich die Versuchsreihe KuTr-Ke überdies durch eine einzelne demgemäße Kontaktbedingung zwischen den Modellkomponenten Beton und Flächenbewehrung dar, sowie definieren

sich andererseits die Versuchsreihen KuTr-BI und KuTr-Ke überdies durch entsprechende einzelne Kontaktbedingungen zwischen den Verbundkomponenten Holz und Beton (ballistische Glattschaftnägel oder Kerven), und zeigt sich die Versuchsreihe KuTr-BI-Ke darüber hinaus ebenso durch eine demgemäß kombinierte Applikation dieser einzelnen genannten Kontaktbedingungen bestimmt. Betrachtet man diese besagten Kontaktbedingungen weiterführend im genaueren Detail, können die dabei jeweils vorhandenen strukturellen bzw. konzeptionellen Eigenschaften der beschriebenen Kopplungsbereiche näher beleuchtet werden. In diesem Sinne bauen die vorliegenden Kontaktbedingungen zwischen dem Beton und den in diesem situierten Strukturelementen (Puzzle Strip Schublech bzw. Flächenbewehrung) grundsätzlich auf Basis von demgemäß vorhandenen Bettungscharakteristiken auf (Abaqus FEA Eigenschaft **Embedded region**), der Verbund zwischen dem Beton und den darin applizierten, numerisch linienförmig abgebildeten, Modellkomponenten stellt sich demnach weiterführend als generell entsprechend kontinuierlich, und folglich darüber hinaus auch als jeweils über die gesamte Längenausdehnung der einzelnen Strukturelemente gegeben, dar, eine demgemäß realitätsnahe Abbildung der Verbundverhältnisse innerhalb der Betonstruktur wird auf Grundlage dieser Annahmen schlussfolgernd möglich.

Mit überdies vorhandenem Bezug auf die vorliegenden Kontaktbedingungen zwischen den Verbundkomponenten Holz und Beton definieren sich diese, wie dementsprechend auch bereits einleitend beschrieben, auf Basis der numerischen Abbildung der jeweils versuchsreihenspezifisch dabei gegebenen Schubverbinder (ballistische Glattschaftnägel für die rein blechbasierte Versuchsreihe KuTr-BI, Kerven für die rein kervenbasierte Versuchsreihe KuTr-Ke sowie eine Kombination aus beiden für die kombiniert ausgeführte, blech- und kervenbasierte Versuchsreihe KuTr-BI-Ke), wobei diese genannte numerische Abbildung hierbei, wie ebenfalls bereits einleitend erwähnt, generell auf Basis von nicht-linearen Federelementen erfolgt. Entsprechend diesen gegebenen Zusammenhängen können die charakteristischen Eigenschaften der genannten Federelemente nachfolgend demgemäß im genaueren Detail beschrieben werden. In diesem Sinne wird das bereits in *Kapitel 5.3* abgeleitete charakteristische Last-Verschiebungs-Verhalten der rein blech- bzw. rein kervenbasierten Versuchsreihen KuPu-BI und KuPu-Ke, jeweils repräsentativ für einerseits die gegebenen ballistischen Glattschaftnägel sowie für andererseits auch die kontextuell vorliegenden Kerven, als Grundlage für die resultierenden Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der nicht-linearen Federelemente herangezogen und werden diese auf Basis ebendieser folglich entsprechend abgebildet. Im weiteren Detail basiert diese Abbildung hierbei auf Grundlage von inkrementellen multi-linearen Last-Verschiebungs-Zusammenhängen mit ausgeprägter Schubtragfähigkeit F_{vR} bei einer maximalen Grenzverschiebung u_u , und definiert sich diese somit weiterführend entsprechend auf Basis von grundsätzlich vollständig degressiv ausgebildeten Last-Verschiebungs-Zusammenhängen ohne überdies vorhandene jeweilige Nachbruchcharakteristik (für in diesem Sinne hierbei explizit gegebene quantitative Zusammenhänge siehe weiterführend demgemäß auch *Anhang C*).

Mit weiterem Bezug auf die verwendeten Materialmodelle innerhalb der vorliegenden numerischen Modellierung der großmaßstäblichen Versuchsreihen können diese darüber hinaus im Allgemeinen, äquivalent zur gegebenen Modellbildung der kleinmaßstäblichen Versuchsreihen gemäß *Kapitel 5.5.1.1*, als entsprechend werkstoffspezifisch und demgemäß als jeweils individuell im Kontext richtungs- und verformungsabhängiger Eigenschaften beschrieben werden. Überdies hinweg orientieren sich die implementierten Materialmodelle

der vorliegenden Modellbildung ebenso vollständig an jenen der numerischen Untersuchungen an den kleinmaßstäblichen Versuchsreihen, in diesem Sinne darf mit Bezug auf eine detaillierte Beschreibung der kontextuell vorhandenen Materialmodelle grundsätzlich auch dementsprechend auf die Inhalte aus *Kapitel 5.5.1.1* verwiesen werden bzw. soll im Nachfolgenden demgemäß nur eine entsprechende Beschreibung von nicht bereits in *Kapitel 5.5.1.1* beinhalteten Zusammenhängen erfolgen. Zusätzlich sei in diesem Kontext darüber hinaus ebenso abermalig erwähnt, dass hierbei wiederum nur eine überblicksmäßige Darstellung der jeweiligen Modelleigenschaften erfolgt und demgemäß explizit genauere Details zu den einzelnen Materialmodellen weiterführend aus *Anhang C* entnommen werden können, als die genannten Modellkonfigurationen sich durch grundsätzlich eine Vielzahl an einzelnen Materialparametern definieren.

Mit dahin gehendem Bezug kann als noch nicht bereits in *Kapitel 5.5.1.1* beschriebene Modellkonfiguration das Materialmodell der applizierten Flächenbewehrung genannt werden. Dieses zeichnet sich im vorliegenden Zusammenhang durch ein entsprechend isotropes elastisch-plastisches Materialmodell aus, wobei das dabei gegebene elastische bzw. plastische Materialverhalten im näheren Detail anhand von multi-linearen Spannungs-Dehnungs-Zusammenhängen abgebildet wird. Unter der weiteren Berücksichtigung dieser beschriebenen Eigenschaften bzw. Zuordnungen ist eine vollumfassende Definition der angestrebten numerischen Modellbildungen folglich möglich, eine demgemäße Darstellung der aus diesem Kontext heraus resultierenden Untersuchungsergebnisse der maßgebenden Versuchsreihen KuTr-Bl, KuTr-Ke und KuTr-Bl-Ke kann demnach schlussfolgernd gemäß nachfolgendem *Kapitel 5.5.2.2* erfolgen.

5.5.2.2 Darstellung und Interpretation der numerischen Untersuchungsergebnisse

Mit Bezug auf eine allgemeine verifizierende Darstellung der Untersuchungsergebnisse der numerischen Modellbildungen im Vergleich zu den experimentell generierten Versuchsergebnissen sollen im weiterführend vorliegenden Kontext, konzeptionell äquivalent zur Ergebnisdarstellung der Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern gemäß *Kapitel 5.5.1.2*, demgemäß die resultierenden Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der einzelnen Versuchsreihen KuTr-Bl, KuTr-Ke und KuTr-Bl-Ke betrachtet werden, wie dementsprechend auch aus gegenständlicher Abb. 5.35 ersichtlich wird. Gemäß den in der genannten Abbildung dargestellten Zusammenhängen lassen sich die Untersuchungsergebnisse der numerischen Modellbildungen im allgemeinen Sinne weiterführend als grundsätzlich vollständig repräsentativ für alle drei maßgebenden blech- bzw. kervenbasierten Versuchsreihen bezeichnen. Entsprechend dieser gegebenen Charakteristik stellen sich die vorhandenen numerisch generierten Last-Verschiebungs-Zusammenhänge als demgemäß realitätsnah dar, ein weiterführender simulations-, sowie auch verifikationsbasierter, Einblick in die strukturmechanischen Gegebenheiten der einzelnen Versuchstypologien Blech, Kerne und Blech-Kerne wird auf Basis der vorliegenden numerischen Modelle demnach folglich möglich.

Betrachtet man im weiteren Zusammenhang demnach das Trag- und Verformungsverhalten der untersuchungsrelevanten Versuchsreihen KuTr-Bl, KuTr-Ke und KuTr-Bl-Ke in kumulierter Form, lässt sich dieses, trotz dem generellen Vorhandensein jeweils varianten-

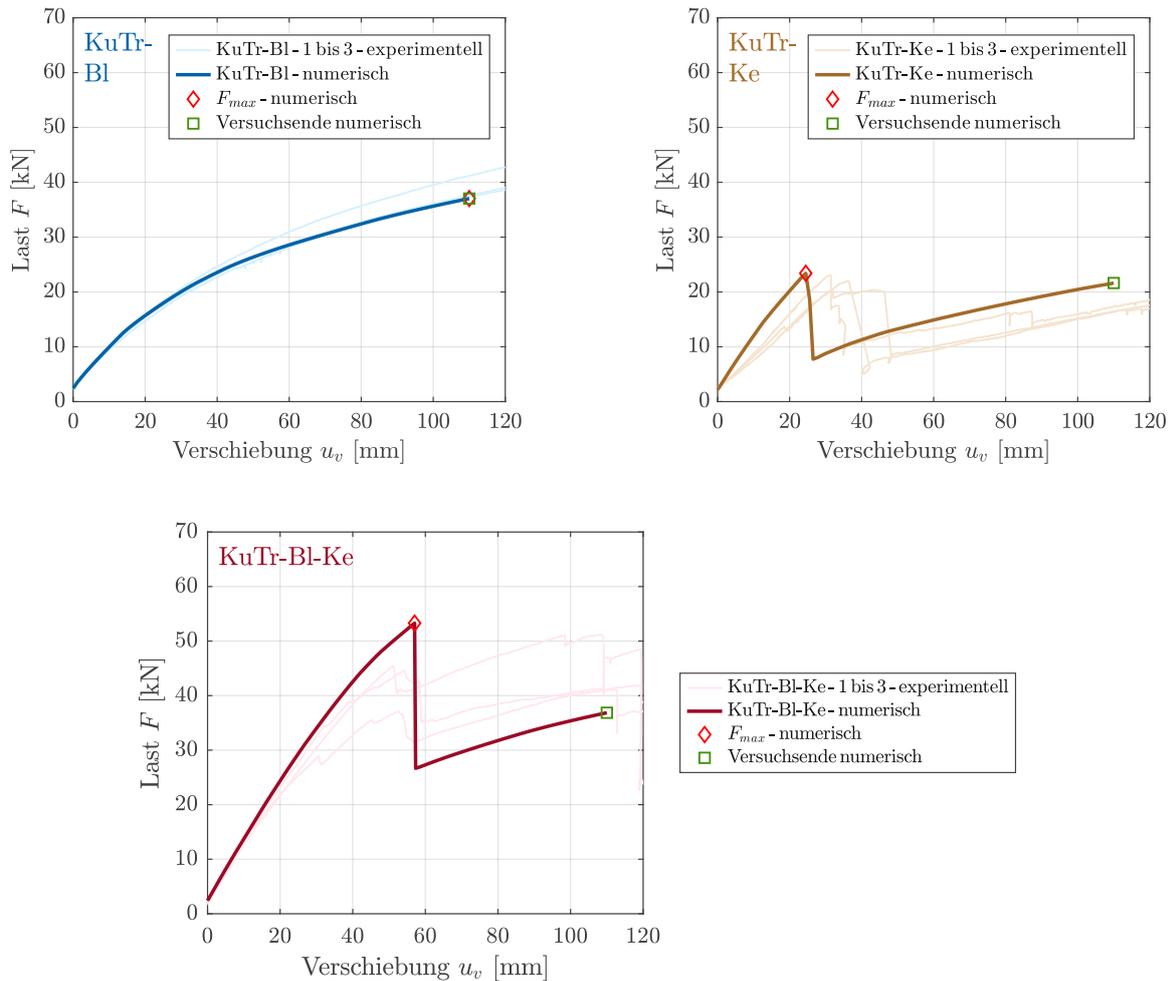


Abb. 5.35: Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der numerischen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe KuTr-BI (oben links), Versuchsreihe KuTr-Ke (oben rechts), Versuchsreihe KuTr-BI-Ke (unten)

abhängiger Last-Verschiebungs-Zusammenhänge, als für alle einzelnen Versuchstypologien konzeptionell grundsätzlich äquivalent beschreiben. In diesem Sinne stellt sich dieses, neben allgemeinen strukturmechanischen Eigenschaften der einzelnen Modellkomponenten, als maßgeblich durch die vorhandenen Kontaktbedingungen zwischen den einzelnen Verbundkomponenten Holz und Beton beeinflusst dar. Im weiteren Sinne kann schlussfolgernd der jeweils gegebene Verschiebungszustand der einzelnen variantenabhängig definierten mult-linearen Federelemente als wesentlichste Einflussgröße auf das resultierende Last-Verschiebungs-Verhalten sowie auf die damit verbundenen maßgeblichen Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen der jeweiligen Versuchsreihen verstanden werden, weshalb der weiterführende Fokus auch auf ebendiese Strukturcharakteristiken gerichtet sein soll. Als Basis für diese Betrachtungen dürfen zuerst aber die genannten allgemeinen strukturmechanischen Eigenschaften der einzelnen Modellkomponenten genauer beleuchtet werden. Die in diesem Sinne aus den numerischen Untersuchungen weiterführend abgeleiteten kontextuellen Charakteristiken stellen sich hierbei, soweit beurteilbar, als grundsätzlich

äquivalent im Vergleich zu jenen aus den experimentellen Untersuchungen gemäß *Kapitel 5.4* dar, auf Basis der vorliegenden numerischen Modellbildungen können diese Prozesse aber zusätzlich wiederum in maßgeblich detaillierterer Form beschrieben werden, wie nachfolgend auch aus gegebenen Abbildungen Abb. 5.36 bis Abb. 5.39 ersichtlich wird. Zusätzlich erwähnt sei in diesem Zusammenhang hierbei abermalig, dass die betrachteten allgemeinen strukturmechanischen Charakteristiken für alle untersuchungsrelevanten Versuchsreihen in grundsätzlich ähnlicher Form vorliegen, im Sinne einer möglichst übersichtlichen Ergebnisdarstellung beinhalten die vorliegenden Abbildungen Abb. 5.36 bis Abb. 5.39 demnach auch nur entsprechende Zusammenhänge der Versuchsreihe KuTr-BI, welche gemäß den beschriebenen Systemeigenschaften aber als für alle Versuchstypologien repräsentativ verstanden werden können.

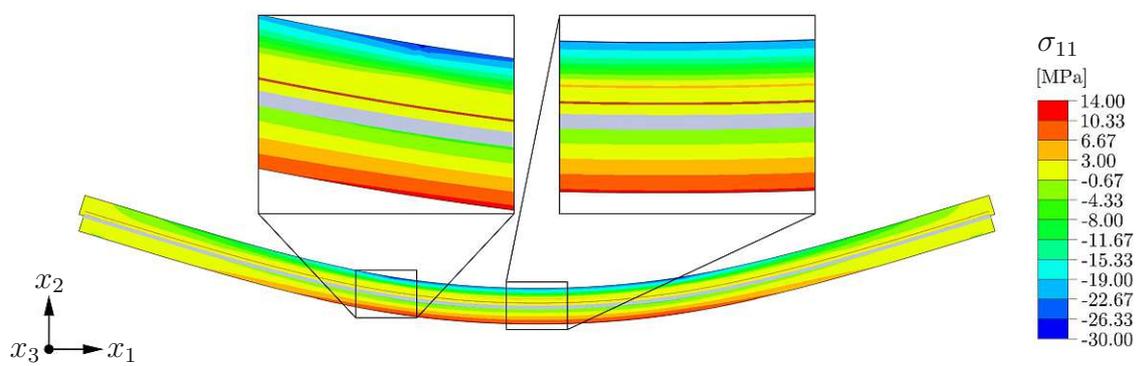


Abb. 5.36: Untersuchungsergebnisse der numerischen Modellbildung der großmaßstäblichen Verbundprobekörper | Versuchsreihe KuTr-BI | Normalspannung σ_{11} in den Verbundkomponenten Holz und Beton im Bereich geringer bis mittlerer vertikaler Verschiebungen u_v

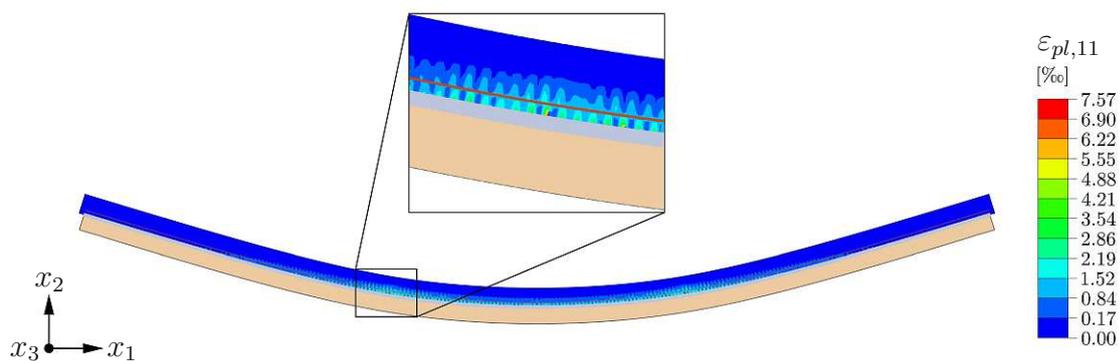


Abb. 5.37: Untersuchungsergebnisse der numerischen Modellbildung der großmaßstäblichen Verbundprobekörper | Versuchsreihe KuTr-BI | plastische Dehnung $\epsilon_{pl,11}$ in der Verbundkomponente Beton im Bereich hoher bis höchster vertikaler Verschiebungen u_v

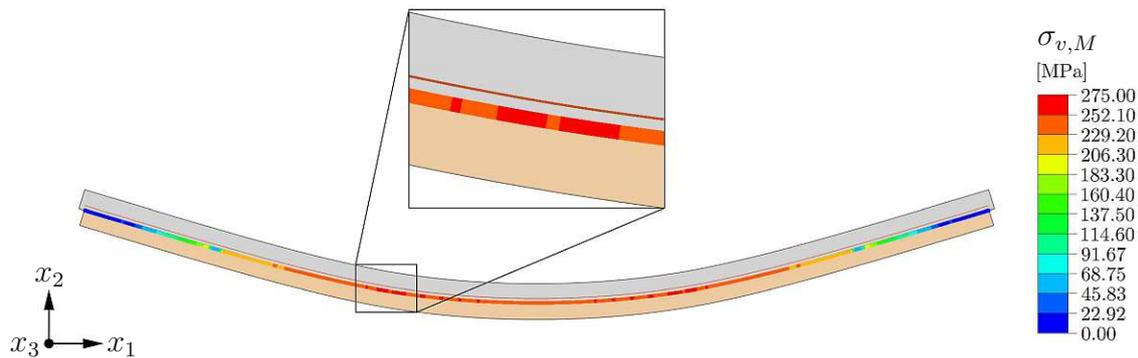


Abb. 5.38: Untersuchungsergebnisse der numerischen Modellbildung der großmaßstäblichen Verbundprobekörper | Versuchsreihe KuTr-BI | von Mises Vergleichsspannung $\sigma_{v,M}$ im Puzzle Strip Schubblech nach Überschreiten der Streckgrenze f_y im Bereich hoher bis höchster vertikaler Verschiebungen u_v

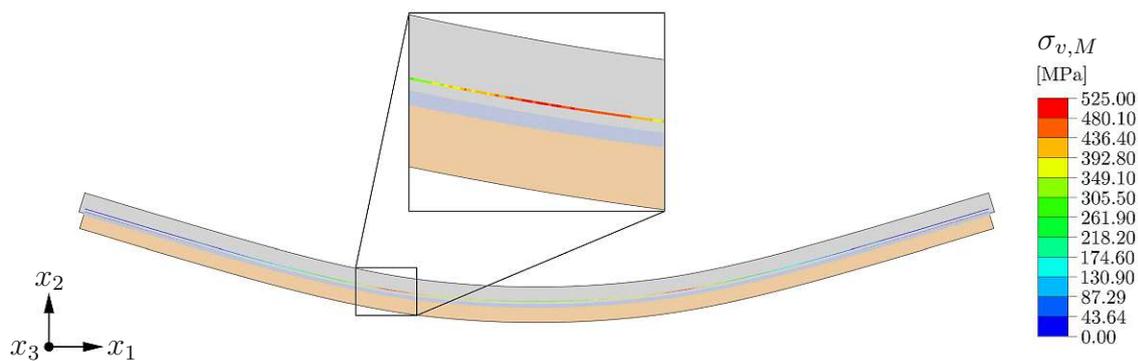


Abb. 5.39: Untersuchungsergebnisse der numerischen Modellbildung der großmaßstäblichen Verbundprobekörper | Versuchsreihe KuTr-BI | von Mises Vergleichsspannung $\sigma_{v,M}$ in der Flächenbewehrung bei Erreichen der Zugfestigkeit f_u im Bereich hoher bis höchster vertikaler Verschiebungen u_v

Wie aus den gegebenen Abbildungen Abb. 5.36 bis Abb. 5.39 ersichtlich wird, definieren sich die strukturmechanischen Eigenschaften der für die unterschiedlichen Versuchstypologien jeweils maßgebenden Modellkomponenten durch grundsätzlich für großmaßstäbliche Verbundträgerkonstruktionen charakteristische bzw. ebenso erwartbare Eigenschaften. In diesem Sinne bilden sich in Abhängigkeit des jeweilig gegebenen Belastungs- bzw. Verschiebungszustands entsprechende zug- und druckbasierte Spannungszustände (Normalspannung σ_{11} gemäß Abb. 5.36) in den Verbundkomponenten Holz und Beton aus, und treten überdies ebenso demgemäße last- bzw. verschiebungsabhängige zugbasierte Spannungszustände (von Mises Vergleichsspannung $\sigma_{v,M}$ gemäß Abb. 5.38 und Abb. 5.39) in den applizierten metallischen Stabstrukturen (Puzzle Strip Schubblech bzw. Flächenbewehrung) auf. Betrachtet man diese allgemeinen Zusammenhänge weiterführend mit näherem Hinblick, können darüber hinaus ebenso entsprechend nähere Details zu den

genannten vorliegenden Charakteristiken der jeweiligen Modellkomponenten abgeleitet werden. Bewertet man in diesem Zusammenhang die auftretenden Normalspannungen σ_{11} in den gegebenen Verbundkomponenten Holz und Beton, kann deren quantitative Ausprägung, neben den vorhandenen variantenabhängigen Kontaktbedingungen zwischen ebendiesen, als vor allem abhängig von jeweiliger geometrischer Lage und dabei gegebenen Materialeigenschaften beschrieben werden. Wie demgemäß aus Abb. 5.36 ersichtlich wird, bzw. wie auch bereits einleitend ausgeführt, definieren sich beide Verbundkomponenten Holz und Beton hierbei durch generell sowohl zug- als auch druckbasiert auftretende Normalspannungen σ_{11} , deren dabei gegebene jeweilige kontextuelle Quantität sich bei näherem Hinblick überdies allerdings wesentlich in Abhängigkeit der jeweils betrachteten Modellkomponente darstellt.

In diesem Sinne zeigen sich die für die untersuchten großmaßstäblichen Verbundstrukturen maßgeblichen Druckspannungsmaxima ($\sigma_{11,min}$) grundsätzlich an der Oberseite der Verbundkomponente Beton, und bilden sich konträr dazu die demgemäßen Zugspannungsmaxima ($\sigma_{11,max}$) generell an der Unterseite der Verbundkomponente Holz aus, wobei die dabei kontextuell jeweils gegebene Lage dieser genannten Spannungsmaxima bzw. -minima sich darüber hinaus im Allgemeinen auf das jeweilige mittlere Felddrittel der vorliegenden Versuchstypologien konzentriert. Im weiteren Detail treten diese dabei grundsätzlich in Feldmitte der Tragstrukturen auf, bilden sich aufgrund der explizit punktförmig modellierten Lasteinleitung der aufgetragenen Last F überdies in qualitativ äquivalenter Form aber ebenso in den jeweiligen Felddritteln bzw. in den Bereichen der Lasteinleitungspunkte aus. Betrachtet man die beiden beschriebenen Verbundkomponenten darüber hinaus gleichermaßen mit Hinblick auf etwaig weiters vorhandene systemcharakteristische Strukturmechanismen, können neben den allgemeinen Normalspannungsverteilungen zusätzliche, mit zunehmender vertikaler Verschiebung u_v steigende, plastische Dehnungskonzentrationen (plastische Dehnung $\varepsilon_{pl,11}$ gemäß Abb. 5.37) im mittleren Felddrittel der Verbundkomponente Beton festgestellt werden. Diese bilden sich hierbei ausschließlich an der zugbeanspruchten Unterkante bzw. in den entsprechend umliegenden Bereichen der genannten Verbundkomponente aus, wobei die dabei vorhandenen expliziten Dehnungsmaxima hierbei in den jeweiligen Felddritteln bzw. in den Bereichen der Lasteinleitungspunkte aufzufinden sind. Im weiteren Kontext kann deren Auftreten, neben den aus den variantenabhängig definierten Kontaktbedingungen resultierenden maßgeblichen Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen, demnach folglich als überdies hinaus vorhandener charakteristischer Schädigungsmechanismus an der Verbundkomponente Beton interpretiert werden, als dieses gegebene Charakteristikum bei den experimentellen Untersuchungen gemäß Kapitel 5.4 in ebenso gleicher Form (demgemäß repräsentativ vorhandener Schädigungsmechanismus in Form von fortschreitend auftretenden, partiellen Rissbildungen in der Betonzugzone, Schädigungsmechanismus RB) festzustellen ist.

Mit darüber hinaus vorliegendem Bezug auf die vorhandenen Strukturmechanismen in den applizierten metallischen Modellkomponenten (Puzzle Strip Schublech bzw. Flächenbewehrung), lassen sich auch diese, wie gleichermaßen bereits einleitend erwähnt, als grundsätzlich charakteristisch für die einzelnen gegebenen großmaßstäblichen Verbundträgerkonstruktionen beschreiben, deren jeweilige konzeptionelle Ausgestaltung stellt sich weiterführend aber ebenso als generell entsprechend variantenabhängig dar (die Versuchsreihen KuTr-BI und KuTr-BI-Ke beinhalten demgemäß beide angeführten Modellkomponenten während

sich die Versuchsreihe KuTr-Ke lediglich durch eine einzelne Strukturkomponente in Form der applizierten Flächenbewehrung auszeichnet). Auf Basis dieser genannten Eigenschaften kann eine folglich gemeinsame Beschreibung der strukturmechanischen Charakteristiken dieser Modellkomponenten zwar grundsätzlich stattfinden, eine direkte Interaktion ebendieser liegt im Allgemeinen aber schlussfolgernd nicht bei allen numerisch abgebildeten Versuchsreihen vor.

Betrachtet man das Strukturverhalten der beschriebenen Modellkomponenten demgemäß weiterführend im näheren Detail, zeichnen sich hierbei, wie auch bereits einleitend beschrieben, jeweils beide Strukturelemente durch entsprechend last- bzw. verschiebungsabhängige, generell zugbasierte Spannungszustände (von Mises Vergleichsspannung $\sigma_{v,M}$ gemäß Abb. 5.38 bzw. Abb. 5.39) aus, weisen in ihrer jeweiligen vorliegenden Quantität dabei überdies aber grundsätzlich unterschiedliche Ausprägungsformen auf, wie im Allgemeinen auch bereits a priori aus den gegebenen komponentenabhängig variierenden Materialeigenschaften der einzelnen Strukturelemente geschlussfolgert werden kann. In diesem Sinne zeigen sich zwar beide Modellkomponenten durch gewisse, demgemäß last- bzw. verschiebungsabhängige, elastische und plastische Deformationszustände bestimmt, erreichen ebendiese plastischen weiterführend folglich aber bei generell unterschiedlichen Verschiebungszuständen der jeweiligen Tragstrukturen bzw. bilden ebendiese darüber hinaus ebenso in unterschiedlicher Quantität (auftretende Verfestigungs- bzw. Fließzustände) aus (jeweils maßgebende Lage der dabei auftretenden Spannungs- bzw. Deformationsmaxima wiederum in den expliziten Felddritteln bzw. in den Bereichen der Lasteinleitungspunkte). Mit demgemäß näheren Hinblick auf die gegebenen Spannungs- bzw. Deformationszustände des Puzzle Strip Schublechs lassen sich diese im Vergleich zu jenen der applizierten Flächenbewehrung folglich als bei bereits wesentlich geringeren Verschiebungszuständen der jeweiligen Tragstrukturen maßgebend beschreiben, sowie können ebendiese darüber hinaus gleichermaßen als in quantitativ deutlich geringerem Maße ausgeprägt bezeichnet werden. So charakterisiert sich die genannte Modellkomponente durch ein bereits bei mittleren vertikalen Verschiebungen u_v auftretendes Erreichen der Streckgrenze f_y ($f_y = 212.5$ MPa), zeichnet sich bei darüber hinaus zunehmenden vertikalen Verschiebungen u_v konträr dazu aber nicht durch ein überdies vorhandenes Erreichen der Zugfestigkeit f_u ($f_u = 330$ MPa) aus. Das gegebene Puzzle Strip Schublech definiert sich demnach durch eine entsprechend vorhandene Verfestigung der Strukturkomponente im Bereich mittlerer bis höchster vertikaler Verschiebungen u_v , weist überdies hinweg aber schlussfolgernd kein gegebenes zusätzliches Fließverhalten im Bereich hoher bis höchster vertikaler Verschiebungen u_v auf.

Mit überdies hinweg weiterführend gegebenem näheren Hinblick auf die vorhandenen Spannungs- und Deformationszustände der applizierten Flächenbewehrung, lassen sich diese als im vorliegenden Kontext vergleichsweise maßgeblich konträr darstellen, als für diese Modellkomponente sich einerseits ein gleichermaßen gegebenes Verfestigungsverhalten einstellt, andererseits darüber hinaus aber ebenso auch ein demgemäßes Fließverhalten gegeben ist. Die Streckgrenze f_y ($f_y = 500$ MPa), und damit der Beginn des entsprechenden Verfestigungsverhaltens, wird bei dieser Strukturkomponente im Vergleich zu jener in Form des Puzzle Strip Schublechs zwar erst bei komparativ betrachtet wesentlich gesteigerten vertikalen Verschiebungen u_v erreicht, zusätzlich bildet sich im Bereich höchster vertikaler Verschiebungen u_v aber überdies ein ebenso vorhandenes Fließverhalten bei einem Errei-

chen der Zugfestigkeit f_u ($f_u = 525$ MPa) aus. Die gegebene Modellkomponente in Form der applizierten Flächenbewehrung zeigt sich im Vergleich zu ebendieser in Form des Puzzle Strip Schubblechs folglich durch eine entsprechend vollständig gegebene Plastifizierung der Struktur aus, während ebendiese sich im vorliegenden vergleichend betrachteten Puzzle Strip Schubblech grundsätzlich nicht vollständig ausbildet. Eine demgemäße plastische Tragreserve innerhalb des Puzzle Strip Schubblechs kann in komparativer Betrachtung zur applizierten Flächenbewehrung demnach abschließend schlussfolgernd festgehalten werden.

Neben diesen allgemeinen strukturmechanischen Eigenschaften der einzelnen Modellkomponenten stellt sich das numerisch abgeleitete maßgebende Trag- und Verformungsverhalten der untersuchten Versuchstypologien, wie auch bereits einleitend erwähnt, im wesentlichsten Sinn als durch die vorhandenen Kontaktbedingungen zwischen den einzelnen Verbundkomponenten Holz und Beton beeinflusst dar, wobei bei genauerer Definition hierbei der jeweils gegebene lastbezogene Verschiebungszustand der einzelnen variantenabhängig definierten multi-linearen Federelemente als dabei bedeutendste Einflussgröße genannt werden kann. Unter der entsprechenden Berücksichtigung dieser jeweilig gegebenen Verschiebungszustände wird es schlussfolgernd demnach möglich das jeweils vorhandene Trag- und Verformungsverhalten bzw. im näheren Sinne die kontextuell dabei resultierenden Last-Verschiebungs-Zusammenhänge, sowie die hierbei auftretenden Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen der einzelnen Versuchsreihen detailliert zu beschreiben, wie demgemäß auch aus den nachfolgenden Abbildungen Abb. 5.40 bis Abb. 5.42 entnommen werden kann. Angemerkt sei hierzu überdies, dass die dargebrachten Verschiebungszustände in expliziten einzelnen Federelementen natürlich in Abhängigkeit der jeweiligen geometrischen Position entsprechend variieren können und deren Darstellung demnach grundsätzlich lediglich qualitativer, jedoch gleichermaßen repräsentativer, Natur ist.

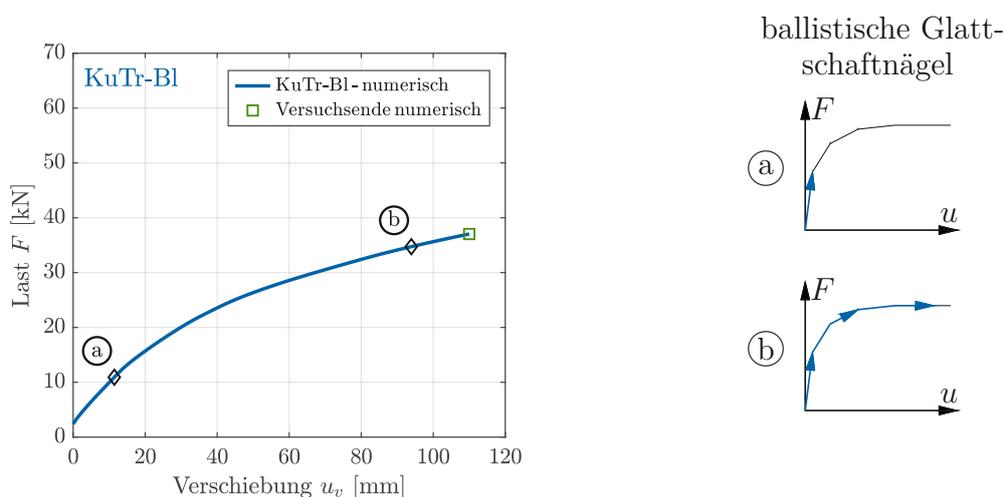


Abb. 5.40: Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der numerischen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe KuTr-BI (links), Verschiebungszustände der zugehörigen multi-linearen Federelemente (rechts)

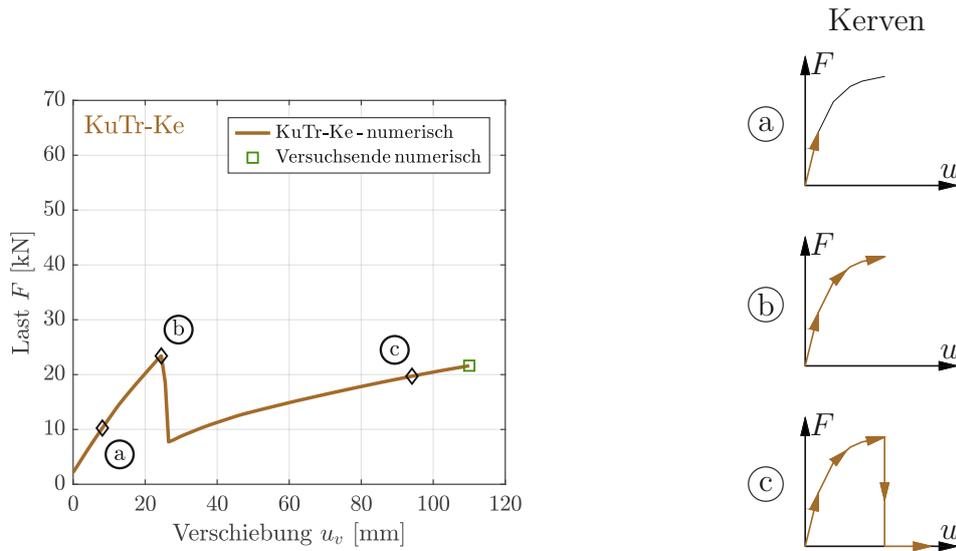


Abb. 5.41: Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der numerischen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe KuTr-Ke (links), Verschiebungszustände der zugehörigen multi-linearen Federelemente (rechts)

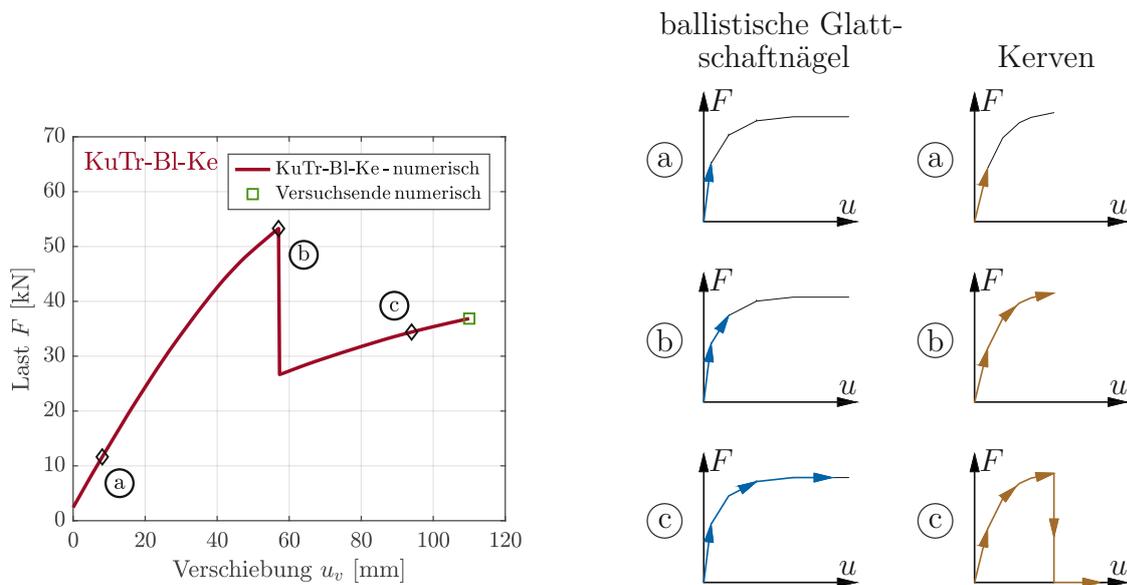


Abb. 5.42: Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der numerischen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe KuTr-BI-Ke (links), Verschiebungszustände der zugehörigen multi-linearen Federelemente (rechts)

Wie aus den gegebenen Abbildungen Abb. 5.40 bis Abb. 5.42 ersichtlich wird, definieren sich die untersuchten Versuchstypologien durch jeweils variantenabhängig unterschiedliche charakteristische Verschiebungszustände welche gleichermaßen das jeweilige Last-Verschiebungs-Verhalten in maßgebender Form beeinflussen. Betrachtet man in diesem

Sinne die rein blechbasierte Versuchsreihe KuTr-BI gemäß Abb. 5.40, stellt sich deren numerisch generiertes Last-Verschiebungs-Verhalten, grundsätzlich qualitativ äquivalent zu dem der experimentellen Untersuchungen gemäß *Kapitel 5.4*, durch eine entsprechend hochduktilen Charakteristik bei einer zeitgleich allerdings nur in gemäßigttem Maße vorhandenen Tragfähigkeit und Steifigkeit des Verbundsystems dar.

Wie aus den genannten experimentellen Untersuchungen darüber hinaus gleichermaßen zu erkennen ist, bildet diese Versuchsreihe im realen Verhalten überdies keinen expliziten Versagensmechanismus aus, sondern definiert sich demgegenüber lediglich durch entsprechend fortschreitend auftretende Schädigungsmechanismen in Form einer Lochleibung der Strukturhölzer (Schädigungsmechanismus LH) sowie einer Plastifizierung der darin vernagelten ballistischen Glattschaftnägel, des damit in Verbindung stehenden Puzzle Strip Schublechs und der applizierten Flächenbewehrung (Schädigungsmechanismen PN, PS und PBw), als auch anhand von überdies partiell vorhandenen Rissbildungen in der Zugzone der Verbundkomponente Beton (Schädigungsmechanismus RB), wobei diese vorliegenden Schädigungsmechanismen weiterführend in grundsätzlich ebenso äquivalenter Form auf Basis der gegebenen numerischen Modellbildung abgeleitet werden können. Während die Abbildung der beschriebenen Schädigungsmechanismen in Form einer Plastifizierung des vorhandenen Puzzle Strip Schublechs bzw. der applizierten Flächenbewehrung (Schädigungsmechanismen PS bzw. PBw) sowie von partiellen Rissbildungen in der Zugzone der Verbundkomponente Beton (Schädigungsmechanismus RB) in diesem Sinne bereits auf Basis der einleitend dargebrachten Beschreibung des generellen Strukturverhaltens der einzelnen Modellkomponenten erfolgen kann, stellt sich die Ableitung der verbliebenen Schädigungsmechanismen in Form einer Lochleibung der Strukturhölzer (Schädigungsmechanismus LH), sowie einer Plastifizierung der darin vernagelten ballistischen Glattschaftnägel (Schädigungsmechanismus PN) als direkte Schlussfolgerung aus den charakteristisch gegebenen Verschiebungszuständen der für diese Versuchsreihe definierten multi-linearen Federelemente dar.

In diesem Sinne zeigen sich die hierbei applizierten Federelemente (repräsentativ für den Last-Verschiebungs-Zusammenhang der ballistischen Glattschaftnägel) grundsätzlich durch mit steigender vertikaler Verschiebung u_v der Gesamtstruktur ebenso gesteigerte Verschiebungszustände (siehe Abb. 5.40 Punkt (a)) bestimmt. Gleichfalls kommt es dabei überdies zu keinem Erreichen der maximalen Grenzverschiebung u_u der jeweiligen Federelemente (siehe Abb. 5.40 Punkt (b)), ein etwaiger expliziter repräsentativer Versagensmechanismus bildet sich bei dieser Versuchsreihe dementsprechend ebenso nicht aus. Lediglich die hierbei auftretenden genannten Schädigungsmechanismen in Form einer Lochleibung der Strukturhölzer (Schädigungsmechanismus LH), sowie einer Plastifizierung der darin vernagelten ballistischen Glattschaftnägel (Schädigungsmechanismus PN) können demgemäß abgeleitet werden, als der definiert beschrittene Lastpfad innerhalb der jeweiligen Last-Verschiebungszusammenhänge der einzelnen multi-linearen Federelemente sich auch dementsprechend als jeweils repräsentativ für ebendiese Schädigungsmechanismen darstellt (siehe in diesem Sinne vergleichend auch die kontextuellen Untersuchungsergebnisse der repräsentativen kleinmaßstäblichen Versuchsreihe KuPu-BI gemäß *Kapitel 5.3*).

Betrachtet man im vorliegenden Zusammenhang darüber hinaus weiterführend die rein kervenbasierte Versuchsreihe KuTr-Ke gemäß Abb. 5.41, können mit Hinblick auf das numerisch abgeleitete Trag- und Verformungsverhalten auch für diese Versuchstypologie im

Allgemeinen ähnliche kontextuelle Schlüsse wie für die eingangs beschriebene, rein blechbasierte Versuchsreihe KuTr-BI gezogen werden. In diesem Sinne stellt sich das numerisch generierte Last-Verschiebungs-Verhalten dieser Versuchstypologie grundsätzlich abermalig qualitativ äquivalent zu dem der experimentellen Untersuchungen gemäß *Kapitel 5.4* dar, im Vergleich zur rein blechbasierten Versuchsreihe KuTr-BI definiert sich dieses aber durch eine demgegenüber in gewissem Maße konträre, nicht duktile Charakteristik bei einer gleichermaßen überdies aber wiederum nur in geringem, bzw. nur in gemäßigtem Maße vorhandenen Tragfähigkeit und Steifigkeit des Verbundsystems. Wie aus den genannten experimentellen Untersuchungen darüber hinaus gleichermaßen zu erkennen ist, bildet diese Versuchsreihe im realen Verhalten ebenso einen demgemäßen expliziten Versagensmechanismus in Form eines spontan auftretenden Schubversagens des Betons im Ansatz der Kervenflanke (Versagensmechanismus SBK) aus, sowie charakterisiert sich die vorliegende Versuchsreihe darüber hinweg ebenso durch wiederum fortschreitend auftretende Schädigungsmechanismen in Form einer Plastifizierung der applizierten Flächenbewehrung sowie von partiell vorhandenen Rissbildungen in der Zugzone der Verbundkomponente Beton (Schädigungsmechanismen PBw bzw. RB), wobei diese vorliegenden Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen weiterführend abermalig in grundsätzlich äquivalenter Form auf Basis der gegebenen numerischen Modellbildung abgeleitet werden können.

Während die Abbildung der beschriebenen Schädigungsmechanismen in Form einer Plastifizierung der applizierten Flächenbewehrung sowie von partiellen Rissbildungen in der Zugzone der Verbundkomponente Beton (Schädigungsmechanismen PBw bzw. RB) in diesem Sinne hierbei wiederum bereits auf Basis der einleitend dargebrachten Beschreibung des generellen Strukturverhaltens der einzelnen Modellkomponenten erfolgen kann, stellt sich die Ableitung des verbliebenen Versagensmechanismus in Form eines spontan auftretenden Schubversagens des Betons im Ansatz der Kervenflanke (Versagensmechanismus SBK) abermalig als direkte Schlussfolgerung aus den charakteristisch gegebenen Verschiebungszuständen der für diese Versuchsreihe definierten multi-linearen Federelemente dar. In diesem Sinne zeigen sich die hierbei applizierten Federelemente (repräsentativ für den Last-Verschiebungs-Zusammenhang der Kerven) grundsätzlich durch mit steigender vertikaler Verschiebung u_v der Gesamtstruktur ebenso gesteigerte Verschiebungszustände (siehe Abb. 5.41 Punkt (a)) bestimmt, unterschiedlich zur rein blechbasierten Versuchstypologie kommt es bei dieser Versuchsreihe mit zunehmender vertikaler Verschiebung u_v aber zu einem Erreichen der maximalen Grenzverschiebung u_u der jeweiligen Federelemente und somit zu einem ebenso vorhandenen Erreichen der definierten Schubtragfähigkeit F_{vR} ebendieser (siehe Abb. 5.41 Punkt (b)).

Als die für diese Versuchsreihe repräsentativen multi-linearen Federelemente weiterführend überdies keine explizite Nachbruchcharakteristik nach Erreichen der Schubtragfähigkeit F_{vR} aufweisen, kommt es schlussfolgernd demgemäß zu einem entsprechenden Lastausfall ebendieser und somit gleichfalls zu einem ebenso vorhandenen Lastabfall im repräsentativen Last-Verschiebungs-Zusammenhang der vorliegenden Versuchstypologie, der gegebene real beobachtete Versagensmechanismus in Form eines spontan auftretenden Schubversagens des Betons im Ansatz der Kervenflanke (Versagensmechanismus SBK) hat sich schlussfolgernd gleichermaßen in seinem numerischen Äquivalent ausgebildet. Als dieser entsprechend eingetreten ist und die multi-linearen Federelemente demgemäß zu keiner weiteren Lastübertragung mehr fähig sind, führt eine weitere lastinduzierte Steigerung

der gegebenen vertikalen Verschiebung u_v folglich lediglich zu einem weiters erhöhten, lastunabhängigen Verschiebungszustand in den jeweiligen multi-linearen Federelementen und schlussfolgernd somit zu einem nur noch auf Basis der einzelnen Verbundkomponenten Holz und Beton definierten resultierenden Last-Verschiebungs-Verhalten ohne dabei ursprünglich gegebene Verbundwirkung zwischen ebendiesen (siehe Abb. 5.41 Punkt ©). Der für diese Versuchstypologie maßgebende Versagensmechanismus in Form eines spontan auftretenden Schubversagens des Betons im Ansatz der Kervenflanke (Versagensmechanismus SBK) kann abschließend zusammengefasst demnach numerisch wiederum entsprechend eindeutig abgeleitet werden, der definiert beschrittene Lastpfad innerhalb der jeweiligen Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der einzelnen multi-linearen Federelemente stellt sich demnach als abermalig entsprechend repräsentativ dar, als dieser den maßgebend auftretenden Versagensmechanismus wiederum klar abbilden kann (siehe in diesem Sinne vergleichend auch die kontextuellen Untersuchungsergebnisse der repräsentativen kleinmaßstäblichen Versuchsreihe KuPu-Ke gemäß *Kapitel 5.3*).

Betrachtet man überdies die kombiniert ausgeführte, blech- und kervenbasierte Versuchsreihe KuTr-BI-Ke gemäß Abb. 5.42 weiterführend im näheren Detail, können mit entsprechendem Hinblick auf das numerisch abgeleitete Trag- und Verformungsverhalten ebenso für diese Versuchstypologie generell ähnliche kontextuelle Schlüsse wie für die bereits beschriebenen rein blech- bzw. rein kervenbasierten Versuchsreihen KuTr-BI bzw. KuTr-Ke gezogen werden. In diesem Sinne stellt sich das numerisch generierte Last-Verschiebungs-Verhalten auch dieser Versuchstypologie gleichermaßen grundsätzlich qualitativ äquivalent zu dem der experimentellen Untersuchungen gemäß *Kapitel 5.4* dar, im Vergleich zu jenem der bereits angeführten Versuchsreihen definiert sich dieses darüber hinaus aber ebenso auf Basis einer demgemäß explizit systemindividuellen Charakteristik. So weist diese Versuchsreihe hierbei auf der einen Seite grundsätzlich entsprechend artverwandte kombinierte Eigenschaften beider bereits beschriebenen rein blech- bzw. rein kervenbasierten Versuchstypologien auf, zeigt sich auf der anderen Seite darüber hinaus jedoch gleichermaßen durch eine vergleichsweise wesentlich gesteigerte Tragfähigkeit und Steifigkeit des Verbundsystems bestimmt.

Wie aus den genannten experimentellen Untersuchungen überdies zu erkennen ist, definiert sich die vorliegende Versuchstypologie auch mit gegebenem Hinblick auf vorhandene Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen durch demgemäß kombiniert auftretende Charakteristiken, als sich diese Versuchsreihe im realen Verhalten sowohl durch einen einerseits vorhandenen expliziten Versagensmechanismus in Form eines spontan auftretenden Schubversagens des Betons im Ansatz der Kervenflanke (Versagensmechanismus SBK) kennzeichnet (charakteristisch für die kervenbasierte Schubverbindertypologie), als andererseits darüber hinaus ebenso auch entsprechend fortschreitend auftretende Schädigungsmechanismen in Form einer Lochleibung der Strukturhölzer (Schädigungsmechanismus LH) sowie einer Plastifizierung der darin vernagelten ballistischen Glattschaftnägel, des damit in Verbindung stehenden Puzzle Strip Schublechs und der applizierten Flächenbewehrung (Schädigungsmechanismen PN, PS und PBw), als auch von überdies partiell vorhandenen Rissbildungen in der Zugzone der Verbundkomponente Beton (Schädigungsmechanismus RB) aufweist (mit Ausnahme der Schädigungsmechanismen PBw und RB demgemäß charakteristisch für die nagel- bzw. blechbasierte Schubverbindertypologie), wobei alle in diesem Sinne angeführten Mechanismen weiterführend in grundsätzlich ebenso äquivalenter

Form auf Basis der gegebenen numerischen Modellbildung abermalig abgeleitet werden können. Während die Abbildung der beschriebenen Schädigungsmechanismen in Form einer Plastifizierung des vorhandenen Puzzle Strip Schublechs bzw. der applizierten Flächenbewehrung (Schädigungsmechanismen PS bzw. PBw) sowie von partiellen Rissbildungen in der Zugzone der Verbundkomponente Beton (Schädigungsmechanismus RB) in diesem Kontext wiederum bereits auf Basis der einleitend dargebrachten Beschreibung des generellen Strukturverhaltens der einzelnen Modellkomponenten erfolgen kann, stellt sich die Ableitung der verbliebenen Schädigungsmechanismen in Form einer Lochleibung der Strukturhölzer (Schädigungsmechanismus LH) und einer Plastifizierung der darin vernagelten ballistischen Glattschaftnägel (Schädigungsmechanismus PN), sowie des gegebenen Versagensmechanismus in Form eines spontan auftretenden Schubversagens des Betons im Ansatz der Kervenflanke (Versagensmechanismus SBK) demgemäß abermalig als direkte Schlussfolgerung aus den charakteristisch gegebenen Verschiebungszuständen der für diese Versuchsreihe definierten multi-linearen Federelemente dar.

So zeigen sich die bei dieser Versuchstypologie, im Vergleich zu den Versuchsreihen KuTr-BI und KuTr-Ke, kombiniert applizierten Federelemente (einerseits entsprechend repräsentativ für den Last-Verschiebungs-Zusammenhang der vorhandenen ballistischen Glattschaftnägel sowie andererseits für ebenso jenen der gegebenen Kerven) grundsätzlich wiederum durch mit steigender vertikaler Verschiebung u_v der Gesamtstruktur ebenso gesteigerte Verschiebungszustände (siehe Abb. 5.42 Punkt (a)) bestimmt, unterscheiden sich in ihrem dabei jeweilig fortlaufend auftretenden Verhalten weiterführend aber generell auf Basis ihrer jeweils definierten systemindividuellen Charakteristik (siehe hierzu auch die einleitend bereits beschriebenen Verschiebungseigenschaften der multi-linearen Federelemente der rein blech- bzw. rein kervenbasierten Versuchsreihen KuTr-BI bzw. KuTr-Ke). Auf diesen Zusammenhängen gründend, bilden sich bei der vorliegenden Versuchstypologie mit steigender vertikaler Verschiebung u_v demnach gleichermaßen variierende Verschiebungszustände in den jeweilig für die ballistischen Glattschaftnägel bzw. die Kerven definierten repräsentativen multi-linearen Federelementen aus. Während sich in diesem Sinne die für die Schubverbindertypologie in Form der ballistischen Glattschaftnägel repräsentativen Federelemente in einem beginnenden bzw. fortschreitenden Bereich durch nur unbedeutende Verschiebungszustände definieren, kommt es in den für die Schubverbindertypologie in Form der Kerven repräsentativen Federelementen zu einer, konträr dazu, vergleichsweise entsprechend maßgebenden Verschiebungscharakteristik, wobei sich diese hierbei, äquivalent zu jener der charakteristisch repräsentativen Versuchsreihe KuTr-Ke, wiederum durch ein entsprechendes Erreichen der maximalen Grenzverschiebung u_u , sowie durch ein ebenso gegebenes Erreichen der definierten Schubtragfähigkeit F_{vR} der jeweiligen multi-linearen Federelemente definiert (siehe Abb. 5.42 Punkt (b)).

Als diese besagten Federelemente darüber hinaus abermalig keine explizite Nachbruchcharakteristik nach Erreichen der Schubtragfähigkeit F_{vR} aufweisen, kommt es folglich zu einem entsprechenden Lastausfall ebendieser und somit gleichfalls zu einem ebenso wiederum vorhandenen Lastabfall im gegebenen Last-Verschiebungs-Zusammenhang der vorliegenden Versuchstypologie, der real beobachtete Versagensmechanismus in Form eines spontan auftretenden Schubversagens des Betons im Ansatz der Kervenflanke (Versagensmechanismus SBK) hat sich schlussfolgernd gleichermaßen abermalig in seinem numerischen Äquivalent ausgebildet. Als dieser entsprechend eingetreten ist und die für

die Schubverbindertypologie in Form der Kerven repräsentativen multi-linearen Federelemente demgemäß zu keiner weiteren Lastübertragung mehr fähig sind, führt eine weitere lastinduzierte Steigerung der gegebenen vertikalen Verschiebung u_v folglich zu keinem weiters durch diese repräsentativen Federelemente beeinflussten Trag- bzw. Verformungsverhalten. Die weitere resultierende Last-Verschiebungs-Charakteristik definiert sich schlussfolgernd ausschließlich auf Grundlage der für die Schubverbindertypologie in Form der ballistischen Glattschaftnägel repräsentativen Federelemente (und des damit in Verbindung stehenden Puzzle Strip Schublechs), sowie darüber hinaus entsprechend auch auf Basis der kontextuellen einzelnen Verbundkomponenten Holz und Beton (siehe Abb. 5.42 Punkt ©). Das weiters verbliebene Last-Verschiebungs-Verhalten nach dem Auftreten des charakteristischen Versagensmechanismus in Form eines spontan auftretenden Schubversagens des Betons im Ansatz der Kervenflanke (Versagensmechanismus SBK) kann demgemäß als wiederum rein blechbasiert interpretiert werden, qualitativ äquivalente Charakteristiken wie für die rein blechbasierte Versuchsreihe KuTr-BI können für diesen gegebenen Verschiebungsbereich demnach entsprechend abgeleitet werden, als die in diesem Sinne vorhandenen maßgebenden Schädigungsmechanismen in Form einer Lochleibung der Strukturhölzer (Schädigungsmechanismus LH), sowie einer Plastifizierung der darin vernagelten ballistischen Glattschaftnägel (Schädigungsmechanismus PN) sich abermalig als entsprechend repräsentativ für diese Charakteristik darstellen (siehe in diesem Sinne vergleichend wiederum die kontextuellen Untersuchungsergebnisse der repräsentativen kleinmaßstäblichen Versuchsreihe KuPu-BI bzw. weiterführend auch ebendiese der Versuchsreihe KuPu-BI-Ke gemäß *Kapitel 5.3*).

5.5.3 Zusammenfassung der numerischen Untersuchungsergebnisse an klein- und großmaßstäblichen Verbundprobekörpern

Betrachtet man die numerischen Untersuchungen an klein- und großmaßstäblichen Verbundprobekörpern gemäß *Kapitel 5.5.1* und *Kapitel 5.5.2* abschließend kumulativ zusammengefasst mit genauerem Hinblick, können diese grundsätzlich sowohl als einerseits entsprechend experimentell verifizierend, als andererseits auch als demgemäß detailliert beschreibend charakterisiert werden. Auf Basis dieser Untersuchungen wird es demnach nicht nur möglich die experimentellen Untersuchungen numerisch zu validieren, sondern die dabei resultierenden Ergebnisse aus einer kontinuumsmechanischen Betrachtungsweise überdies ebenso in unterschiedlichen Maßstabsebenen weiterführend ausführlich zu beleuchten, wobei der wesentlichste Fokus im näheren Detail hierbei auf einer Identifikation der jeweils resultierenden Last-Verschiebungs-Zusammenhänge, als auch der dabei auftretenden Schädigungs- und Versagensmechanismen, sowie des chronologischen Ablaufs bzw. der chronologischen Abfolge ebendieser liegt.

Mit demnach konkretem Bezug auf die Untersuchungsergebnisse der kleinmaßstäblichen Verbundprobekörper gemäß *Kapitel 5.5.1*, stellen sich diese durch grundsätzlich variantenabhängige, im Allgemeinen jeweils systemindividuelle Charakteristiken dar, welche sich hierbei demgemäß folglich auf Basis der jeweilig applizierten Schubverbindersysteme definieren. In diesem Sinne charakterisieren sich die numerisch generierten Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der rein blech- und rein kervenbasierten Versuchsreihen KuPu-BI und KuPu-Ke durch entsprechend konträre duktile bzw. spröde Struktureigenschaften (duk-

tiles Verhalten repräsentativ für die Schubverbindertypologie in Form der ballistischen Glattschaftnägeln bzw. des damit in Verbindung stehenden Puzzle Strip Schublechs, sowie sprödes Verhalten repräsentativ für die Schubverbindertypologie in Form der Kerven), und zeigt sich die kombiniert ausgeführte, blech- und kervenbasierte Versuchsreihe KuPu-BI-Ke durch demgemäß kombinierte Charakteristiken dieser alleinstehenden Versuchstypologien bestimmt, als diese ein grundsätzlich ebenso sprödes Verhalten (wiederum repräsentativ für die Schubverbindertypologie in Form der Kerven) aufweist, sich darüber hinaus aber gleichermaßen durch eine entsprechend duktile Nachbruchcharakteristik (demgemäß repräsentativ für die Schubverbindertypologie in Form der ballistischen Glattschaftnägeln bzw. des damit in Verbindung stehenden Puzzle Strip Schublechs) definiert. Betrachtet man darüber hinaus ebenso die resultierend auftretenden numerisch generierten Schädigungs- und Versagensmechanismen, lassen sich auch diese als grundsätzlich entsprechend variantenspezifisch in Abhängigkeit der jeweilig applizierten Schubverbindersysteme beschreiben. Während in diesem Sinne die rein blechbasierte Versuchsreihe KuPu-BI keinen expliziten Versagensmechanismus, sondern lediglich demgemäß nagel- bzw. blechspezifische Schädigungsmechanismen aufweist, repräsentiert sich die rein kervenbasierte Versuchsreihe KuPu-Ke konträr dazu durch einen maßgeblichen deutlich ausgeprägten kervenbasierten Versagensmechanismus. Eine darüber hinaus weiterführend wiederum koexistente Form dieser genannten Schädigungs- und Versagensmechanismen weist überdies die kombiniert ausgeführte, blech- und kervenbasierte Versuchsreihe KuPu-BI-Ke auf, als diese sich einerseits gleichermaßen durch einen maßgeblichen deutlich ausgeprägten kervenbasierten Versagensmechanismus definiert, sich andererseits aber ebenso auf Basis von entsprechenden (speziell im Nachbruchverhalten vorhandenen) nagel- bzw. blechspezifischen Schädigungsmechanismen darstellt.

Mit überdies hinweg vorliegendem Bezug auf die Untersuchungsergebnisse der großmaßstäblichen Verbundprobekörper gemäß *Kapitel 5.5.2*, zeigen sich auch diese durch grundsätzlich variantenabhängige, im Allgemeinen jeweils systemindividuelle Charakteristiken auf Basis der jeweilig applizierten Schubverbindersysteme bestimmt. In diesem Zusammenhang lassen sich zwischen den Untersuchungsergebnissen der klein- und großmaßstäblichen Verbundprobekörper folglich auch entsprechende Parallelen erkennen bzw. kann schlussfolgernd gleichermaßen ein demgemäß artverwandtes Strukturverhalten festgehalten werden. So charakterisieren sich die numerisch generierten Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der rein blech- und rein kervenbasierten Versuchsreihen KuTr-BI und KuTr-Ke durch abermalig grundsätzlich entsprechend variierende duktile bzw. spröde Struktureigenschaften, zeigen sich zeitgleich aber ebenso durch nur in geringem bis mäßigem Maße gegebene Tragfähigkeiten und Steifigkeiten bestimmt. Konträr dazu stellt sich überdies die kombiniert ausgeführte, blech- und kervenbasierte Versuchsreihe KuTr-BI-Ke dar, als diese im Allgemeinen wiederum gleichermaßen koexistente Systemeigenschaften aufweist, sich darüber hinaus aber durch eine vergleichsweise wesentlich gesteigerte Tragfähigkeit und Steifigkeit auszeichnet. Mit weiterführendem Kontext auf die in diesem Sinne hierbei auftretenden numerisch generierten Schädigungs- und Versagensmechanismen können für die vorliegenden Versuchsreihen kumuliert zusammengefasst dabei einerseits sowohl generelle, variantenübergreifende, als andererseits auch entsprechende strukturspezifische, für die einzelnen Versuchstypologien maßgebende, Charakteristiken abgeleitet werden. In diesem Sinne zeigt die numerische Modellbildung auf der einen Seite allgemeine, für die jeweilige

Verbundkomponente Beton bzw. die darin applizierte Flächenbewehrung maßgebende Schädigungsmechanismen auf, sowie können auf deren Basis auf der anderen Seite darüber hinaus ebenso jeweils variantenabhängige, für die einzelnen jeweiligen Schubverbindertypologien individuelle, Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen festgehalten werden. Während sich in diesem Sinne die rein blechbasierte Versuchsreihe KuTr-BI durch wiederum keinen expliziten Versagensmechanismus, sondern durch lediglich entsprechend nagel- bzw. blechspezifische Schädigungsmechanismen bestimmt zeigt, definiert sich die rein kervenbasierte Versuchsreihe KuTr-Ke durch demgemäß abermalig konträre Eigenschaften auf Basis eines maßgeblichen deutlich ausgeprägten kervenbasierten Versagensmechanismus. Qualitativ ähnlich verhält es sich darüber hinaus gleichermaßen mit Bezug auf die kombiniert ausgeführte, blech- und kervenbasierte Versuchsreihe KuTr-BI-Ke, als diese sich wiederum durch ein grundsätzlich entsprechend koexistentes Spektrum dieser genannten Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen definiert, sich das hierbei chronologische Auftreten der einzelnen gegebenen Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen darüber hinaus aber als demgemäß variantenspezifisch darstellt, wobei die kontextuelle Identifikation dieser speziellen Charakteristik hierbei abschließend als für den allgemeinen Untersuchungsgegenstand überdies besonders wertvoll hervorgehoben werden kann, als ebendiese das generelle Trag- und Verformungsverhalten des maßgeblich untersuchungsrelevanten Verbunddeckensystems in den entscheidendsten Zügen beschreibt.

Kapitel 6

Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten unter Langzeitbeanspruchung

Aufbauend auf der in den Vorkapiteln beschriebenen allgemeinen und detaillierten Systemcharakterisierung der untersuchten Strukturtypologie sollen im nachfolgenden *Kapitel 6* die maßgebenden Hauptuntersuchungen des forschungsrelevanten neuartigen Verbunddeckensystems mit Bezug auf die zeitliche Langzeitskalenebene vorgestellt werden. Unter einer allgemeinen Betrachtung umfassen die vorliegenden Forschungsinhalte dabei experimentelle und analytische Untersuchungen an unterschiedlichen Typologien von alleinstehend bzw. kombiniert ausgeführten Verbundprobekörpern, sowie an diesen Versuchsreihen orientierte begleitende experimentelle Untersuchungen an Materialprobekörpern des Verbundpartners Beton, durchgeführt auf strukturell variierenden, klein- und großmaßstäblichen Skalenebenen.

Ziel dieser vollumfänglichen Untersuchungen soll hierbei sein, das zeitabhängige systemindividuelle Trag- und Verformungsverhalten des neuartigen Verbunddeckensystems einerseits allgemein zu identifizieren und weiterführend zu evaluieren, sowie andererseits auch die dabei auftretenden alleinstehenden und kombinierten Eigenschaften bzw. die Interaktionsmechanismen der untersuchten Systemtypologien zu detektieren und diese anhand von mechanischen Kenngrößen zu quantifizieren. In diesem Sinne soll es demnach möglich werden maßgebende systemische Einflussparameter auf das zeitabhängige systemindividuelle Trag- und Verformungsverhalten im Detail festzuhalten und deren quantitative Ausgestaltung individuell zu identifizieren und vergleichend gegenüberzustellen.

6.1 Umfang und Aufbau der Untersuchungen

Die maßgebenden Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten unter Langzeitbeanspruchung umfassen gemäß der einleitenden Beschreibung, bzw. ebenso entsprechend der Beschreibung aus *Kapitel 1*, konzeptionell und strukturell variierende Untersuchungen auf maßstäblich unterschiedlichen Skalenebenen, wie nachfolgend auch aus Abb. 6.1 grafisch zusammengefasst entnommen werden kann.

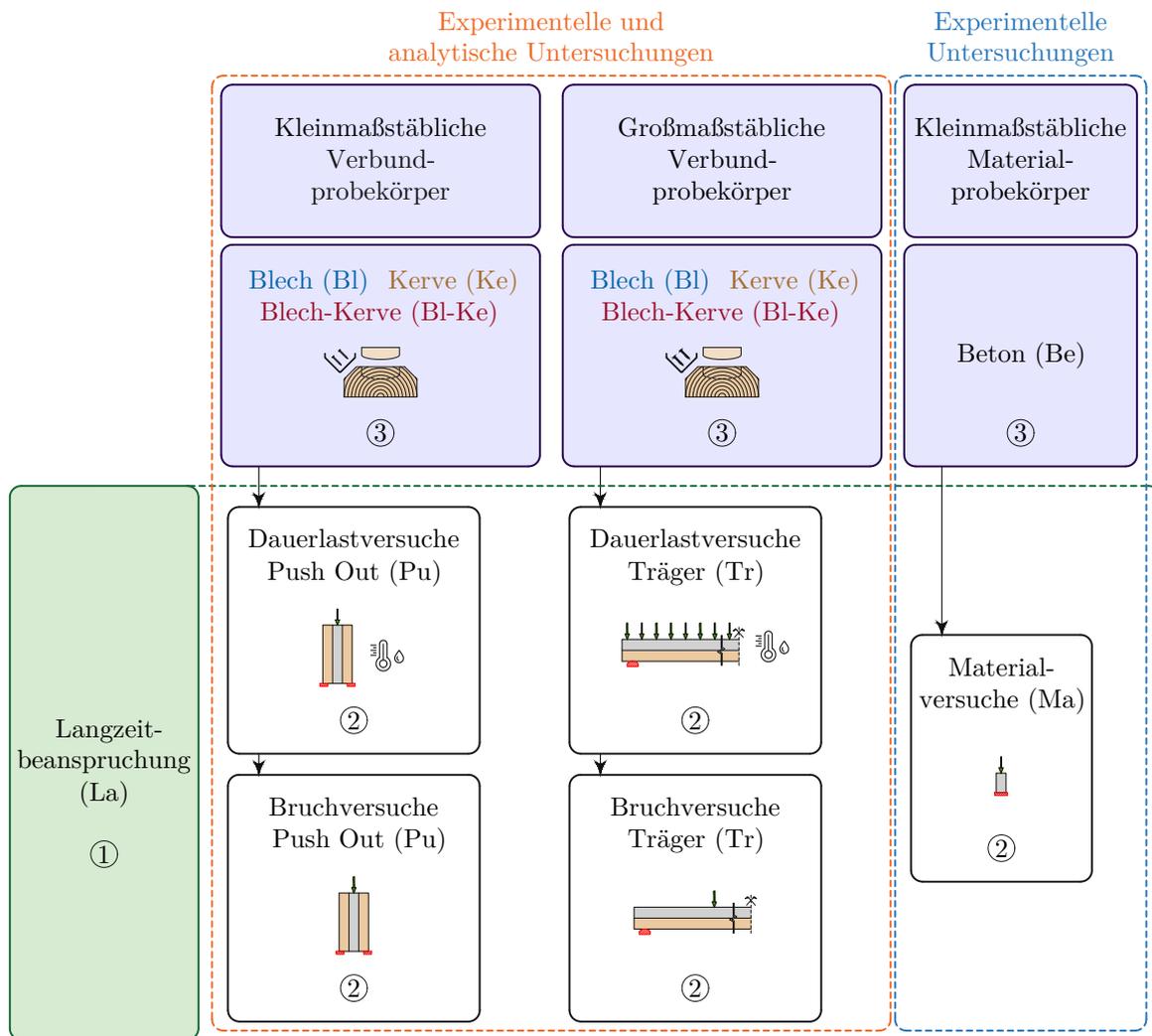


Abb. 6.1: Versuchsspektrum der Untersuchungen an Verbundprobekörpern und der begleitenden Untersuchungen an Materialprobekörpern unter Langzeitbeanspruchung

Gemäß dargestellter Abb. 6.1 umfasst das vorliegende Spektrum der Untersuchungen unter Langzeitbeanspruchung hierbei insgesamt sieben verschiedene Versuchsreihen, bestehend aus jeweils drei unterschiedlichen Typologien der klein- bzw. großmaßstäblichen Verbundprobekörper (Blech, Kerve und Blech-Kerve), sowie aus der Variante der kleinmaßstäblichen Materialprobekörper (Beton).

Die konzeptionellen Kategorien der Verbundprobekörper umfassen hierbei sowohl experimentelle als auch analytische Untersuchungen, während die Kategorie der Materialprobekörper im Vergleich dazu lediglich begleitende experimentelle Untersuchungen (zur Detektion der vorhandenen Materialeigenschaften unter Langzeitbeanspruchung) beinhaltet.

Hinsichtlich der dabei verwendeten Versuchsreihenbezeichnungen können äquivalent zu den Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung weiterführend die Indexierungsnummern gemäß Abb. 6.1 zur Hilfe genommen werden, wobei die jeweilige Versuchsreihenbezeichnung sich hierbei immer gemäß der Indexierungsfolge ①②-③ (z.B. LaPu-Bl, LaTr-Bl-Ke oder LaMa-Be) gliedert. Auf dieser Systematik aufbauend, können die maßgebenden

Versuchsreihen hinsichtlich Bezeichnung und Anzahl der Probekörper n innerhalb der Versuchsreihen abschließend wie folgt kumuliert tabellarisch dargestellt werden.

Tab. 6.1: Versuchsreihenbezeichnung der Untersuchungen an Verbundprobekörpern und der begleitenden Untersuchungen an Materialprobekörpern unter Langzeitbeanspruchung

Versuchsreihe	n	Versuchsreihe	n
LaPu-BI	4	LaTr-Ke	4
LaPu-Ke	4	LaTr-BI-Ke	4
LaPu-BI-Ke	4	LaMa-Be	24
LaTr-BI	4		

Gemäß den Darstellungen in Tab. 6.1 umfassen die Versuchsreihen der klein- und großmaßstäblichen Verbundprobekörper jeweils 4 Proben je Versuchsreihe und bilden den maßgeblichen Schwerpunkt der Untersuchungen unter Langzeitbeanspruchung ab. Demgegenüber definiert sich die Versuchsreihe der Materialprobekörper durch eine Anzahl von 24 Proben und stellt eine zu den Hauptuntersuchungen begleitende Detektionsgrundlage zur Beschreibung der vorhandenen Materialeigenschaften dar. Gemäß diesem Konzept soll nachfolgend zu Beginn auch die Vorstellung der einhergehenden Untersuchungen zur Detektion der Materialeigenschaften in Form der begleitenden experimentellen Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Materialprobekörpern stattfinden, bevor weiterführend die wesentlichen Untersuchungsschwerpunkte in Form der experimentellen und analytischen Untersuchungen an klein- und großmaßstäblichen Verbundprobekörpern dargebracht werden.

6.2 Begleitende experimentelle Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Materialprobekörpern

Die begleitenden experimentellen Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Materialprobekörpern umfassen Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Materialprobekörpern aus Beton (LaMa-Be) zur Ermittlung mechanischer und physikalischer Kenngrößen in Form von zeitabhängiger Betondruckfestigkeit $f_c(t)$ und Rohdichte ρ .

Die jeweilige Versuchsdurchführung erfolgt dabei wiederum unter der ausdrücklichen Berücksichtigung wesentlicher Eigenschaften der klein- und großmaßstäblichen Verbundprobekörper, alle maßgebenden Untersuchungen werden in diesem Zusammenhang demnach an explizit für die Herstellung der Verbundprobekörper verwendeten Materialien durchgeführt.

6.2.1 Versuchskonzeption und normative Grundlagen

Die genannten Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Betonproben (LaMa-Be) umfassen wie bereits eingangs erwähnt vollumfänglich 24 Probekörper (Ch2-LaMa-Be- 1 bis 24, wie auch in *Anhang D* dargestellt), wobei diese gemäß gegebener Indexierung vollständig aus der zweiten der insgesamt vier vorhandenen Betonagechargen der Untersuchungen unter

Kurzzeitbeanspruchung (Ch1-KuMa-Be bis Ch4-KuMa-Be, siehe hierzu auch *Kapitel 5.2.1* bzw. *Anhang C*) entstammen. Die hierbei angewendete Materialkonfiguration definiert sich dabei, wie auch bereits eingehend in *Kapitel 2* bzw. in *Kapitel 5.2.1* angemerkt, auf Basis eines vorhandenen Betons der Betongüte C 30/37 B2 F45 GK32 42.5N RRS, welcher sich weiterführend gemäß *ÖNORMEN 206* [6] und *ÖNORM B 4710-1* [7] charakterisiert.

Die allgemeine Versuchskonzeption zur Ermittlung der einzelnen zeitabhängigen Betondruckfestigkeiten $f_c(t)$ definiert sich dabei abermals in Anlehnung an *ÖNORM B 4710-3* [47], sowie auf Basis der damit in Verbindung stehenden normativen Dokumente *ÖNORM EN 12390-1* [48], *ÖNORM EN 12390-2* [49] und *ÖNORM EN 12390-3* [50]. In diesem Sinne werden hierbei schlussfolgernd entsprechende Druckprüfungen an zylindrischen Betonproben unterschiedlichen Betonalters (Betonalter $t = 67 d$, $167 d$, $331 d$ bzw. $455 d$) durchgeführt, und wird weiterführend die daraus ableitbare zeitabhängige Festigkeitsentwicklung des Betons zu den jeweiligen Zeitpunkten t analysiert. Der experimentelle Versuchsaufbau zur Beurteilung der genannten Eigenschaften ist demnach grundsätzlich äquivalent zu den Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung, für eine damit in Verbindung stehende grafische Übersicht zum gegebenen Versuchsaufbau darf daher weiterführend wiederum auf *Kapitel 5.2.1* verwiesen werden.

Neben den genannten Druckprüfungen werden ebenfalls Untersuchungen zur Ermittlung der jeweiligen Rohdichten ρ der einzelnen Proben durchgeführt. Die allgemeine Versuchskonzeption basiert hierbei, äquivalent zu den Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung, auf einem gravimetrischen Prinzip in Form einer Gewichtsmessung nach dem Ausschalvorgang der Proben (Betonalter $t = 1 d$). Bei dieser Versuchskonzeption handelt es sich weiterführend wiederum um ein, im Vergleich zur aktuellen Normenlage vereinfachtes Messprinzip, in diesem Zusammenhang sei daher nochmals explizit erwähnt, dass das durchgeführte Bestimmungsverfahren hinsichtlich einer normativen Bewertung schlussfolgernd keine Konformität in Bezug auf *ÖNORM EN 12390-7* [51] aufweist und die Ergebnisse dieser Untersuchungen im vorliegenden Kontext lediglich informellen, aufgrund der allgemeinen Untersuchungsziele jedoch quantitativ repräsentativen, Charakter besitzen.

6.2.2 Darstellung und Interpretation der Versuchsergebnisse

Mit Bezug auf die Versuchsergebnisse der Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Betonproben weisen die einzelnen Proben der maßgebenden Betonagecharge grundsätzlich die für die geforderte Betongüte zu erwartenden Eigenschaften auf.

Betrachtet man die zeitabhängigen Betondruckfestigkeiten $f_c(t)$ gemäß Abb. 6.2 (links) wird deutlich, dass sich die tatsächliche Festigkeitsentwicklung der kleinmaßstäblichen Betonproben als qualitativ und quantitativ äquivalent im Vergleich zur theoretischen Festigkeitsentwicklung gemäß *ÖNORM EN 1992-1-1* [52] darstellt. Die zeitliche Entwicklung der Betondruckfestigkeiten $f_c(t)$ kann demnach schlussfolgernd als normativ konform beschrieben werden. In diesem Sinne entwickelt sich die zeitabhängige Betondruckfestigkeit $f_c(t)$ gemäß dem gegebenen exponentiellen normativ verankerten Zusammenhang, wobei insgesamt eine Erhöhung der zeitabhängigen mittleren Betondruckfestigkeit $f_{cm}(t)$ um 23% von 37.14 MPa (Betonalter $t = 28 d$) auf 45.76 MPa (Betonalter $t = 455 d$) innerhalb des Untersuchungszeitraums festgehalten werden kann. Mit Hinblick auf die vorhandene zeitabhängige Betondruckfestigkeit $f_c(t)$ können die Versuchsergebnisse der Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Betonproben demnach abermalig als der geforder-

ten Betongüte entsprechend, sowie wiederum als von einer konformen Grundgesamtheit stammend, bezeichnet werden.

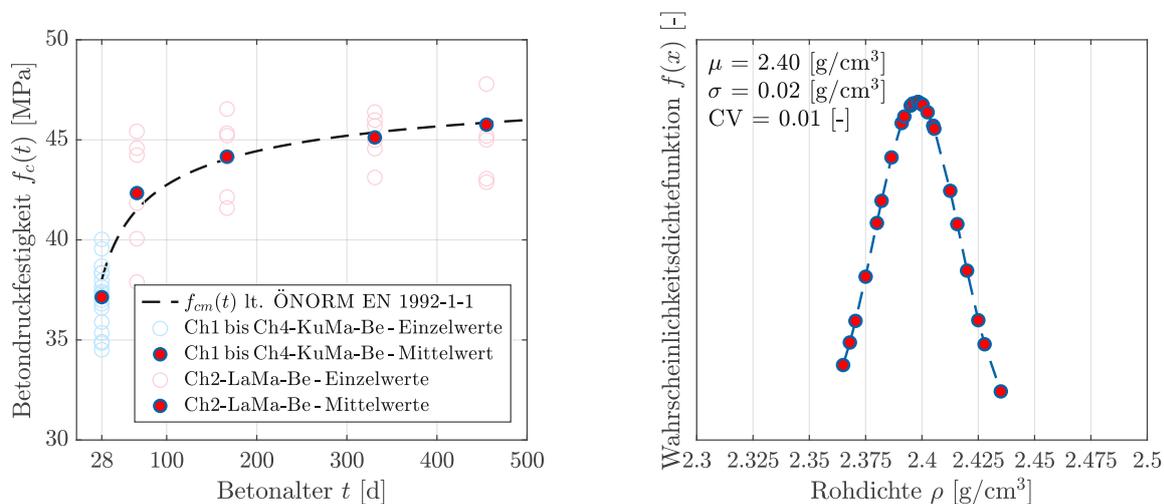


Abb. 6.2: Versuchsergebnisse der Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Betonproben | Zeitliche Entwicklung der Betondruckfestigkeit $f_c(t)$ (links), Histogramm der Rohdichten ρ (rechts)

Auch mit weiterführendem Hinblick auf die in den Untersuchungen vorhandenen Rohdichten ρ gemäß Abb. 6.2 (rechts) weisen die einzelnen Proben die zu erwartenden Eigenschaften auf. Die mittlere Rohdichte ρ_{mean} liegt hierbei bei einem Wert von 2.40 g/cm³, sowie charakterisieren sich die damit in Verbindung stehenden statistischen Parameter durch eine Standardabweichung σ von 0.02 g/cm³ bzw. durch einen Variationskoeffizienten CV von 0.01. Auch im Kontext der vorhandenen Rohdichten ρ können die Versuchsergebnisse der Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Betonproben somit abschließend als wiederum der geforderten Betongüte entsprechend beschrieben werden.

6.3 Experimentelle und analytische Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern

Wie die gegebene Nomenklatur bereits zum Ausdruck bringt, umfassen die experimentellen und analytischen Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern alle Forschungsinhalte mit Bezug auf die strukturell maßgebende kleinmaßstäbliche Skalenebene. Dahingehend werden hierbei zu Beginn experimentelle Dauerlastversuche (Dauer 1 Jahr) an kleinmaßstäblichen doppelsymmetrischen Push Out Proben der drei maßgebenden divergenten Typologien von Schubverbindern Blech, Kerbe und Blech-Kerbe (LaPu-BI, LaPu-Ke und LaPu-BI-Ke) durchgeführt und weiterführend hinsichtlich ihres dabei vorhandenen Kriechverhaltens analytisch bewertet und vergleichend analysiert. Ziel dieses Forschungsgegenstands soll es demnach sein, einerseits das generelle zeitabhängige Kriechverhalten der einzelnen Typologien allgemein zu identifizieren, sowie andererseits im Speziellen auch den

Einfluss variierender klimatischer Randbedingungen (variierende relative Luftfeuchtigkeit RH unter konstanter Temperatur T) auf ebendieses zu detektieren. In diesem Sinne werden die unter Dauerlast und definierten Klimabedingungen auftretenden vertikalen Verschiebungen u_v der Proben erfasst und die daraus resultierenden Kriechzahlen φ für den Lebenszyklus (Dauer 50 Jahre) analytisch abgeleitet. Spezieller Fokus liegt hierbei, wie bereits einleitend beschrieben, auf dem Einfluss einer variierenden relativen Luftfeuchtigkeit, weshalb die Untersuchungen grundsätzlich unter einem definierten zyklischen Wechselklima durchgeführt werden. Unter der Berücksichtigung dieser allgemeinen Randbedingungen soll es demnach möglich werden separierte resultierende Kriechzahlen für eine konstante relative Luftfeuchtigkeit RH (Grundkriechzahl $\varphi_{gr} = \frac{u_{v,gr}}{u_{v,el}}$) und eine zyklisch variierende relative Luftfeuchtigkeit RH (mechanosorptive Kriechzahl $\varphi_{ms} = \frac{u_{v,ms}}{u_{v,el}}$) zu generieren und deren Anteilsmäßigkeiten an der Kriechzahl φ ($\varphi = \varphi_{gr} + \varphi_{ms} = \frac{u_{v,gr} + u_{v,ms}}{u_{v,el}}$) qualitativ und quantitativ zu bewerten.

Im Anschluss an diese Dauerlastversuche werden an den genannten kleinmaßstäblichen doppelsymmetrischen Push Out Proben wiederum experimentelle Bruchversuche, äquivalent zu den Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung, durchgeführt. Demnach werden abermalig mechanische Eigenschaften in Form von Verschiebungsmodul K_{ser} , Schubtragfähigkeit F_{vR} und Duktilitätsmaß D_s festgehalten und weiterführend mit speziellem Fokus auf die verbleibende Resttragfähigkeit der Strukturtypologien nach gegebener Dauerbelastung analysiert. In diesem Sinne werden die alleinstehenden und kombinierten holistischen Eigenschaften der einzelnen Schubverbindersysteme (systemindividuelles Trag- und Verformungsverhalten, auftretende Interaktions-, Schädigungs- und Versagensmechanismen) einerseits wiederum identifiziert und charakterisiert, sowie andererseits auch im Kontext der Untersuchungsergebnisse der Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung vergleichend analysiert und bewertet. Explizites Ziel dieses Forschungsgegenstands soll es schlussfolgernd demnach sein, die vorhandenen mechanischen Entitäten der untersuchten Strukturtypologien nicht nur allgemein zu erfassen, sondern diese im Speziellen auch im Vergleich zu den Eigenschaften unter Kurzzeitbeanspruchung komparativ gegenüberzustellen.

6.3.1 Dauerlastversuche

6.3.1.1 Versuchskonzeption

Wie bereits eingangs beschrieben, charakterisiert sich die kontextuelle Versuchskonzeption der experimentellen Dauerlastversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern im Allgemeinen durch dementsprechende Zeitstandsversuche unter konstanter Last F , konstanter Temperatur T und zyklisch variierender relativer Luftfeuchtigkeit RH . Die hierbei applizierte vollständige Versuchscharge umfasst dabei, wie ebenfalls bereits einleitend erwähnt, insgesamt 12 Probekörper, wobei diese Gesamtanzahl hierbei aus den drei maßgebenden Versuchsreihen LaPu-Bl, LaPu-Ke und LaPu-Bl-Ke zu je 4 Proben resultiert. Die geometrische Ausgestaltung dieser genannten Versuchsreihen definiert sich dabei weiterführend durch eine grundsätzlich vollständig idente Charakteristik im Vergleich zu den Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung (KuPu-Bl, KuPu-Ke und KuPu-Bl-Ke), im Sinne einer grafischen Darstellung der Versuchstypologien darf demnach schlussfolgernd auch auf die Inhalte aus *Kapitel 5.3.1* (Abb. 5.6 bis Abb. 5.8) verwiesen werden.

Mit Bezug auf die definierten äußeren Randbedingungen innerhalb des Versuchsablaufs (konstante Last F , konstante Temperatur T und zyklisch variierende relative Luftfeuchtigkeit RH) erfolgt die versuchstechnische Bereitstellung dieser Entitäten auf Basis von eigens entwickelten Zeitstandsversuchsapparaturen, welche darüber hinaus in einem speziell hierfür adaptierten Großklimaraum situiert werden. Eine konzeptionelle Übersicht zu diesem genannten strukturellen Aufbau kann weiterführend auch aus nachfolgender Abb. 6.3 entnommen werden. In diesem Zusammenhang sei hierbei ausdrücklich erwähnt, dass die dargebrachten Gegebenheiten gemäß Abb. 6.3 dabei allerdings lediglich den expliziten konzeptionellen Aufbau der Versuchstypologie Blech (Versuchsreihe LaPu-BI) darstellen und auf eine Darstellung der Versuchstypologien Kerve und Blech-Kerbe (Versuchsreihen LaPu-Ke und LaPu-BI-Ke) aus Äquivalenzgründen verzichtet wird. Alle untersuchten Versuchsreihen definieren sich demnach durch einen konzeptionell vollständig identen Versuchsaufbau, welcher sich lediglich auf Basis der geometrischen Ausgestaltung der einzelnen Versuchsreihen unterscheidet.

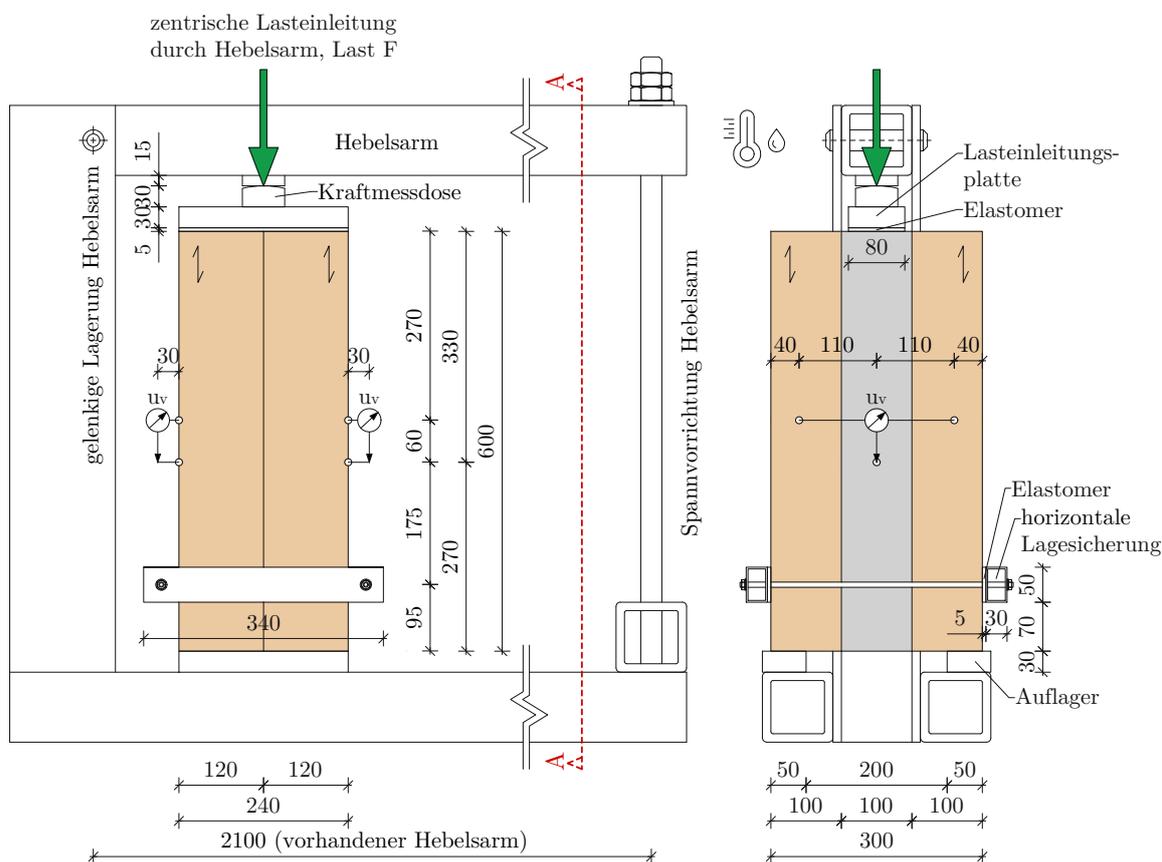


Abb. 6.3: Übersicht zum Versuchsaufbau der experimentellen Dauerlastversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe LaPu-BI | Ansicht (links), Schnitt A-A (rechts)

Wie aus Abb. 6.3 ersichtlich, werden die verwendeten Zeitstandsversuchsapparaturen im Allgemeinen anhand von großmaßstäblichen Stahlbaustrukturen mit vorspannbarem

Hebelsarm realisiert. In diesem Sinne wird durch eine aufgebrachte Vorspannung in der Spannvorrichtung eine Last F im Lasteinleitungspunkt erzeugt und zentrisch auf die jeweilige Probe übertragen. Unter der zusätzlichen Verwendung einer zwischengeschalteten Kraftmessdose im Lasteinleitungspunkt kann schlussfolgernd somit eine zielgerichtete Dauerlast in der jeweiligen Probe erreicht werden. Unter idealisierten Bedingungen stellt sich die hierdurch aufgebrachte Last F somit als konstante Größe dar, welche sich lediglich auf Basis der aufgebrachten Vorspannung definiert. Diesem Umstand kann in der realen Versuchsdurchführung jedoch nicht vollständig Rechnung getragen werden, da zeitabhängige äußere Einflüsse (klimabedingte Dehnungen in den Proben, intrinsische Spannkraftverluste) zu entsprechenden Abweichungen in den jeweils vorhandenen Lastniveaus führen. Die real vorhandenen Dauerlasten charakterisieren sich unter der Berücksichtigung von regelmäßigen manuellen Adaptierungen der aufgebrachten Vorspannungen schlussfolgernd demnach als quasi-konstante Größen, welche gewissen zeitabhängigen Schwankungen unterworfen sind. Mit Bezug auf die tatsächlich durchgeführten Versuche zeigen die einzelnen Dauerlastniveaus hierbei Abweichungen von maximal $\approx 7\%$ der aufgebrachten Last F und liegen somit in einem versuchstechnisch akzeptablen Bereich, wie weiterführend auch aus *Anhang D* entnommen werden kann. Darüber hinaus orientieren sich die genannten Dauerlastniveaus im weiteren Zusammenhang vollständig an den Gebrauchslastniveaus der zu untersuchenden Versuchstypologien und werden in diesem Kontext auf 30% des jeweiligen Mittelwerts der Schubtragfähigkeit $F_{vR,mean}$ der Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung festgelegt. Auf Basis dieser Definition ergeben sich somit resultierende applizierte Dauerlastniveaus von $\approx 13\text{ kN}$, $\approx 62\text{ kN}$ und $\approx 80\text{ kN}$ für die drei maßgebenden Versuchsreihen LaPu-Bl, LaPu-Ke und LaPu-Bl-Ke.

Neben der genannten Erfassung der aufgebrachten Last F stellt die Detektion der zeitabhängigen Holzfeuchte u innerhalb der Proben einen weiteren zentralen Punkt in der versuchstechnischen Umsetzung der kleinmaßstäblichen Untersuchungen dar. Die messtechnische Realisierung erfolgt hierbei anhand von widerstandsbasierten Holzfeuchtemessungen an mehreren Punkten der einzelnen Proben, wobei deren Lage aufgrund der Verwendung von fixierten Messelektroden jeweils fest definiert ist. Als maßgebende Punkte werden in diesem Zusammenhang dabei weiterführend die Kernbereiche der einzelnen Strukturhölzer ober- und unterhalb der eingebrachten Schubverbindersysteme (Vernagelungsbereich der Puzzle Strip Schubleche, Ober- und Unterkanten der Kervenansätze) festgelegt, wie auch aus Abb. 6.4 ersichtlich wird.

Mit darüber hinaus vorliegendem Bezug auf die in der Versuchsdurchführung vorhandenen zeitabhängigen klimatischen Randbedingungen können diese, wie bereits einleitend erwähnt, als konstant (Temperatur T) bzw. zyklisch variierend (relative Luftfeuchtigkeit RH) beschrieben werden, wie auch aus den Abbildungen Abb. 6.5, Abb. 6.6 und Abb. 6.7 (jeweils unten) ersichtlich wird. Der festgelegte Zeitverlauf der Temperatur T charakterisiert sich demnach durch einen fixierten Wert von $T = 23\text{ °C}$, und zeigt sich jener der relativen Luftfeuchtigkeit RH durch zyklische, jeweils alternierende Plateaus von $RH = 40\%$ (Trockenphasen) und $RH = 80\%$ (Feuchtphasen) bestimmt. Die in diesem Zusammenhang vorhandene Zeitdauer der einzelnen Plateaus definiert sich dabei weiterführend grundsätzlich in Abhängigkeit des jeweiligen expliziten Untersuchungsgegenstands (Ableitung der Grundkriechzahl φ_{gr} oder der mechanosorptiven Kriechzahl φ_{ms}). So zeigt sich der allgemeine Zeitverlauf der relativen Luftfeuchtigkeit RH in diesem Kontext durch eine

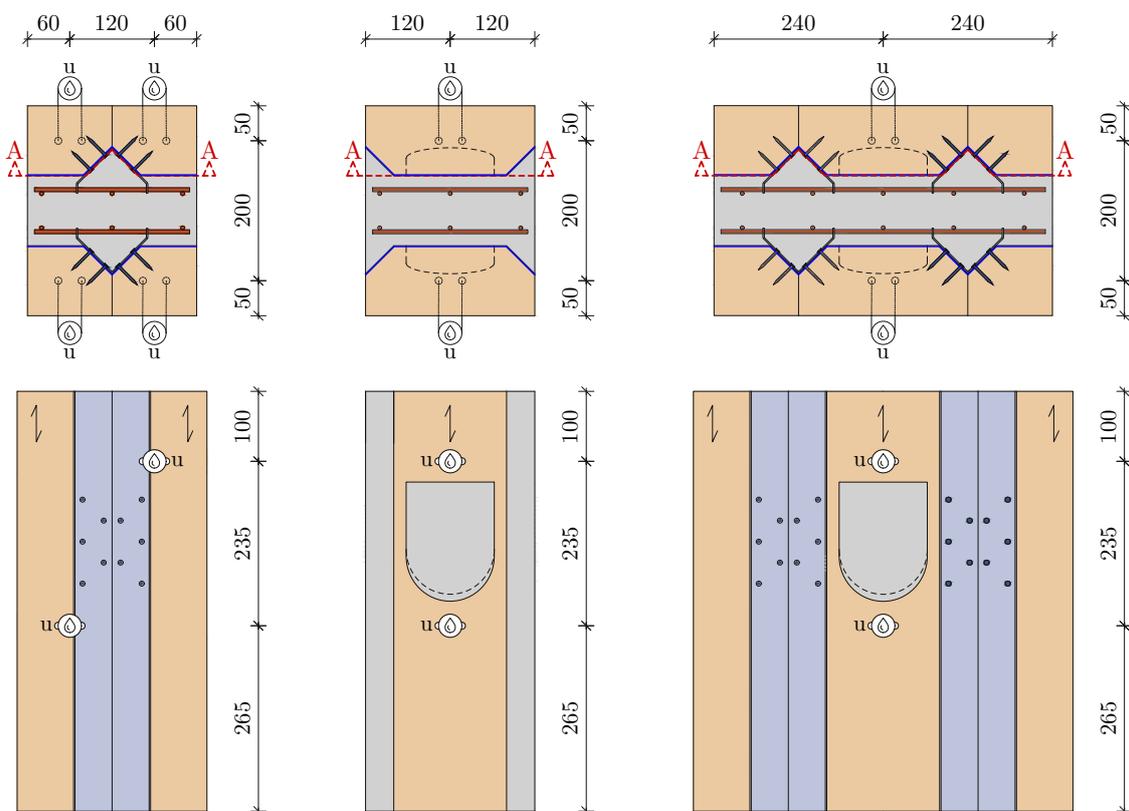


Abb. 6.4: Übersicht zum Versuchsaufbau der experimentellen Dauerlastversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Messpunkte der Holzfeuchtemessungen | Versuchsreihe LaPu-BI (links), Versuchsreihe LaPu-Ke (mittig), Versuchsreihe LaPu-BI-Ke (rechts)

beginnende, äußerst lang andauernde Trockenphase (0 bis 123 d) bestimmt und wird dieser erst an diese anschließend durch entsprechend kürzere Feucht- und Trockenphasen (123 bis 365 d) ergänzt. Durch die Applikation dieser festgelegten unterschiedlichen Plateauphasen soll es schlussfolgernd demnach möglich werden einerseits sowohl die zu Beginn vorhandenen Grundkriechzahlen φ_{gr} der Versuchsreihen (auf Basis der beginnenden Trockenphase für die ersten 123 d), als andererseits auch die mechanosorptiven Kriechzahlen φ_{ms} der einzelnen Versuchstypologien (auf Basis der anschließenden alternierenden Feucht- und Trockenphasen für die nachfolgenden 242 d) abzuleiten. In diesem Sinne kann folglich eine vollständige Beschreibung der gesamten Kriechzahl φ im Kontext ihrer jeweiligen Anteilsmäßigkeiten abschließend erfolgen.

6.3.1.2 Darstellung der Versuchsergebnisse

Repräsentative Darstellungen der Versuchsergebnisse der Dauerlastversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern können in grafischer Form den nachfolgenden Abbildungen Abb. 6.5, Abb. 6.6, Abb. 6.7 und Abb. 6.8 entnommen werden.

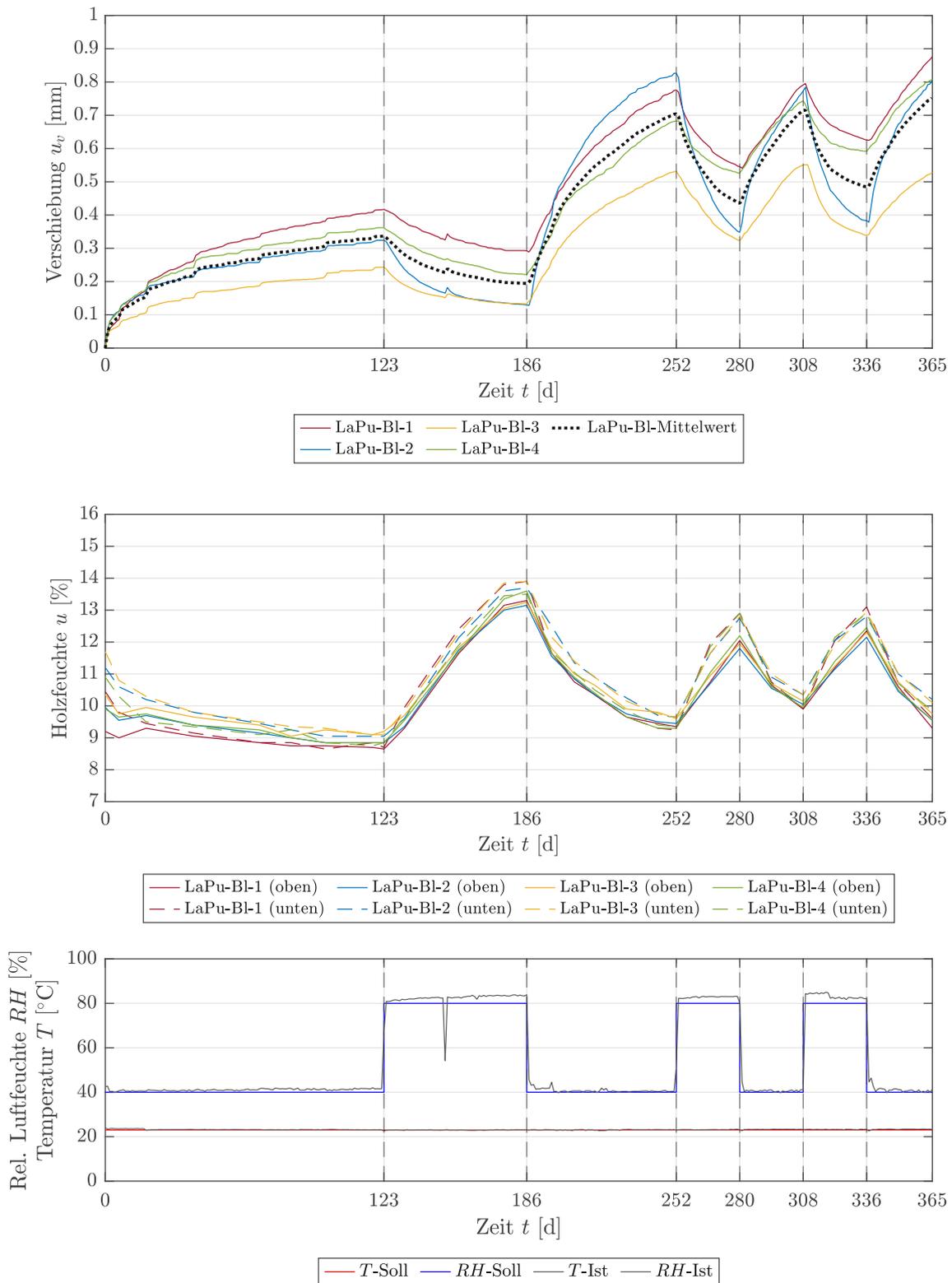


Abb. 6.5: Verschiebungs-Zeit-Zusammenhänge der experimentellen Dauerlastversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe LaPu-BI | Darstellung der zeitabhängigen Verschiebungen u_v (oben), Darstellung der zeitabhängigen Holzfeuchte u (mittig), Darstellung der zeitabhängigen klimatischen Randbedingungen (unten)

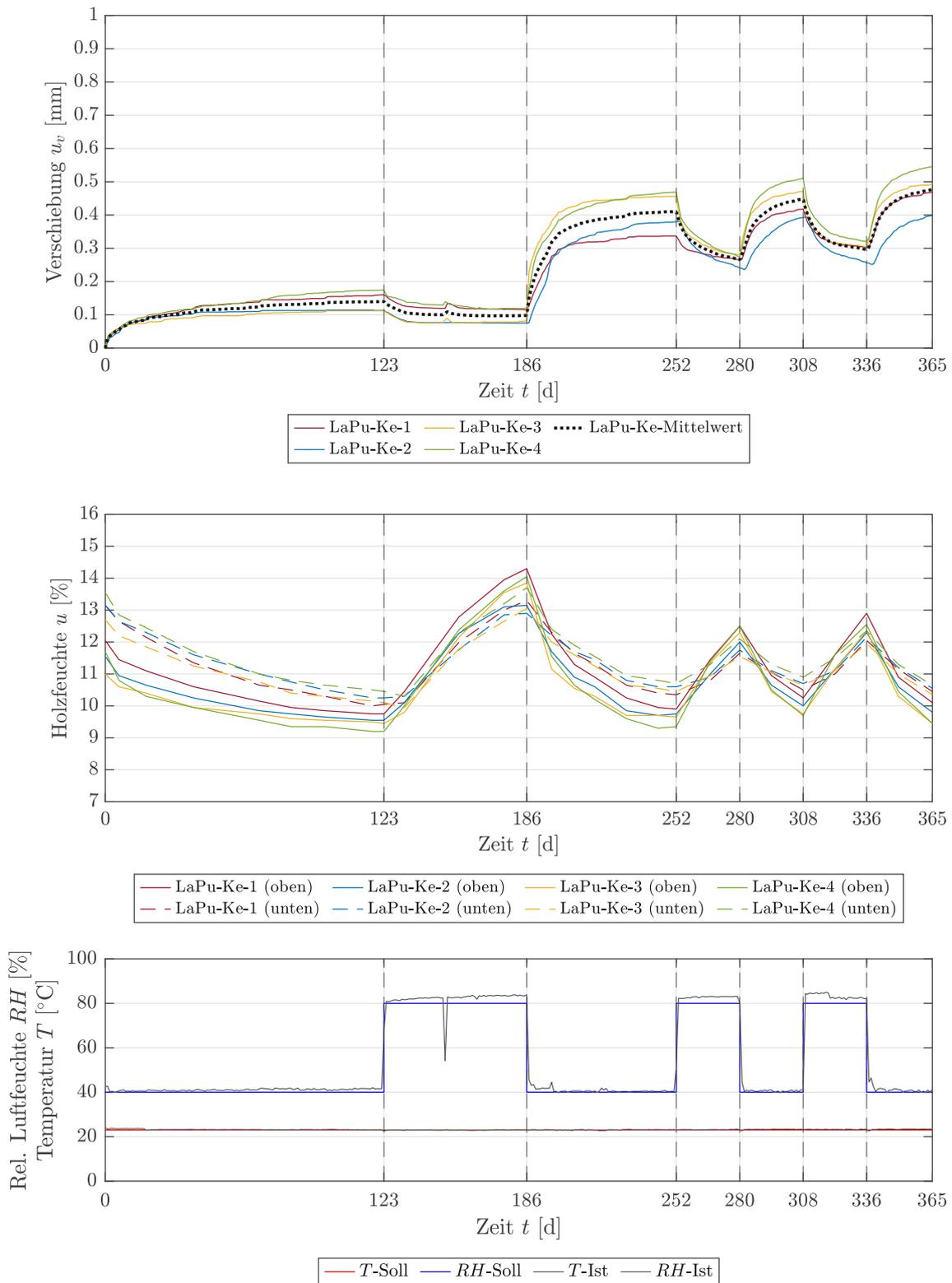


Abb. 6.6: Verschiebungs-Zeit-Zusammenhänge der experimentellen Dauerlastversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe LaPu-Ke | Darstellung der zeitabhängigen Verschiebungen u_v (oben), Darstellung der zeitabhängigen Holzfeuchte u (mittig), Darstellung der zeitabhängigen klimatischen Randbedingungen (unten)

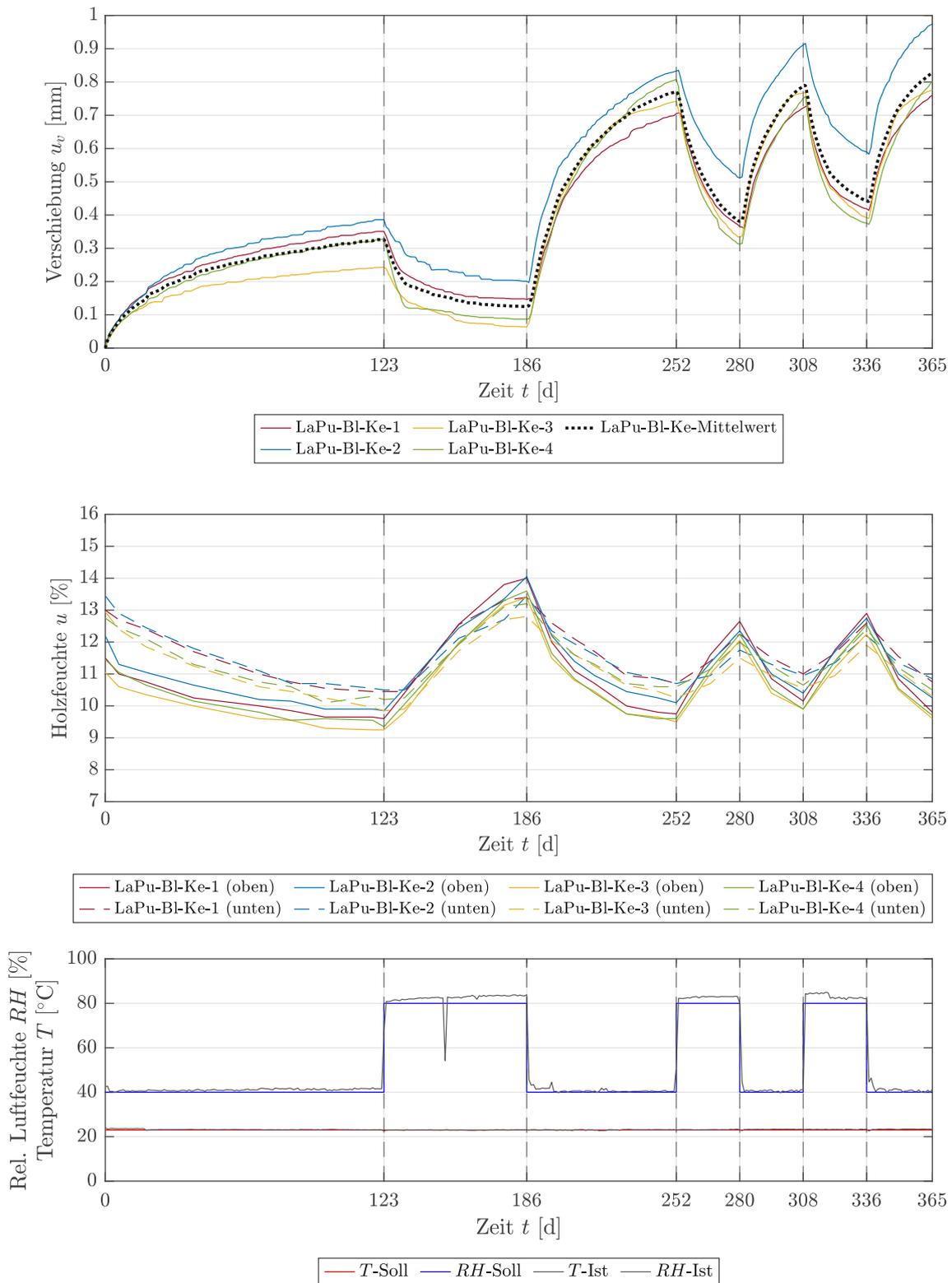


Abb. 6.7: Verschiebungs-Zeit-Zusammenhänge der experimentellen Dauerlastversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe LaPu-BI-Ke | Darstellung der zeitabhängigen Verschiebungen u_v (oben), Darstellung der zeitabhängigen Holzfeuchte u (mittig), Darstellung der zeitabhängigen klimatischen Randbedingungen (unten)

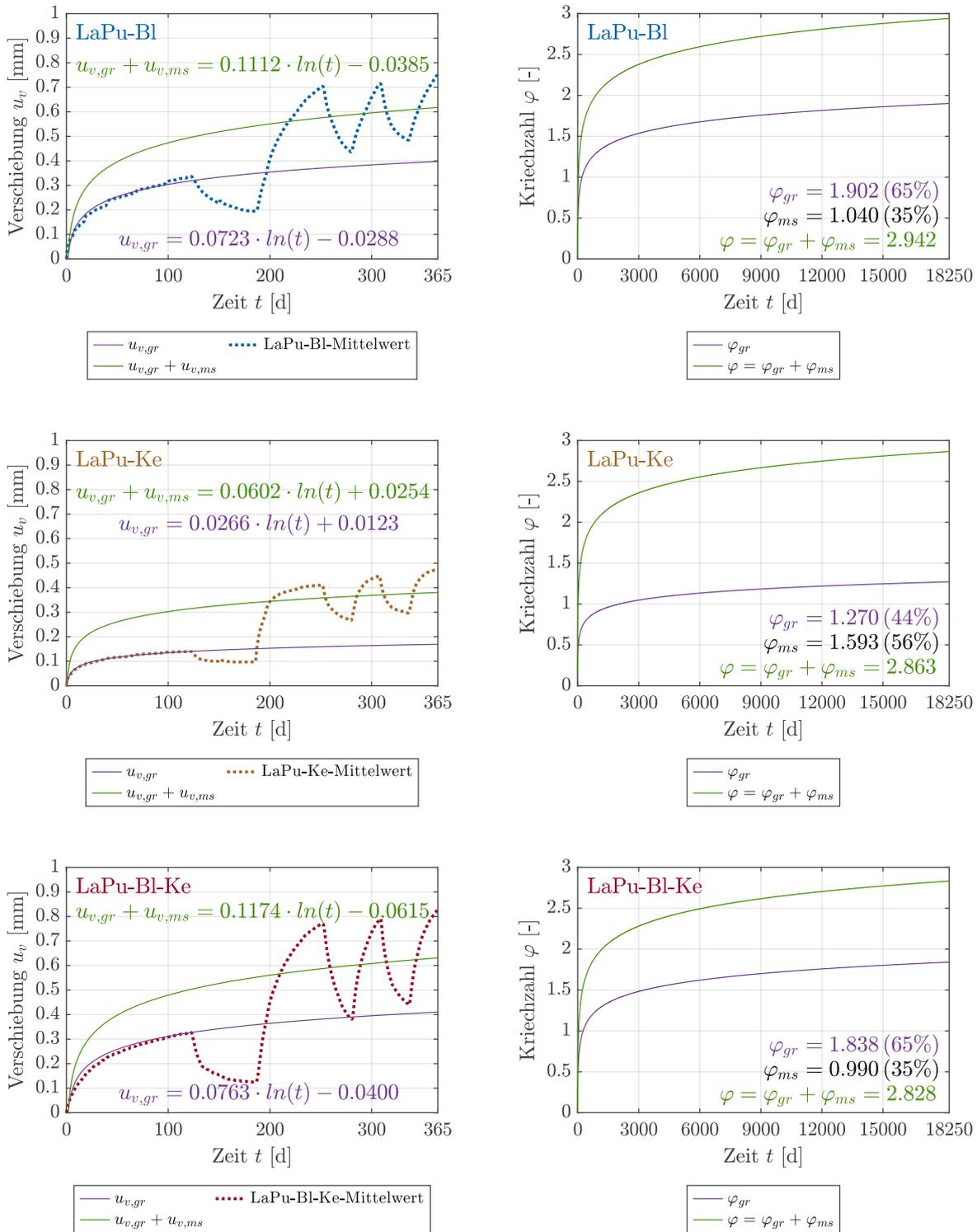


Abb. 6.8: Verschiebungs-Zeit- und Kriechzahl-Zeit-Zusammenhänge der experimentellen Dauerlastversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe LaPu-BI (oben), Versuchsreihe LaPu-Ke (mittig), Versuchsreihe LaPu-BI-Ke (unten)

Wie aus den gegebenen Abbildungen Abb. 6.5 bis Abb. 6.8 ersichtlich wird, gliedert sich die Darstellung der Versuchsergebnisse hierbei in grundsätzlich zwei maßgebende Bereiche. So werden einerseits die Versuchsergebnisse der expliziten einzelnen Versuchsreihen dargestellt (Abb. 6.5 bis Abb. 6.7), sowie ist andererseits eine kumulative Ergebnisübersicht dieser einzelnen Versuchsreihen (Abb. 6.8) abgebildet. Im Kontext der Darstellung der einzelnen Versuchsreihen gemäß Abb. 6.5 bis Abb. 6.7 beinhalten die vorhandenen Abbildungen hierbei sowohl die maßgebenden Verschiebungs-Zeit-Zusammenhänge der jeweiligen Proben, als auch deren zeitabhängigen Verlauf der Holzfeuchte u und deren zeitabhängigen Verlauf der klimatischen Randbedingungen. Mit weiterführendem Bezug auf die Darstellung der kumulativen Ergebnisübersicht gemäß Abb. 6.8 umfassen die hierbei vorhandenen Abbildungen sowohl die maßgebenden Verschiebungs-Zeit-Zusammenhänge der jeweiligen Versuchsreihen, als auch deren resultierende Kriechzahl-Zeit-Zusammenhänge. Basierend auf diesen Zusammenhängen kann demnach eine vollständige Interpretation bzw. Charakterisierung des maßgebenden Kriechverhaltens der kleinmaßstäblichen Verbundprobekörper unter Dauerlast erfolgen, wie nachfolgend aus *Kapitel 6.3.1.3* ersichtlich wird.

6.3.1.3 Interpretation der Versuchsergebnisse

Aufbauend auf den gegebenen Versuchsergebnissen der experimentellen Dauerlastversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern gemäß Abb. 6.5 bis Abb. 6.8 zeigen die einzelnen Versuchsreihen im Allgemeinen ein für die vorhandenen klimatischen Randbedingungen charakteristisches Verformungs- und Kriechverhalten. In diesem Sinne defieren sich die einzelnen Versuchstypologien hierbei grundsätzlich durch einerseits entsprechende Verformungszunahmen in den Trockenphasen, sowie durch andererseits demgemäße Verformungsabnahmen in den Feuchtphasen, wobei diese vorhandenen Zu- und Abnahmen dabei darüber hinaus ein jeweils degressives (Verformungszunahmen) bzw. regressives (Verformungsabnahmen) Erscheinungsbild aufweisen. Nebstdem charakterisieren sich die auftretenden vertikalen Verschiebungen u_v der einzelnen Versuchsreihen durch quantitativ unterschiedliche Ausprägungsformen in Abhängigkeit der jeweiligen Zyklusphase. Demgemäß zeigt sich für alle Versuchsreihen eine qualitativ konsistente gemäßigte Zunahme der vertikalen Verschiebungen u_v in der beginnenden Trockenphase (vertikale Verschiebung aufgrund von Grundkriechen $u_{v,gr}$). Nach einer darauf folgenden konsistent vorhandenen geringen Abnahme der vertikalen Verschiebungen u_v in der ersten Feuchtphase kommt es in der zweiten Trockenphase zu allerdings quantitativ jeweils erheblich gesteigerten vertikalen Verschiebungen u_v und somit zu einem deutlichen beginnenden Mitwirken der mechanosorptiven Kriechanteile. Demgleich zeigen sich im Vergleich zu den beginnenden Zyklusphasen auch für die verbleibenden Feucht- und Trockenphasen bis zum Ende des Versuchszeitraums darüber hinaus quantitativ entsprechend erhöhte Zu- und Abnahmen der vertikalen Verschiebungen u_v , jeweils zusätzlich charakterisiert durch einen kontinuierlich steigenden Mittelwert der auftretenden vertikalen Verschiebungen u_v . Ein wesentlicher vorhandener Einfluss variierender klimatischer Randbedingungen auf das allgemeine Verformungs- und Kriechverhalten der Versuchsreihen kann aufgrund der genannten Versuchsergebnisse schlussfolgernd demnach deutlich hervorgehoben werden. Mit konkretem Bezug auf das Verformungs- und Kriechverhalten der Versuchstypologie Blech (Versuchsreihe LaPu-Bl, Abb. 6.5 bzw. Abb. 6.8 oben) kennzeichnet sich dieses im Kontext der maßgebenden Versuchszeitpunkte $t = 123$ d (Ende der beginnenden Trocken-

phase) und $t = 365$ d (Ende des Versuchszeitraums) durch hierbei auftretende vertikale Verschiebungen u_v in einem Bereich zwischen 0.243 und 0.417 mm bzw. 0.528 und 0.876 mm. Unter der Berücksichtigung der vorhandenen elastischen vertikalen Verschiebungen $u_{v,el}$ ergeben sich mit Bezug auf die genannten vertikalen Verschiebungen u_v im Mittel somit schlussfolgernd resultierende Kriechzahlen $\varphi(t = 123 \text{ d})$ und $\varphi(t = 365 \text{ d})$ von 0.940 bzw. 2.101. Die in diesem Zusammenhang dabei in den einzelnen Messpunkten auftretende Holzfeuchte u liegt hierbei weiterführend in einem Bereich zwischen ≈ 9 und $\approx 14\%$, wobei ein maßgebender Holzfeuchtegradient zwischen den ober- und unterhalb der eingebrachten Schubverbindersysteme situierten Messpunkten für die vorliegende Versuchsreihe dabei nicht festgestellt werden kann. Beschreibt man das auftretende Verformungs- und Kriechverhalten im weiteren Sinne darüber hinaus auf Basis von analytischen Näherungskurven (logarithmische Funktionen $\ln(t)$), können überdies die finale Kriechzahl φ , sowie deren Anteile φ_{gr} und φ_{ms} für den gesamten Lebenszyklus abgeleitet werden. Mit Hinblick auf diese Größen ergeben sich für die Versuchsreihe LaPu-Bl schlussfolgernd Werte von $\varphi = 2.942$ bzw. $\varphi_{gr} = 1.902$ und $\varphi_{ms} = 1.040$. Unter der weiterführenden Betrachtung der jeweiligen Anteilsmäßigkeiten der Kriechzahl φ definiert sich die Grundkriechzahl φ_{gr} unter konstanten klimatischen Randbedingungen demnach durch einen Anteil von 65% der gesamten Kriechzahl φ , sowie liegt der Anteil der mechanosorptiven Kriechzahl φ_{ms} unter variierenden klimatischen Randbedingungen bei 35% ebendieser. Die Anteilsmäßigkeit des mechanosorptiven Kriechanteils spiegelt sich bei dieser Versuchsreihe demzufolge mit etwa einem Drittel der insgesamt auftretenden Kriechanteile wider.

Mit weiterführendem Bezug auf das Verformungs- und Kriechverhalten der Versuchstypologie Kerve (Versuchsreihe LaPu-Ke, Abb. 6.6 bzw. Abb. 6.8 mittig) kennzeichnet sich dieses im Kontext der maßgebenden Versuchszeitpunkte $t = 123$ d (Ende der beginnenden Trockenphase) und $t = 365$ d (Ende des Versuchszeitraums) durch, im Vergleich zur Versuchsreihe LaPu-Bl, deutlich geringer auftretende vertikale Verschiebungen u_v in einem Bereich zwischen 0.112 und 0.175 mm bzw. 0.399 und 0.546 mm. Unter der Berücksichtigung der vorhandenen elastischen vertikalen Verschiebungen $u_{v,el}$ ergeben sich mit Bezug auf die genannten vertikalen Verschiebungen u_v im Mittel somit schlussfolgernd resultierende Kriechzahlen $\varphi(t = 123 \text{ d})$ und $\varphi(t = 365 \text{ d})$ von 0.649 bzw. 2.215 für diese Versuchsreihe. Die in diesem Zusammenhang dabei in den einzelnen Messpunkten auftretende Holzfeuchte u liegt hierbei weiterführend wiederum in einem Bereich zwischen ≈ 9 und $\approx 14\%$, wobei für diese Versuchsreihe demgegenüber allerdings ein vorhandener Holzfeuchtegradient zwischen den ober- und unterhalb der eingebrachten Schubverbindersysteme situierten Messpunkten festgestellt werden kann. Demnach liegt die Holzfeuchte u der unterhalb der Schubverbindersysteme situierten Messpunkte zu Versuchsbeginn in einem Bereich von $\approx 13\%$, während sich die Holzfeuchte u der oberhalb der Schubverbindersysteme situierten Messpunkte in einem vergleichsweise nur geringeren Bereich von $\approx 11.5\%$ wiederfindet. In diesem Sinne kann demnach schlussfolgernd ein allgemein vorhandener Einfluss des Betonegevorgangs (Feuchteintrag in der Kervenflanke) auf die resultierende Holzfeuchte u innerhalb der kervenbasierten Proben festgestellt werden. Mit weiterführendem Bezug auf die finale Kriechzahl φ , sowie deren Anteile φ_{gr} und φ_{ms} für den gesamten Lebenszyklus ergeben sich für die vorliegende Versuchsreihe LaPu-Ke darüber hinaus abschließende Werte von $\varphi = 2.863$ bzw. $\varphi_{gr} = 1.270$ und $\varphi_{ms} = 1.593$. Unter der Betrachtung der jeweiligen Anteilsmäßigkeiten der Kriechzahl φ definiert sich die Grundkriechzahl φ_{gr}

unter konstanten klimatischen Randbedingungen demnach durch einen Anteil von 44% der gesamten Kriechzahl φ , sowie liegt der Anteil der mechanosorptiven Kriechzahl φ_{ms} unter variierenden klimatischen Randbedingungen bei 56% ebendieser. Die Anteilsmäßigkeit des mechanosorptiven Kriechanteils spiegelt sich bei dieser Versuchsreihe demzufolge sogar mit mehr als der Hälfte der insgesamt auftretenden Kriechanteile wider.

Mit darüber hinaus folgendem Bezug auf das Verformungs- und Kriechverhalten der Versuchstypologie Blech-Kerbe (Versuchsreihe LaPu-Bl-Ke, Abb. 6.7 bzw. Abb. 6.8 unten) kennzeichnet sich dieses im Kontext der maßgebenden Versuchszeitpunkte $t = 123$ d (Ende der beginnenden Trockenphase) und $t = 365$ d (Ende des Versuchszeitraums) durch, im Vergleich zu den Versuchsreihen LaPu-Bl und LaPu-Ke, höchst auftretende vertikale Verschiebungen u_v in einem Bereich zwischen 0.243 und 0.386 mm bzw. 0.760 und 0.974 mm. Unter der Berücksichtigung der vorhandenen elastischen vertikalen Verschiebungen $u_{v,el}$ ergeben sich mit Bezug auf die genannten vertikalen Verschiebungen u_v im Mittel somit schlussfolgernd resultierende Kriechzahlen $\varphi(t = 123 \text{ d})$ und $\varphi(t = 365 \text{ d})$ von 0.849 bzw. 2.144 für diese Versuchsreihe. Die in diesem Zusammenhang dabei in den einzelnen Messpunkten auftretende Holzfeuchte u liegt auch hierbei weiterführend wiederum in einem Bereich zwischen ≈ 9 und $\approx 14\%$, wobei ebenso für diese Versuchsreihe abermalig ein vorhandener Holzfeuchtegradient zwischen den ober- und unterhalb der eingebrachten Schubverbindersysteme situierten Messpunkten festgestellt werden kann. Demnach liegt die Holzfeuchte u der unterhalb der Schubverbindersysteme situierten Messpunkte zu Versuchsbeginn wiederum in einem Bereich von $\approx 13\%$, während sich die Holzfeuchte u der oberhalb der Schubverbindersysteme situierten Messpunkte abermals in einem vergleichsweise nur geringeren Bereich von $\approx 11.5\%$ wiederfindet. In diesem Sinne kann auch für diese kervenbasierte Versuchsreihe ein allgemein vorhandener Einfluss des Betonagevorgangs (Feuchteintrag in der Kervenflanke) auf die resultierende Holzfeuchte u innerhalb der Proben festgestellt werden. Mit darüber hinaus vorliegendem Bezug auf die finale Kriechzahl φ , sowie deren Anteile φ_{gr} und φ_{ms} für den gesamten Lebenszyklus ergeben sich für die betrachtete Versuchsreihe LaPu-Bl-Ke weiterführend Werte von $\varphi = 2.828$ bzw. $\varphi_{gr} = 1.838$ und $\varphi_{ms} = 0.990$. Unter der Betrachtung der jeweiligen Anteilsmäßigkeiten der Kriechzahl φ definiert sich die Grundkriechzahl φ_{gr} unter konstanten klimatischen Randbedingungen demnach durch einen Anteil von 65% der gesamten Kriechzahl φ , sowie liegt der Anteil der mechanosorptiven Kriechzahl φ_{ms} unter variierenden klimatischen Randbedingungen bei 35% ebendieser. Die Anteilsmäßigkeit des mechanosorptiven Kriechanteils spiegelt sich bei dieser Versuchsreihe demzufolge, äquivalent zur Versuchsreihe LaPu-Bl, mit etwa einem Drittel der insgesamt auftretenden Kriechanteile wider.

Unterzieht man das vorhandene Verformungs- und Kriechverhalten der einzelnen kleinmaßstäblichen Versuchstypologien abschließend einer weiterführenden kumulativen Vergleichsbetrachtung, wird klar ersichtlich, dass sich die vorhandenen Verschiebungs-Zeit-Zusammenhänge der einzelnen Versuchsreihen hierbei deutlich in Abhängigkeit der jeweils applizierten Schubverbindersysteme definieren. In diesem Kontext zeigen sich die einzelnen Versuchstypologien dabei bei genauerer Betrachtung explizit durch den eventuellen Einsatz einer blechernen Komponente beeinflusst. Im Falle einer vorhandenen Applikation ebendieser (Versuchsreihen LaPu-Bl und LaPu-Bl-Ke), können demnach für dieses Schubverbindersystem maßgebende, sehr stark ausgeprägte degressive und regressive Verschiebungsanteile innerhalb der vorhandenen Verschiebungs-Zeit-Zusammenhänge

festgestellt werden, während demgegenüber im Falle einer nicht vorhandenen Applikation einer blechernen Komponente (Versuchsreihe LaPu-Ke) grundsätzlich nur deutlich geringere Verschiebungsanteile vorliegen. Darüber hinaus charakterisieren sich die vorhandenen Kriechzahlen φ der einzelnen Versuchstypologien durch generell ähnliche Werte von ≈ 3.0 (2.828 bis 2.942), zeigen davon unabhängig aber teilweise deutlich unterschiedliche Anteilsmäßigkeiten ihres jeweiligen mechanosorptiven Kriechanteils von 35% bei den Versuchsreihen LaPu-Bl und LaPu-Bl-Ke sowie von 56% bei der Versuchsreihe LaPu-Ke.

6.3.2 Bruchversuche

6.3.2.1 Versuchskonzeption und normative Grundlagen

Als die experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern, wie auch bereits einleitend erwähnt, grundsätzlich auf den vorangegangenen ausgeführten experimentellen Dauerlastversuchen gemäß *Kapitel 6.3.1* aufbauen, umfasst die vollständige Versuchscharge der untersuchten Proben demnach insgesamt 12 Probekörper, wobei sich diese genannte Gesamtanzahl hierbei schlussfolgernd auf Basis der drei maßgebenden Versuchsreihen LaPu-Bl, LaPu-Ke und LaPu-Bl-Ke zu je 4 Proben darstellt. Mit weiters vorliegendem Bezug auf die geometrische Ausgestaltung dieser genannten Versuchsreihen, definiert sich ebendiese, entsprechend den Ausführungen aus *Kapitel 6.3.1*, hierbei in Form einer vollständig identen Charakteristik im Vergleich zu den Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung (Versuchsreihen KuPu-Bl, KuPu-Ke und KuPu-Bl-Ke). Im Kontext einer entsprechenden detaillierten Beschreibung der dabei explizit vorhandenen Eigenschaften darf demnach wiederum auf die Inhalte aus *Kapitel 5.3.1* (Abb. 5.6 bis Abb. 5.8) verwiesen werden. Gemäß diesen genannten Ausführungen erfolgt die Detektion der maßgebenden mechanischen Entitäten weiterführend abermals auf Basis eines Lastregimes in Anlehnung an *ÖNORMEN 26891* [17], sowie werden die gegebenen Versuche in detaillierter Form ebenso gemäß *ÖNORMEN 14358* [44] und *ÖNORMEN 12512* [23] ausgewertet, wie demgemäß auch aus *Anhang D* entnommen werden kann.

6.3.2.2 Darstellung der Versuchsergebnisse

Repräsentative Darstellungen der Versuchsergebnisse der Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern können in grafischer Form den nachfolgenden Abbildungen Abb. 6.9, Abb. 6.10 und Abb. 6.11 entnommen werden. Wie aus diesen genannten Abbildungen ersichtlich wird, gliedert sich die Darstellung der Versuchsergebnisse, äquivalent zu den Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung, hierbei in jeweils drei maßgebende Bereiche. So beinhalten die Darstellungen einerseits wiederum die jeweiligen Last-Verschiebungszusammenhänge der vorliegenden Einzelkurven der Proben, sowie andererseits auch die daraus resultierenden Last-Verschiebungszusammenhänge für die Mittelwertkurve und die hieraus abgeleitete analytische Näherungskurve auf Basis von Fittingfunktionen. In diesem Zusammenhang sei dabei weiterführend explizit erwähnt, dass im Vergleich zu den Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung hierbei nicht nur die ursprünglich verwendeten Exponentialfunktionen als Fittingfunktionen zur Anwendung kommen, sondern sich die Ausformulierung der gegebenen Darstellungen aufgrund von kontextuell adäquateren Fittingeigenschaften darüber hinaus auch auf Basis von Potenz- oder Polynomfunktionen

definiert. Basierend auf diesen Zusammenhängen kann demnach schlussfolgernd abermals eine vollständige Interpretation bzw. Charakterisierung des maßgebenden Trag- und Verformungsverhaltens der kleinmaßstäblichen Verbundprobekörper erfolgen, wie demgemäß nachfolgend aus *Kapitel 6.3.2.3* entnommen werden kann.

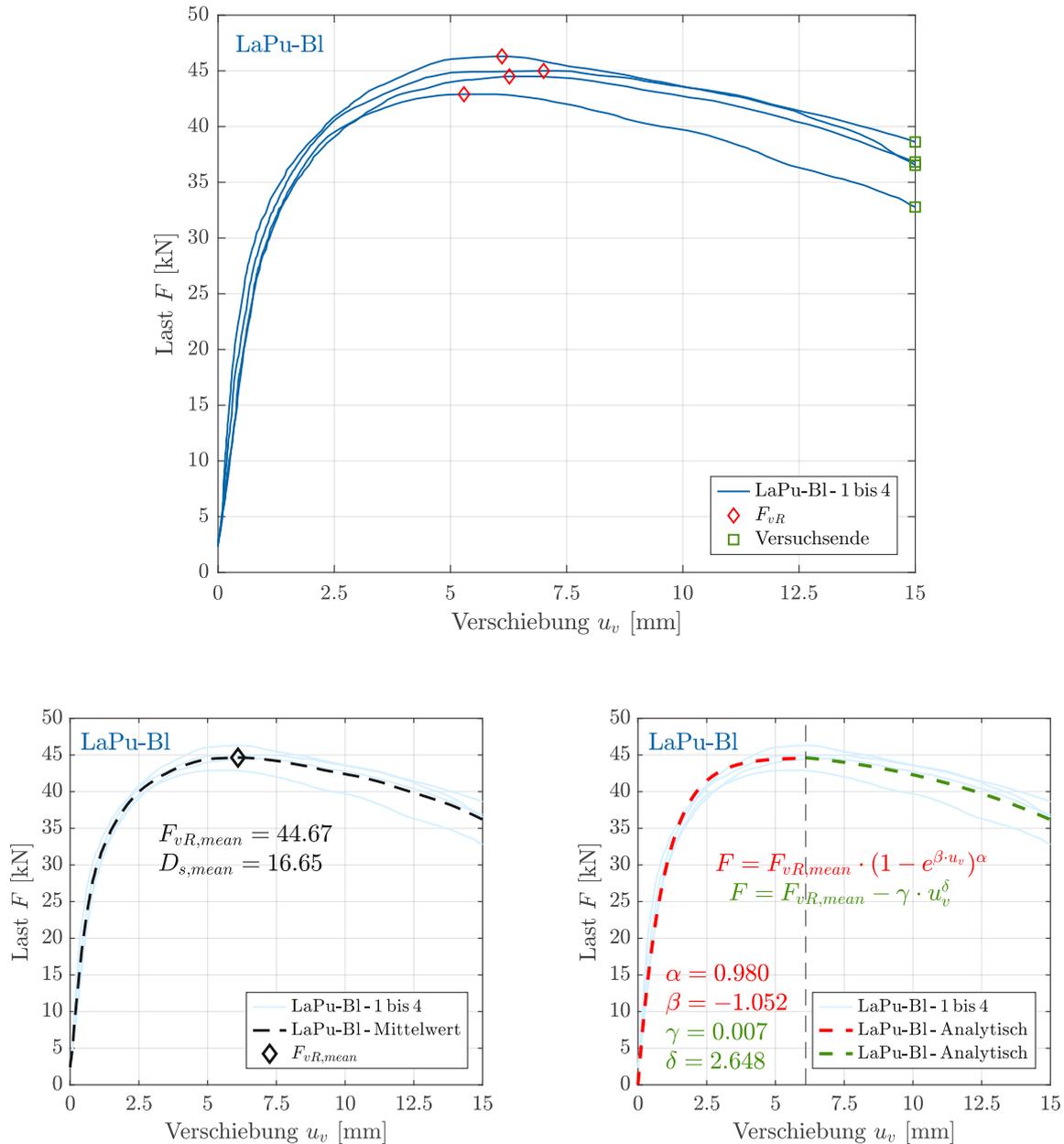


Abb. 6.9: Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe LaPu-BI | Darstellung der Einzelkurven (oben), Darstellung der Mittelwertkurve (unten links), Darstellung der analytischen Kurve (unten rechts)

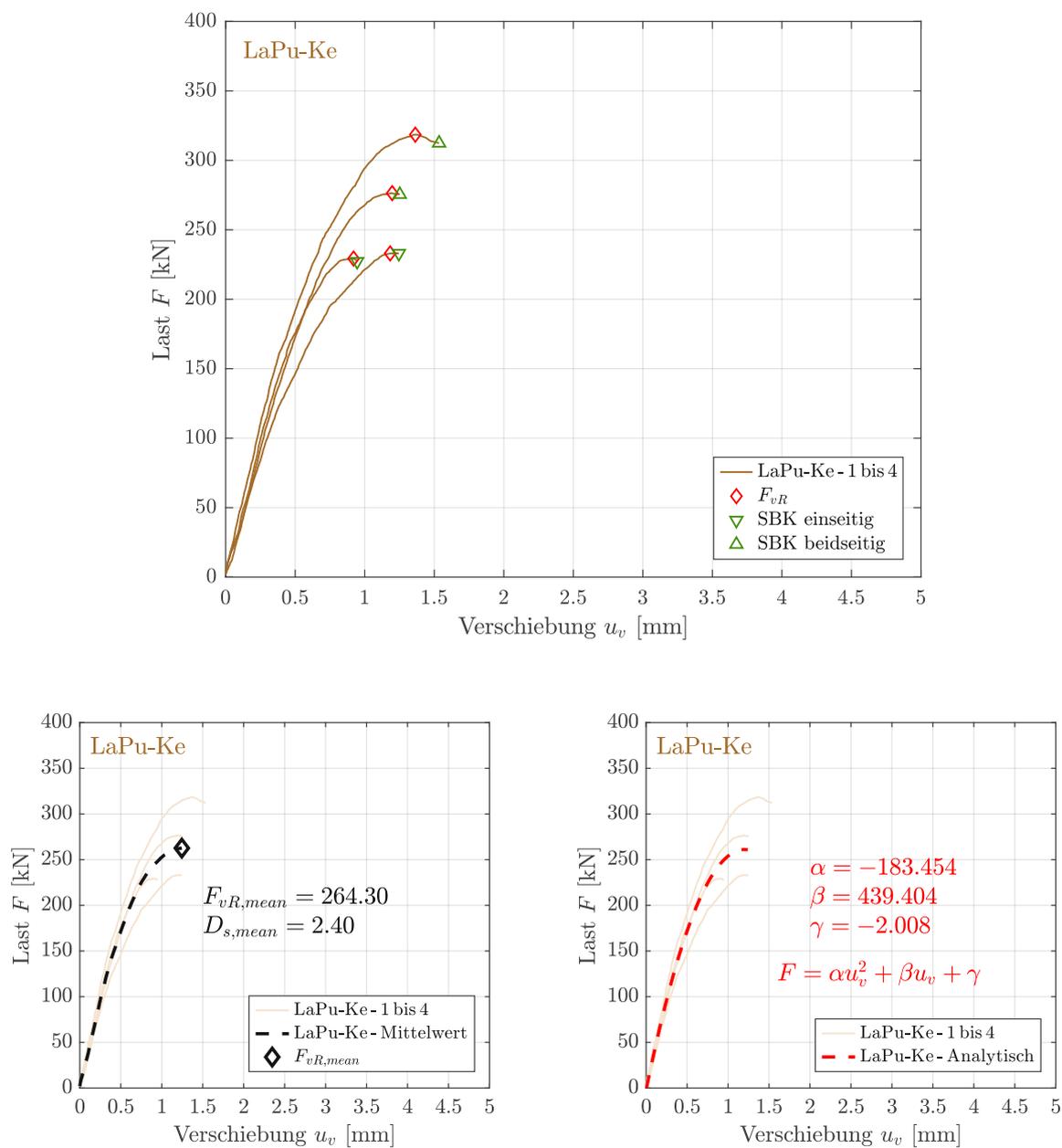


Abb. 6.10: Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe LaPu-Ke | Darstellung der Einzelkurven (oben), Darstellung der Mittelwertkurve (unten links), Darstellung der analytischen Kurve (unten rechts)

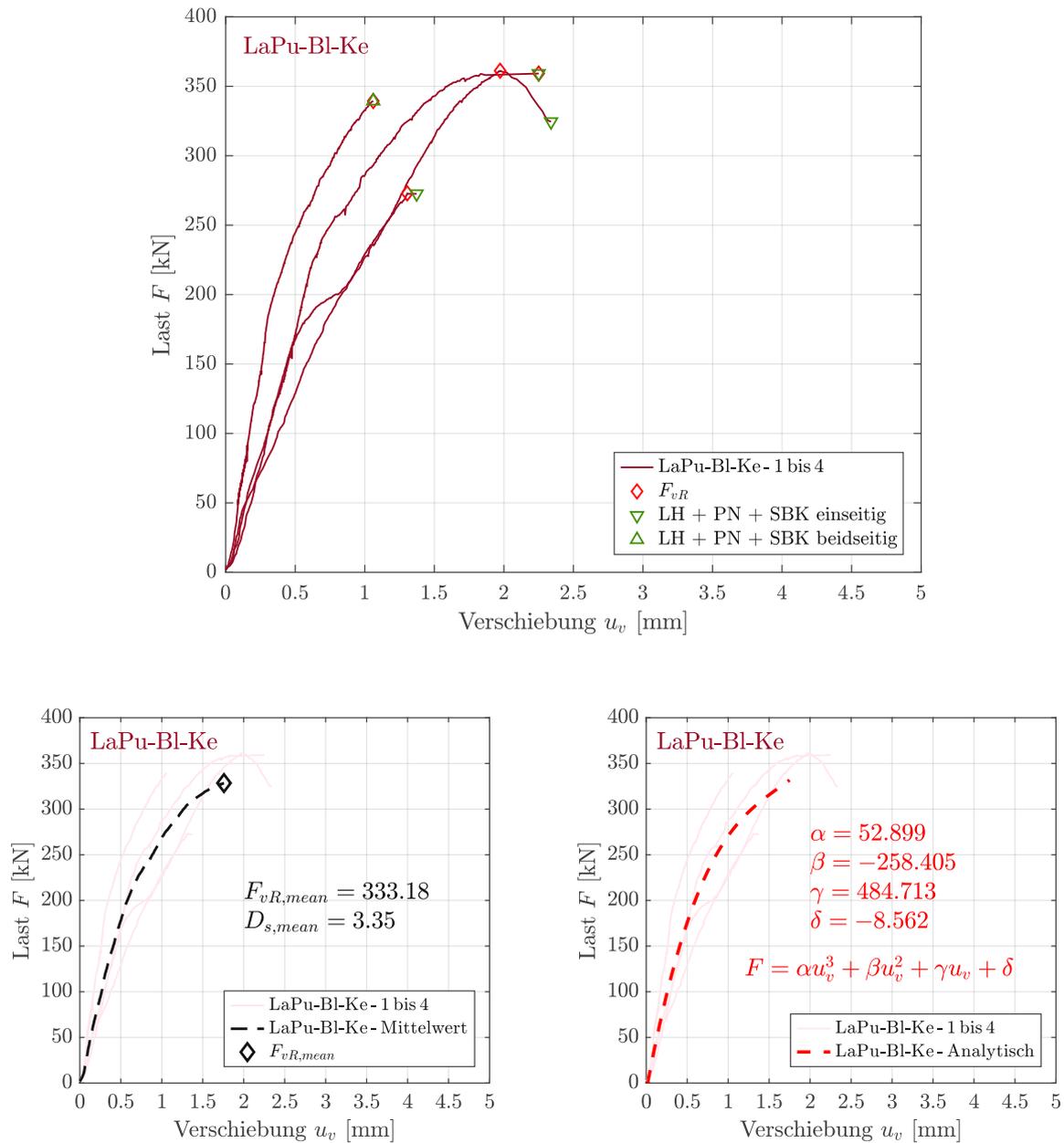


Abb. 6.11: Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe LaPu-BI-Ke | Darstellung der Einzelkurven (oben), Darstellung der Mittelwertkurve (unten links), Darstellung der analytischen Kurve (unten rechts)

6.3.2.3 Interpretation der Versuchsergebnisse

Wie aus den Versuchsergebnissen der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern gemäß Abb. 6.9 bis Abb. 6.11 allgemein ersichtlich wird, charakte-

riert sich das vorliegende Trag- und Verformungsverhalten der Untersuchungen unter Langzeitbeanspruchung durch grundsätzlich ausgeprägte qualitative Ähnlichkeiten im Vergleich zu jenem der Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung. In diesem Sinne weisen die einzelnen Versuchsreihen dabei zwar durchgängig quantitative Unterscheidungsmerkmale auf, die dabei allerdings vorhandenen, so auch bereits in *Kapitel 5.3.3* beschriebenen, generellen Strukturcharakteristiken (hohe Duktilität unter zeitgleich geringer Verbindungssteifigkeit bei den linienförmigen ballistisch vernagelten Puzzle Strip Schublechen bzw. geringe Duktilität unter zeitgleich hoher Verbindungssteifigkeit bei den punktuellen ausgerundeten Kernen ohne zusätzliche Verbindungsmittel zur Abhebesicherung) können in diesem Kontext aber auch für die Untersuchungen unter Langzeitbeanspruchung bestätigt werden, wie ebenso aus der zusammenfassenden Darstellung der Versuchsergebnisse gemäß Abb. 6.12 entnommen werden kann.

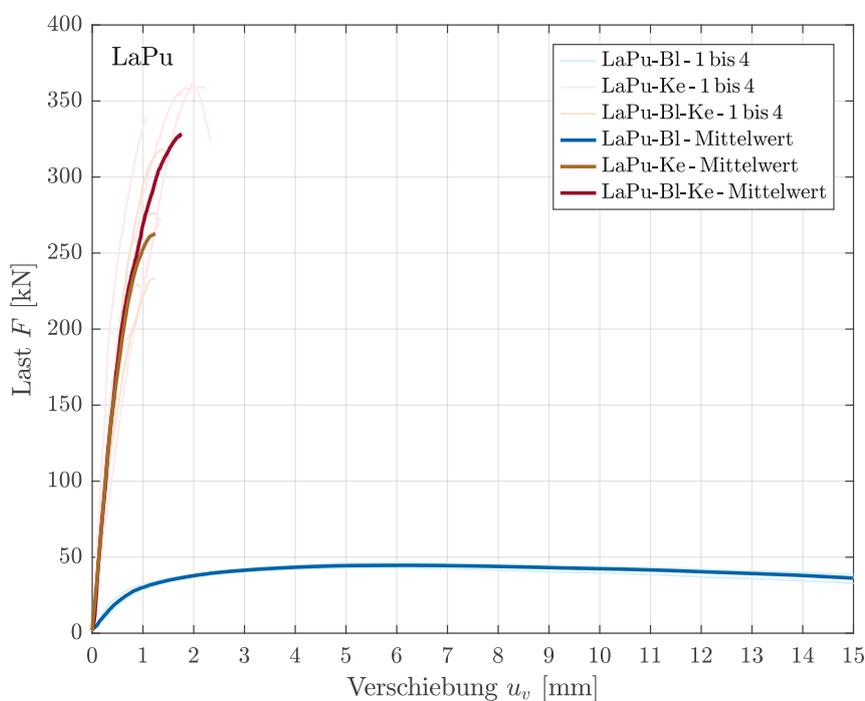


Abb. 6.12: Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Zusammenfassung der Versuchsreihen LaPu-BI, LaPu-Ke und LaPu-BI-Ke

In diesem Zusammenhang definiert sich das allgemeine Trag- und Verformungsverhalten der Versuchstypologie Blech (Versuchsreihe LaPu-BI, Abb. 6.9 bzw. Abb. 6.12), äquivalent zu den Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung, durch ein entsprechend hochduktileres Verhalten bei einer zeitgleich allerdings nur in geringem Maße vorhandenen Tragfähigkeit und Steifigkeit der Verbindung. Konträr dazu, aber wiederum gleichwertig im Vergleich zu den Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung, zeigen sich die Versuchstypologien Kerne und Blech-Kerne (Versuchsreihen LaPu-Ke und LaPu-BI-Ke, Abb. 6.10 und Abb. 6.11 bzw. Abb. 6.12) durch ein entsprechend gegensätzliches Verhalten bestimmt,

als diese beträchtlich verringerte Duktilitäten, gleichzeitig aber wesentlich gesteigerte Tragfähigkeiten und Steifigkeiten der Verbindungen aufweisen können. Mit Bezug auf die hierbei vorhandenen Duktilitäten der Versuchstypologien zeigt sich die Versuchsreihe LaPu-BI gemäß Abb. 6.9 (links unten) demnach durch einen diesbezüglich hohen Mittelwert des Duktilitätsmaßes $D_{s,mean}$ von 16.65 bestimmt, während die Versuchsreihen LaPu-Ke und LaPu-BI-Ke gemäß Abb. 6.10 und Abb. 6.11 (jeweils unten links) vergleichsweise nur wesentlich verringerte Werte (Mittelwerte der Duktilitätsmaße $D_{s,mean} = 2.40$ bzw. 3.35) aufweisen.

Durch den Einsatz einer blechernen Komponente stellt sich demzufolge ein, bereits auch in den Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung festzustellendes, erhöhtes Plastifizierungspotential innerhalb der Versuchsreihen ein, wie weiterführend auch auf Basis einer vergleichenden Betrachtung der Versuchstypologien Kerne und Blech-Kerne deutlich wird. So führt der additive Einsatz der blechernen Komponente (Versuchsreihe LaPu-BI-Ke) demnach zu einem um 40 % gesteigerten mittleren Duktilitätsmaß $D_{s,mean}$ im Vergleich zur rein kernbasierten Versuchstypologie (Versuchsreihe LaPu-Ke), und somit, bei in den beiden Versuchsreihen ähnlicher vorhandener Fließverschiebung u_y , zu einer abermaligen expliziten Erhöhung der maximal erreichbaren Grenzverschiebung u_u . Mit Hinblick auf die vorhandenen mittleren Duktilitätsmaße $D_{s,mean}$ kann demnach schlussfolgernd wiederum ein gewisser vorhandener Interaktionsmechanismus zwischen den beiden typologisch divergenten Schubverbindersystemen Blech und Kerne erkannt werden.

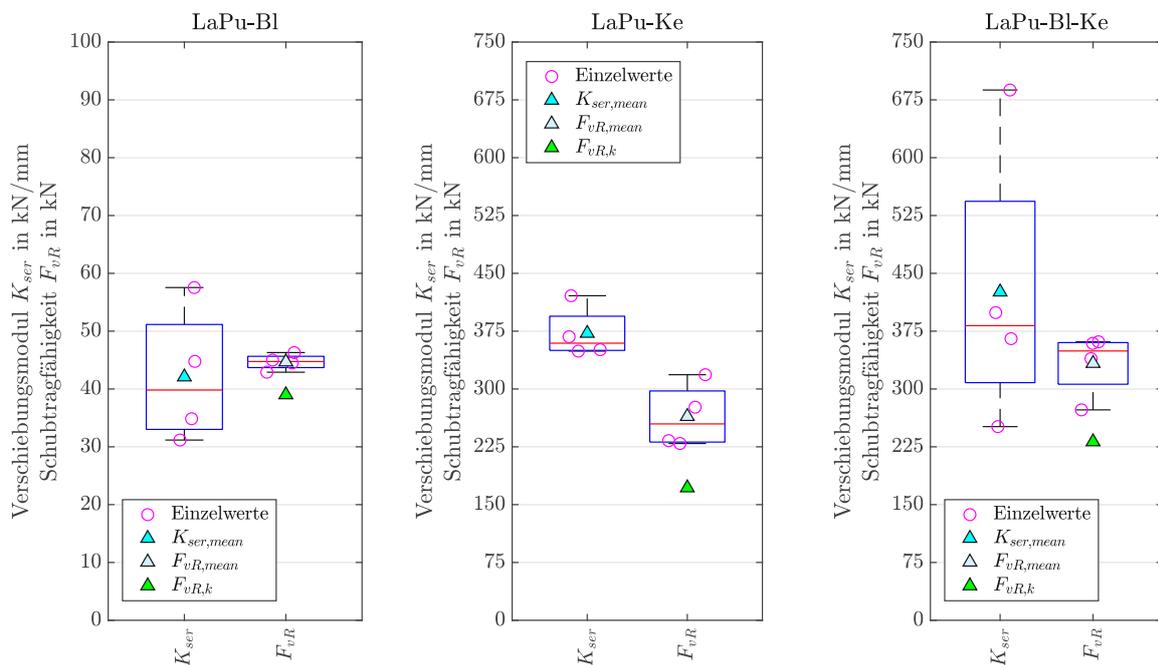


Abb. 6.13: Verschiebungsmoduln K_{ser} und Schubtragfähigkeiten F_{vR} der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe LaPu-BI (links), Versuchsreihe LaPu-Ke (mittig), Versuchsreihe LaPu-BI-Ke (rechts)

Mit darüber hinaus vorliegendem Bezug auf die weiteren kontextuell maßgebenden Größen der Verbindungen im Kontext von Tragfähigkeit und Steifigkeit können die mittleren Verschiebungsmoduln $K_{ser,mean}$, sowie die Mittelwerte der Schubtragfähigkeit $F_{vR,mean}$ und die damit in Verbindung stehenden charakteristischen Schubtragfähigkeiten $F_{vR,k}$ gemäß Abb. 6.13 betrachtet werden. So definiert sich in diesem Zusammenhang die Versuchsreihe LaPu-BI durch einen mittleren Verschiebungsmodul $K_{ser,mean}$ von 42.08 kN/mm, durch einen Mittelwert der Schubtragfähigkeit $F_{vR,mean}$ von 44.67 kN, sowie durch eine charakteristische Schubtragfähigkeit $F_{vR,k}$ von 39.00 kN. Betrachtet man dazu vergleichend die Versuchsreihen LaPu-Ke und LaPu-BI-Ke werden auch in diesem Zusammenhang wiederum die eingangs beschriebenen, erwartbaren konträren Eigenschaften dieser Versuchstypologien erkennbar.

So charakterisiert sich die Versuchsreihe LaPu-Ke demgegenüber durch einen mittleren Verschiebungsmodul $K_{ser,mean}$ von 372.21 kN/mm, durch einen Mittelwert der Schubtragfähigkeit $F_{vR,mean}$ von 264.30 kN und durch eine charakteristische Schubtragfähigkeit $F_{vR,k}$ von 171.78 kN. Die genannte Versuchsreihe LaPu-Ke definiert sich im Vergleich zur Versuchsreihe LaPu-BI demnach, wie qualitativ äquivalent auch schon aus den Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung zu erkennen, durch einen sowohl wesentlich gesteigerten mittleren Verschiebungsmodul $K_{ser,mean}$ (+784 %), als auch durch einen ebenso signifikant erhöhten Mittelwert der Schubtragfähigkeit $F_{vR,mean}$ (+492 %) bzw. durch eine gleichermaßen gesteigerte charakteristische Schubtragfähigkeit $F_{vR,k}$ (+341 %). Ein qualitativ äquivalentes Abbild zeigt sich in diesem Zusammenhang grundsätzlich ebenso mit Bezug auf die Versuchsreihe LaPu-BI-Ke. Vergleicht man in diesem Zusammenhang weiterführend wiederum die Versuchsreihen LaPu-Ke und LaPu-BI-Ke, wird durch den additiven Einsatz einer blechernen Komponente (Versuchsreihe LaPu-BI-Ke) abermalig ein gewisser Interaktionsmechanismus zwischen den beiden Versuchstypologien erkennbar. In diesem Kontext charakterisiert sich die Versuchsreihe LaPu-BI-Ke durch einen mittleren Verschiebungsmodul $K_{ser,mean}$ von 425.82 kN/mm, durch einen Mittelwert der Schubtragfähigkeit $F_{vR,mean}$ von 333.18 kN, sowie durch eine charakteristische Schubtragfähigkeit $F_{vR,k}$ von 231.53 kN. Demnach führt der additive Einsatz einer blechernen Komponente (Versuchsreihe LaPu-BI-Ke) auch mit Bezug auf die Untersuchungen unter Langzeitbeanspruchung zu wiederum maßgeblich gesteigerten mechanischen Eigenschaften im Vergleich zur rein kernenbasierten Versuchstypologie (Versuchsreihe LaPu-Ke). In diesem Zusammenhang kann der mittlere Verschiebungsmodul $K_{ser,mean}$ hierbei um 14 % erhöht werden, sowie zeigen sich der Mittelwert der Schubtragfähigkeit $F_{vR,mean}$ sowie auch die charakteristische Schubtragfähigkeit $F_{vR,k}$ deutlich um 26 % bzw. um 35 % gesteigert. Mit Bezug auf den Interaktionsmechanismus zwischen den typologisch divergenten Schubverbindersystemen kann durch den additiven Einsatz einer blechernen Komponente, äquivalent zu den Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung, demnach nicht nur eine grundsätzlich erhöhte Duktilität, sondern eine ebenso signifikante Erhöhung der vorhandenen Bruchlast F_u festgehalten werden.

Im weiteren Kontext auftretender Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen innerhalb der Versuchsreihen zeichnen sich ebendiese durch ein grundsätzlich äquivalentes Verhalten im Vergleich zu den Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung aus. In diesem Sinne soll daher nachfolgend auch lediglich eine zusammenfassende Beschreibung ebendieser erfolgen, für darüber hinausführende kontextuelle bildliche Darstellungen der genannten

Mechanismen darf weiterführend auf die bereits dargebrachten Inhalte gemäß *Kapitel 5.3.3* verwiesen werden.

Mit konkretem Bezug auf die rein blechbasierte Versuchsreihe LaPu-BI liegt im gegebenen Zusammenhang, wie auch bereits aus den Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung zu erkennen ist, kein expliziter Versagensmechanismus der Verbindung bei einem Erreichen der Bruchlast F_u , sondern lediglich ein im fortschreitenden Versuchslauf vorhandener Schädigungsmechanismus in Form einer Lochleibung der Strukturhölzer (Schädigungsmechanismus LH), sowie einer Plastifizierung der darin vernagelten ballistischen Glattschaftnägel (Schädigungsmechanismus PN) vor. Diese gegebenen Schädigungsmechanismen bilden sich hierbei konstant während des gesamten Versuchsverlaufs aus und können weiterführend wiederum als vollständig symmetrisch an jeweils beiden Scherflächen auftretend beschrieben werden. Die genannte kombiniert auftretende Form von Schädigungsmechanismen definiert sich schlussfolgernd abermalig als maßgebend für die vorhandene hochduktilen Charakteristik der rein blechbasierten Versuchstypologie.

Im Vergleich zu diesen konstant auftretenden Schädigungsmechanismen charakterisiert sich die rein kervenbasierte Versuchsreihe LaPu-Ke demgegenüber, wiederum äquivalent zu den Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung, durch einen plötzlich auftretenden, alleinigen Versagensmechanismus in Form eines Schubversagens des Betons im Ansatz der Kervenflanke (Versagensmechanismus SBK). Dieser gegebene Versagensmechanismus tritt hierbei ausschließlich bei einem Erreichen der Bruchlast F_u bzw. bei einem Erreichen der Schubtragfähigkeit F_{vR} auf und kann darüber hinaus abermalig als teilweise symmetrisch an beiden Scherflächen, sowie teilweise antimetrisch an nur einer Scherfläche auftretend beschrieben werden. Im konträren Vergleich zu den vorhandenen Schädigungsmechanismen der rein blechernen Versuchstypologie LaPu-BI definiert sich die genannte gegebene Form von Versagensmechanismus schlussfolgernd als wiederum maßgebend für die vorhandene spröde Charakteristik der rein kervenbasierten Versuchstypologie.

Wie demnach vorgegeben, können für die beiden rein blech- bzw. rein kervenbasierten Versuchstypologien jeweils divergente charakteristische Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen festgestellt werden. Gemäß diesen Charakteristiken stellt sich für die kombinierte, blech- und kervenbasierte Versuchsreihe LaPu-BI-Ke schlussfolgernd, wie auch schon in den Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung gezeigt, eine entsprechende Kombination aus diesen vorgestellten Schädigungsmechanismen bzw. aus diesem aufgezeigten Versagensmechanismus ein. In diesem Kontext charakterisiert sich diese Versuchsreihe im Detail durch einen mit fortschreitendem Versuchsverlauf zunehmenden kombinierten Schädigungsmechanismus (Schädigungsmechanismen LH+PN, charakteristisch für die blechbasierte Komponente), und ist dieser gefolgt von einem bei Bruchlast F_u bzw. Schubtragfähigkeit F_{vR} auftretenden Versagensmechanismus (SBK, charakteristisch für die kervenbasierte Komponente), welcher äquivalent zur Versuchsreihe LaPu-Ke teilweise symmetrisch an beiden Scherflächen, sowie teilweise antimetrisch an nur einer Scherfläche in Erscheinung tritt. Diese kombiniert auftretende Form von vorhandenen Schädigungs- und Versagensmechanismen definiert sich demnach abschließend abermalig als maßgebend für die gegebene Charakteristik der kombinierten blech- und kervenbasierten Versuchstypologie.

6.3.2.4 Vergleich der Versuchsergebnisse unter Kurz- und Langzeitbeanspruchung

Unter der Berücksichtigung der Versuchsergebnisse der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern unter Kurz- und Langzeitbeanspruchung gemäß Kapitel 5.3 bzw. Kapitel 6.3.2 kann abschließend ein komparativer Vergleich der hierbei jeweils vorhandenen mechanischen Eigenschaften und Entitäten stattfinden, wie kumulativ dargestellt auch aus nachfolgender Abb. 6.14 entnommen werden kann.

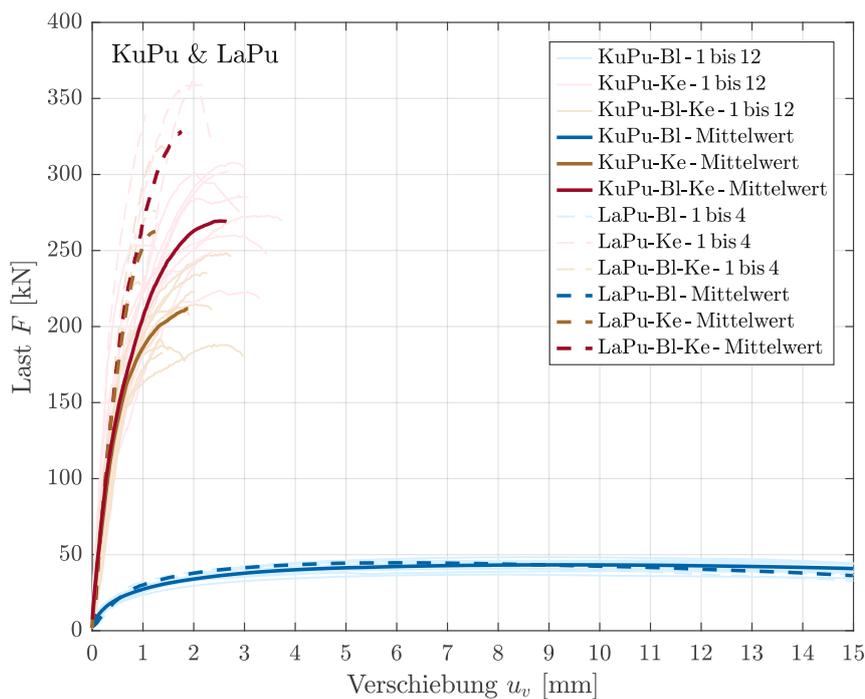


Abb. 6.14: Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Zusammenfassung der Versuchsreihen KuPu-BI, KuPu-Ke und KuPu-BI-Ke sowie LaPu-BI, LaPu-Ke und LaPu-BI-Ke

Wie aus Abb. 6.14 ersichtlich, definieren sich die resultierenden Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche unter Kurz- und Langzeitbeanspruchung (KuPu und LaPu), wie auch bereits eingangs erwähnt, durch qualitativ grundsätzlich ähnliche Charakteristiken, weisen in ihrer dabei vorhandenen quantitativen Ausprägung darüber hinaus jedoch moderate bis teilweise maßgebliche Unterscheidungsmerkmale auf. In diesem Sinne zeigen sich die Versuchsreihen KuPu-BI und LaPu-BI hierbei durch ein im Allgemeinen sehr ähnliches Last-Verschiebungs-Verhalten im gesamten Verschiebungsbereich bestimmt, während die Versuchsreihen KuPu-Ke und LaPu-Ke bzw. die Versuchsreihen KuPu-BI-Ke und LaPu-BI-Ke demgegenüber allerdings deutliche Unterschiede in ihrem jeweiligen Last-Verschiebungs-Verhalten im Bereich mittlerer bis höchster Verschiebungen u_v aufweisen. Basierend auf diesen Zusammenhängen kann ein maßgeblicher Einfluss des zeitlichen Verlaufs (Betrachtung der zeitlichen Langzeit Ebene im Vergleich zur zeitlichen Kurzzeit Ebene) auf das explizite Trag- und Verformungsverhalten schlussfolgernd im

Speziellen für die kernenbasierten Versuchstypologien (KuPu-Ke und LaPu-Ke bzw. KuPu-BI-Ke und LaPu-BI-Ke) festgehalten werden, während für den darüber hinaus vorliegenden Fall der rein blechbasierten Versuchstypologien (KuPu-BI und LaPu-BI) demgegenüber nur verhältnismäßig geringere zeitliche Entitätsänderungen abgeleitet werden können, wie auch nachfolgend aus Abb. 6.15 ersichtlich wird.

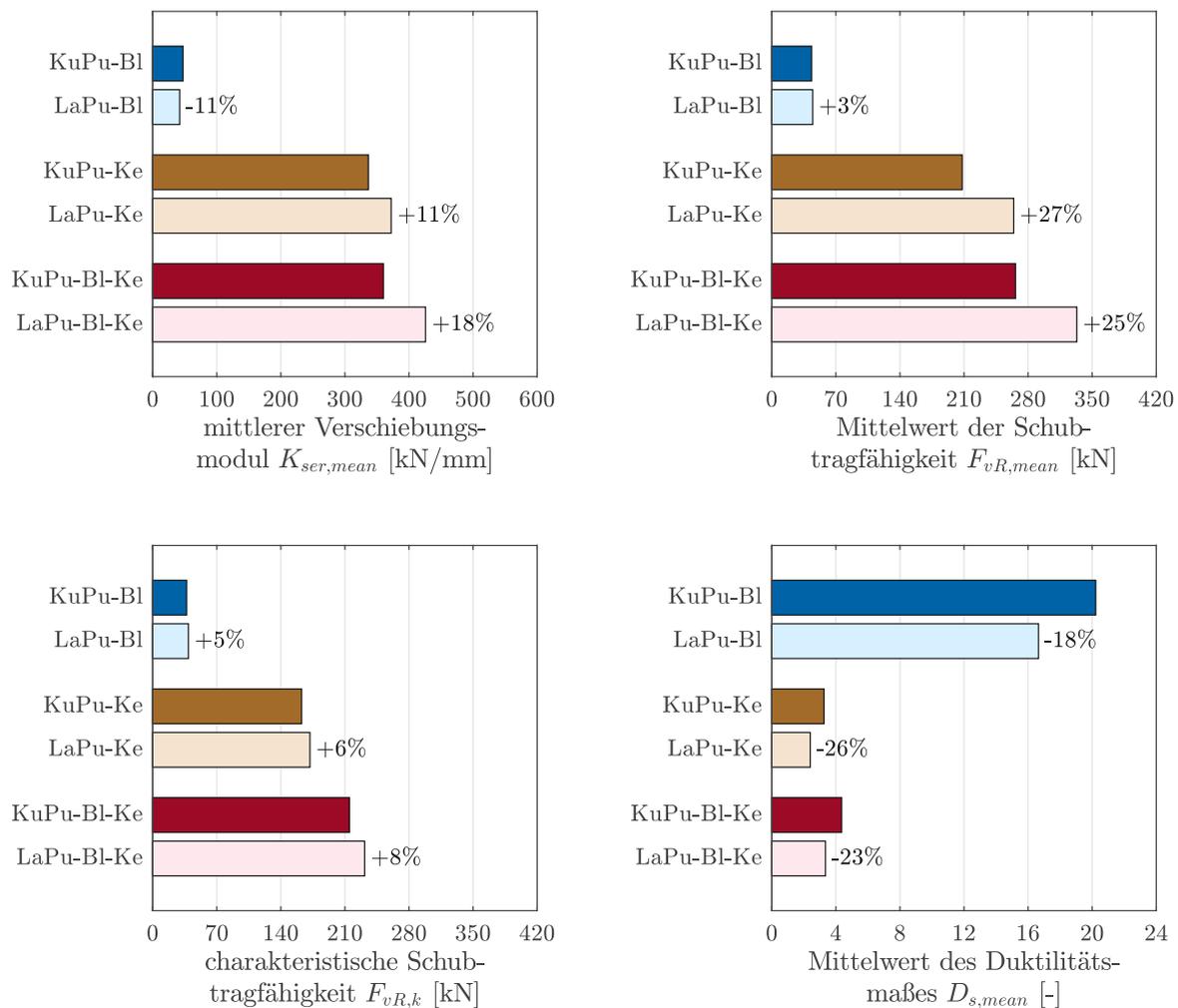


Abb. 6.15: Vergleich der maßgebenden mechanischen Entitäten der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern unter Kurz- und Langzeitbeanspruchung | mittlerer Verschiebungsmodul $K_{ser,mean}$ (oben links), Mittelwert der Schubtragfähigkeit $F_{vR,mean}$ (oben rechts), charakteristische Schubtragfähigkeit $F_{vR,k}$ (unten links), Mittelwert des Duktilitätsmaßes $D_{s,mean}$ (unten rechts)

Unter der Berücksichtigung des genannten zeitlichen Verlaufs zeigt sich mit konkretem Bezug auf die rein blechbasierten Versuchsreihen KuPu-BI und LaPu-BI hierbei eine Reduktion des mittleren Verschiebungsmoduls $K_{ser,mean}$ von 47.32 auf 42.08 kN/mm (-11%),

sowie eine Erhöhung des Mittelwerts der Schubtragfähigkeit $F_{vR,mean}$ von 43.50 auf 44.67 kN (+3%), als auch eine Steigerung der charakteristischen Schubtragfähigkeit $F_{vR,k}$ von 37.06 auf 39.00 kN (+5%). Im weiters vorliegenden Kontext einer vorhandenen Duktilität dieser Versuchsreihen kann unter der Berücksichtigung der zeitlichen Randbedingungen darüber hinaus eine Reduktion des Mittelwerts des Duktilitätsmaßes $D_{s,mean}$ von 20.22 auf 16.65 (-18%) festgestellt werden. Das gegebene Plastifizierungspotential der rein blechernen Versuchstypologie nimmt mit einem Fortschreiten der zeitlichen Komponente demgemäß nachweisbar ab.

Mit darüber hinaus vorliegendem Bezug auf die rein kervenbasierten Versuchsreihen KuPu-Ke und LaPu-Ke kann für die gegebenen Zusammenhänge des Weiteren eine Steigerung des mittleren Verschiebungsmoduls $K_{ser,mean}$ von 336.58 auf 372.21 kN/mm (+11%), sowie eine Erhöhung des Mittelwerts der Schubtragfähigkeit $F_{vR,mean}$ von 208.00 auf 264.30 kN (+27%), als auch ein Anstieg der charakteristischen Schubtragfähigkeit $F_{vR,k}$ von 162.71 auf 171.78 kN (+6%) festgestellt werden. Demgemäß definieren sich diese Versuchsreihen im Kontext der eben beschriebenen mechanischen Entitäten durch grundsätzlich vollumfänglich erhöhte Größen, wobei in diesem Zusammenhang vor allem aber der allgemeine Anstieg der Schubtragfähigkeit F_{vR} ($F_{vR,mean}$ um +27% bzw. $F_{vR,k}$ um +6%) hervorgehoben werden soll. In diesem Sinne kann der Mittelwert der Schubtragfähigkeit $F_{vR,mean}$ auf Basis der zeitlichen Randbedingungen somit um mehr als ein Viertel seines ursprünglichen Werts gesteigert werden und liegt schlussfolgernd abschließend in einem deutlich erhöhten Bereich. Qualitativ ähnlich verhält es sich darüber hinaus grundsätzlich ebenso mit Bezug auf die charakteristische Schubtragfähigkeit $F_{vR,k}$. Diese stellt im konträren Kontext zum Mittelwert der Schubtragfähigkeit $F_{vR,mean}$ allerdings eine explizit statistische Größe dar, weshalb deren vorhandene Steigerung aufgrund einer maßgeblich reduzierten Probenanzahl n der Untersuchungen unter Langzeitbeanspruchung im Vergleich zu den Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung, und einem deshalb vergleichsweise erhöhten Fraktilenfaktor, schlussfolgernd aber auch deutlich geringer ausfällt. Unter der Berücksichtigung dieser genannten Umstände kann die gegebene Erhöhung der charakteristischen Schubtragfähigkeit $F_{vR,k}$ grundsätzlich aber ebenso als durchaus maßgebend bezeichnet werden. Mit darüber hinaus weiterführendem Bezug auf die vorhandene Duktilität der beschriebenen Versuchsreihen kann in diesem Kontext, ähnlich wie bei den rein blechbasierten Versuchstypologien, eine wiederum deutliche Abnahme des Mittelwerts des Duktilitätsmaßes $D_{s,mean}$ von 3.26 auf 2.40 (-26%) festgehalten werden. Das gegebene Plastifizierungspotential der rein kervenbasierten Versuchstypologie nimmt demgemäß, äquivalent zu dem rein blechbasierten Versuchstypologie, mit einem entsprechenden Fortschreiten der zeitlichen Komponente schlussfolgernd maßgeblich ab.

Mit darüber hinausgehendem Bezug auf die kombiniert ausgeführten, blech- und kervenbasierten Versuchsreihen KuPu-BI-Ke und LaPu-BI-Ke können mit Hinblick auf die dabei vorliegenden maßgebenden mechanischen Entitäten weiterführend grundsätzlich qualitativ sehr ähnliche Charakteristika wie bei den bereits beschriebenen rein kervenbasierten Versuchsreihen KuPu-Ke und LaPu-Ke festgestellt werden. In diesem Sinne zeigt sich der mittlere Verschiebungsmodul $K_{ser,mean}$ hierbei durch eine Erhöhung von 360.04 auf 425.82 kN/mm (+18%) bestimmt, sowie weisen der Mittelwert der Schubtragfähigkeit $F_{vR,mean}$ als auch die charakteristische Schubtragfähigkeit $F_{vR,k}$ dabei ebenso entsprechende Steigerungen von 266.28 auf 333.18 kN (+25%) bzw. von 214.85 auf 231.53 kN (+8%)

auf. Demgemäß zeichnen sich diese Versuchsreihen im Kontext der eben beschriebenen mechanischen Entitäten wiederum durch grundsätzlich vollumfänglich erhöhte Größen aus, wobei, neben der moderaten Steigerung des mittleren Verschiebungsmoduls $K_{ser,mean}$, in diesem Zusammenhang vor allem aber der allgemeine Anstieg der Schubtragfähigkeit F_{vR} ($F_{vR,mean}$ um +25% bzw. $F_{vR,k}$ um +8%) wiederum als maßgeblich hervorgehoben werden soll. Äquivalent zu den Versuchsreihen KuPu-Ke und LaPu-Ke kann der Mittelwert der Schubtragfähigkeit $F_{vR,mean}$ auf Basis der zeitlichen Randbedingungen somit auch bei den Versuchsreihen KuPu-Bl-Ke und LaPu-Bl-Ke um ein ganzes Viertel seines ursprünglichen Werts gesteigert werden und liegt schlussfolgernd abschließend abermals in einem beträchtlich erhöhten Bereich. Gleiches gilt darüber hinaus ebenso wiederum für die charakteristische Schubtragfähigkeit $F_{vR,k}$, als sich diese, wie bereits eingangs beschrieben, als explizite statistische Größe mit erhöhten Fraktilefaktor darstellt, und sich dessen vergleichsweise nur geringe Erhöhung demnach aber zum wiederholten Mal als trotzdem grundsätzlich maßgebend beschreiben lässt. Betrachtet man im weiterführenden Kontext nebstdem die vorhandene Duktilität der beschriebenen Versuchsreihen, zeigt sich hierbei, äquivalent zu den anderen bereits dargebrachten Versuchstypologien, abermalig eine deutliche Abnahme des Mittelwerts des Duktilitätsmaßes $D_{s,mean}$ von 4.36 auf 3.35 (-23%). In diesem Sinne nimmt schlussfolgernd auch das vorhandene Plastifizierungspotential der kombiniert ausgeführten, blech- und kervenbasierten Versuchstypologie mit einem entsprechenden Fortschreiten der zeitlichen Komponente demgemäß maßgeblich ab. Zeigen sich die mechanischen Entitäten in Form des mittleres Verschiebungsmodul $K_{ser,mean}$, des Mittelwerts der Schubtragfähigkeit $F_{vR,mean}$ und der charakteristischen Schubtragfähigkeit $F_{vR,k}$ konklusiv durch grundsätzlich variierende zeitliche Entwicklungen bestimmt, kann mit Bezug auf den Mittelwert des Duktilitätsmaßes $D_{s,mean}$ demgegenüber somit eine einheitliche zeitabhängige Reduktion dieser genannten Größe festgestellt werden. Eine Abnahme des Duktilitätsmaßes $D_{s,mean}$ bei einem entsprechenden Fortschreiten der zeitlichen Komponente kann schlussfolgernd abschließend als grundsätzliches wesentliches Charakteristikum aller betrachteten Versuchsreihen bezeichnet werden.

6.4 Experimentelle und analytische Untersuchungen an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern

Wie die gegebene Nomenklatur bereits zum Ausdruck bringt, umfassen die experimentellen und analytischen Untersuchungen an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern alle Forschungsinhalte mit Bezug auf die strukturell maßgebende großmaßstäbliche Skalenebene, wobei diese im engeren Sinne dabei eine weiterführend grundsätzlich äquivalente Versuchssystematik wie die bereits dargebrachten experimentellen und analytischen Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern gemäß *Kapitel 6.3* aufweisen. Dahingehend werden hierbei zu Beginn wiederum experimentelle Dauerlastversuche (Dauer 1 Jahr) an, diesmal großmaßstäblichen, symmetrischen Biegeträgern der drei maßgebenden divergenten Typologien von Schubverbindern Blech, Kerne und Blech-Kerne (LaTr-Bl, LaTr-Ke und LaTr-Bl-Ke) durchgeführt und weiterführend hinsichtlich ihres dabei vorhandenen Kriechverhaltens analytisch bewertet und vergleichend analysiert. Ziel dieses Forschungsgegenstands soll es hierbei abermalig sein, einerseits das generelle zeitabhängige

Kriechverhalten der einzelnen Typologien allgemein zu identifizieren, sowie andererseits im Speziellen auch den Einfluss variierender klimatischer Randbedingungen (variierende relative Luftfeuchtigkeit RH unter konstanter Temperatur T) auf ebendieses zu detektieren. In diesem Sinne werden wiederum die unter Dauerlast und definierten Klimabedingungen auftretenden vertikalen Verschiebungen u_v der Proben erfasst und die daraus resultierenden Kriechzahlen φ für den Lebenszyklus (Dauer 50 Jahre) analytisch abgeleitet. Spezieller Fokus liegt hierbei, wie bereits einleitend beschrieben, abermals auf dem Einfluss einer variierenden relativen Luftfeuchtigkeit, weshalb die Untersuchungen grundsätzlich unter einem definierten zyklischen Wechselklima durchgeführt werden. Unter der Berücksichtigung dieser allgemeinen Randbedingungen soll es demnach wiederholt möglich werden separierte resultierende Kriechzahlen für eine konstante relative Luftfeuchtigkeit RH (Grundkriechzahl $\varphi_{gr} = \frac{u_{v,gr}}{u_{v,el}}$) und eine zyklisch variierende relative Luftfeuchtigkeit RH (mechanosorptive Kriechzahl $\varphi_{ms} = \frac{u_{v,ms}}{u_{v,el}}$) zu generieren und deren Anteilmäßigkeiten an der Kriechzahl φ ($\varphi = \varphi_{gr} + \varphi_{ms} = \frac{u_{v,gr} + u_{v,ms}}{u_{v,el}}$) qualitativ und quantitativ zu bewerten. Wie auch bereits für die experimentellen und analytischen Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern arrangiert, werden im Anschluss an diese Dauerlastversuche wiederum experimentelle Bruchversuche, äquivalent zu den Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung, an den genannten großmaßstäblichen symmetrischen Biegeträgern durchgeführt. Demnach werden abermalig vorhandene mechanische Eigenschaften festgehalten und weiterführend mit speziellem Fokus auf die verbleibende Resttragfähigkeit der Strukturtypologien nach gegebener Dauerbelastung analysiert. In diesem Sinne werden die alleinstehenden und kombinierten holistischen Eigenschaften der einzelnen Schubverbindersysteme (systemindividuelles Trag- und Verformungsverhalten, auftretende Interaktions-, Schädigungs- und Versagensmechanismen) einerseits wiederum identifiziert und charakterisiert, sowie andererseits auch im Kontext der Untersuchungsergebnisse der Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung vergleichend analysiert und bewertet. Explizites Ziel dieses Forschungsgegenstands soll es schlussfolgernd demnach abermalig sein, die vorhandenen mechanischen Entitäten der untersuchten Strukturtypologien nicht nur allgemein zu erfassen, sondern diese im Speziellen auch im Vergleich zu den Eigenschaften unter Kurzzeitbeanspruchung komparativ gegenüberzustellen.

6.4.1 Dauerlastversuche

6.4.1.1 Versuchskonzeption

Wie bereits eingangs beschrieben, charakterisiert sich die kontextuelle Versuchskonzeption der experimentellen Dauerlastversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern, äquivalent zu den experimentellen Dauerlastversuchen an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern, im Allgemeinen durch dementsprechende Zeitstandsversuche unter konstanter Last p , konstanter Temperatur T und zyklisch variierender relativer Luftfeuchtigkeit RH . Die hierbei applizierte vollständige Versuchscharge umfasst dabei, wie ebenfalls bereits einleitend erwähnt, insgesamt 12 Probekörper, wobei diese Gesamtanzahl hierbei aus den drei maßgebenden Versuchsreihen La-Tr-BI, La-Tr-Ke und La-Tr-BI-Ke zu je 4 Proben resultiert. Die geometrische Ausgestaltung dieser genannten Versuchsreihen definiert sich dabei weiterführend durch eine grundsätzlich vollständig idente Charakteristik im Vergleich zu

den Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung (KuTr-Bl, KuTr-Ke und KuTr-Bl-Ke), im Sinne einer grafischen Darstellung der Versuchstypologien darf demnach schlussfolgernd auch auf die Inhalte aus *Kapitel 5.4.1* (Abb. 5.16 bis Abb. 5.18) verwiesen werden.

Mit Bezug auf die definierten äußeren Randbedingungen innerhalb des Versuchsablaufs (konstante Last p , konstante Temperatur T und zyklisch variierende relative Luftfeuchtigkeit RH) erfolgt die versuchstechnische Bereitstellung dieser Entitäten auf Basis von konventionellen Zeitstandsversuchsapparaturen, welche darüber hinaus in einem eigens hierfür errichteten Großklimaraum situiert werden. Eine konzeptionelle Übersicht zu diesem genannten strukturellen Aufbau kann weiterführend auch aus nachfolgender Abb. 6.16 entnommen werden.

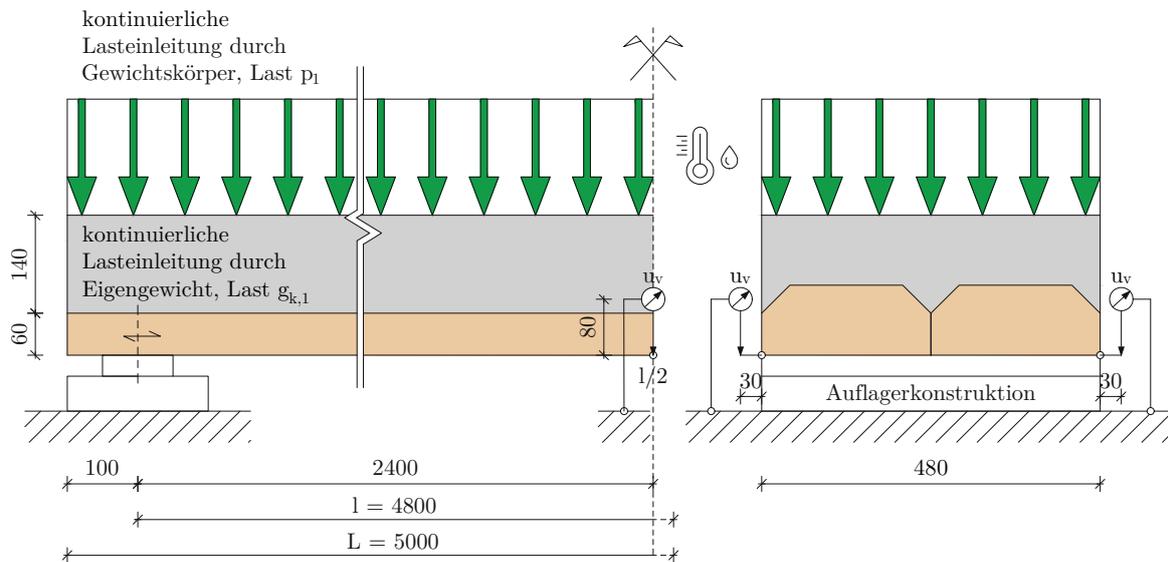


Abb. 6.16: Übersicht zum Versuchsaufbau der experimentellen Dauerlastversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Ansichten (links und rechts)

Wie aus Abb. 6.16 ersichtlich, werden die verwendeten Zeitstandsversuchsapparaturen im Allgemeinen anhand von konventionellen großmaßstäblichen Auflagerkonstruktionen mit darüber hinaus vorhandenen Gewichtungskörpern zur Lasteinleitung realisiert. In diesem Sinne wird auf Basis des Eigengewichts $g_{k,1}$ der eigentlichen Tragstruktur, sowie anhand der durch die aufgebracht Gewichtungskörper applizierten Last p_1 eine kumulative flächenförmige Last $p = g_{k,1} + p_1$ auf die jeweiligen Proben erzeugt, wodurch schlussfolgernd somit eine zielgerichtete Dauerlast auf die jeweiligen Probekörper erreicht werden kann. Das in diesem Kontext hierbei applizierte Lastniveau stellt sich darüber hinaus grundsätzlich auf Basis eines konventionellen baupraktischen Einwirkungskonzepts dar, welches sich durch eine gegebene resultierende Flächenlast p von $p = 6.72 \text{ kN/m}^2$ für die drei maßgebenden Versuchsreihen LaTr-Bl, LaTr-Ke und LaTr-Bl-Ke ausdrücken lässt. Im Detail definiert sich die Quantität dieser, für alle Versuchsreihen identen, Größe hierbei auf Basis eines für das Verformungsverhalten unter Langzeitbeanspruchung maßgebenden Lastniveaus unter quasi-ständiger Einwirkungskombination ($E_{d,qs} = \sum_{i \geq 1} g_{k,i} + \sum_{j \geq 1} \Psi_{2,j} \cdot q_{k,j}$), wobei sich die zusätzlich aufgebracht Flächenlast p_1 von $p_1 = 3.76 \text{ kN/m}^2$ weiterführend (ohne Be-

rücksichtigung des Eigengewichts $g_{k,1}$ der eigentlichen Tragstruktur von $g_{k,1} = 2.96 \text{ kN/m}^2$) demnach anhand des Zusammenhangs $p_1 = g_{k,2} + \Psi_2 \cdot (q_{k,1} + q_{k,2})$ für eine vorhandene Ausbaulast $g_{k,2}$ von $g_{k,2} = 2.5 \text{ kN/m}^2$, eine Nutzlast $q_{k,1}$ (Nutzlast der Kategorie B2 gemäß *ÖNORMEN 1991-1-1* [62]) von $q_{k,1} = 3.0 \text{ kN/m}^2$ und einen Trennwandzuschlag $q_{k,2}$ von $q_{k,2} = 1.2 \text{ kN/m}^2$ unter der jeweiligen Verwendung eines Kombinationsbeiwerts Ψ_2 (Kombinationsbeiwert für die Kategorien A und B gemäß *ÖNORMEN 1990* [18]) von $\Psi_2 = 0.3$ ableiten lässt.

Mit weiterem Hinblick auf die Detektion der zeitabhängigen Holzfeuchte u innerhalb der Proben stellt die messtechnische Erfassung ebendieser Entität, äquivalent zu den Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern, einen zentralen Punkt in der versuchstechnischen Umsetzung der großmaßstäblichen Untersuchungen dar. Die messtechnische Realisierung erfolgt hierbei wiederum anhand von widerstandsbasierten Holzfeuchtemessungen an mehreren Punkten der einzelnen Proben, wobei deren Lage aufgrund der Verwendung von fixierten Messelektroden gleichfalls fest definiert ist. Als maßgebende Punkte werden in diesem Zusammenhang dabei weiterführend die Kernbereiche der einzelnen Strukturhölzer in deren Feldmitte, sowie in deren jeweiligen Auflagerbereichen festgelegt, wie nachfolgend auch aus Abb. 6.17 ersichtlich wird. Hierzu sei darüber hinaus außerdem erwähnt, dass die explizite Positionierung der maßgebenden Punkte für die einzelnen Versuchsreihen LaTr-BI, LaTr-Ke und LaTr-BI-Ke systembedingt grundsätzlich ident ausgeführt ist, die nachfolgende Abbildung stellt dementsprechend auch nur die Positionierung der Versuchsreihe LaTr-BI als allgemein exemplarisches Beispiel dar.

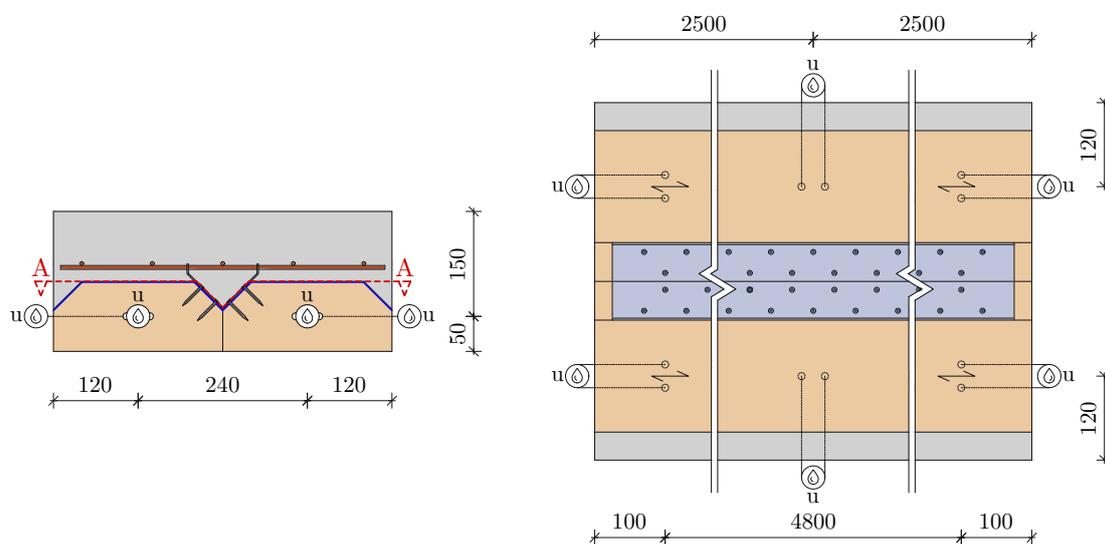


Abb. 6.17: Übersicht zum Versuchsaufbau der experimentellen Dauerlastversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Messpunkte der Holzfeuchtemessungen | Versuchsreihe LaTr-BI

Mit darüber hinaus vorliegendem Bezug auf die in der Versuchsdurchführung vorhandenen zeitabhängigen klimatischen Randbedingungen können diese als grundsätzlich ident im Vergleich zu den Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern beschrieben

werden. Diese definieren sich demnach, wie auch bereits einleitend erwähnt, anhand einer konstanten Temperatur T , sowie einer zyklisch variierenden relativen Luftfeuchtigkeit RH , wie ebenso aus den nachfolgenden Abbildungen Abb. 6.18, Abb. 6.19 und Abb. 6.20 (jeweils unten) ersichtlich wird. Der festgelegte Zeitverlauf der Temperatur T charakterisiert sich schlussfolgernd wiederum durch einen fixierten Wert von $T = 23\text{ }^\circ\text{C}$, und zeigt sich jener der relativen Luftfeuchtigkeit RH abermals durch zyklische, jeweils alternierende Plateaus von $RH = 40\%$ (Trockenphasen) und $RH = 80\%$ (Feuchtphasen) bestimmt.

Die in diesem Zusammenhang vorhandene Zeitdauer der einzelnen Plateaus definiert sich dabei, wie auch schon bei den Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern beschrieben, grundsätzlich in Abhängigkeit des jeweiligen expliziten Untersuchungsgegenstands in Form der Ableitung der Grundkriechzahl φ_{gr} oder der mechanosorptiven Kriechzahl φ_{ms} . So zeigt sich der allgemeine Zeitverlauf der relativen Luftfeuchtigkeit RH in diesem Kontext abermalig durch eine beginnende, äußerst lang andauernde Trockenphase (0 bis 123 d) bestimmt und wird dieser erst an diese anschließend durch entsprechend kürzere Feucht- und Trockenphasen (123 bis 365 d) ergänzt. Durch die Applikation dieser festgelegten unterschiedlichen Plateauphasen soll es schlussfolgernd demnach wiederum möglich werden einerseits sowohl die zu Beginn vorhandenen Grundkriechzahlen φ_{gr} der Versuchsreihen (auf Basis der beginnenden Trockenphase für die ersten 123 d), als andererseits auch die mechanosorptiven Kriechzahlen φ_{ms} der einzelnen Versuchstypologien (auf Basis der anschließenden alternierenden Feucht- und Trockenphasen für die nachfolgenden 242 d) abzuleiten. In diesem Sinne kann folglich abermalig eine vollständige Beschreibung der gesamten Kriechzahl φ im Kontext ihrer jeweiligen Anteilsmäßigkeiten abschließend erfolgen.

6.4.1.2 Darstellung der Versuchsergebnisse

Repräsentative Darstellungen der Versuchsergebnisse der Dauerlastversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern können in grafischer Form den nachfolgenden Abbildungen Abb. 6.18, Abb. 6.19, Abb. 6.20 und Abb. 6.21 entnommen werden.

Wie aus einer genaueren Betrachtung der genannten Abbildungen Abb. 6.18 bis Abb. 6.21 ersichtlich wird, gliedert sich die Darstellung der Versuchsergebnisse hierbei in grundsätzlich zwei maßgebende Bereiche. So werden einerseits die Versuchsergebnisse der expliziten einzelnen Versuchsreihen dargestellt (Abb. 6.18 bis Abb. 6.20), sowie ist andererseits eine kumulative Ergebnisübersicht dieser einzelnen Versuchsreihen (Abb. 6.21) abgebildet. Im Kontext der Darstellung der einzelnen Versuchsreihen gemäß Abb. 6.18 bis Abb. 6.20 beinhalten die vorhandenen Abbildungen hierbei sowohl die maßgebenden Verschiebungs-Zeit-Zusammenhänge der jeweiligen Proben, als auch deren zeitabhängigen Verlauf der Holzfeuchte u und deren zeitabhängigen Verlauf der klimatischen Randbedingungen. Mit weiterführendem Bezug auf die Darstellung der kumulativen Ergebnisübersicht gemäß Abb. 6.21 umfassen die hierbei vorhandenen Abbildungen sowohl die maßgebenden Verschiebungs-Zeit-Zusammenhänge der jeweiligen Versuchsreihen, als auch deren resultierende Kriechzahl-Zeit-Zusammenhänge. Basierend auf diesen Zusammenhängen kann demnach eine vollständige Interpretation bzw. Charakterisierung des maßgebenden Kriechverhaltens der großmaßstäblichen Verbundprobekörper unter Dauerlast erfolgen, wie nachfolgend aus *Kapitel 6.4.1.3* ersichtlich wird.

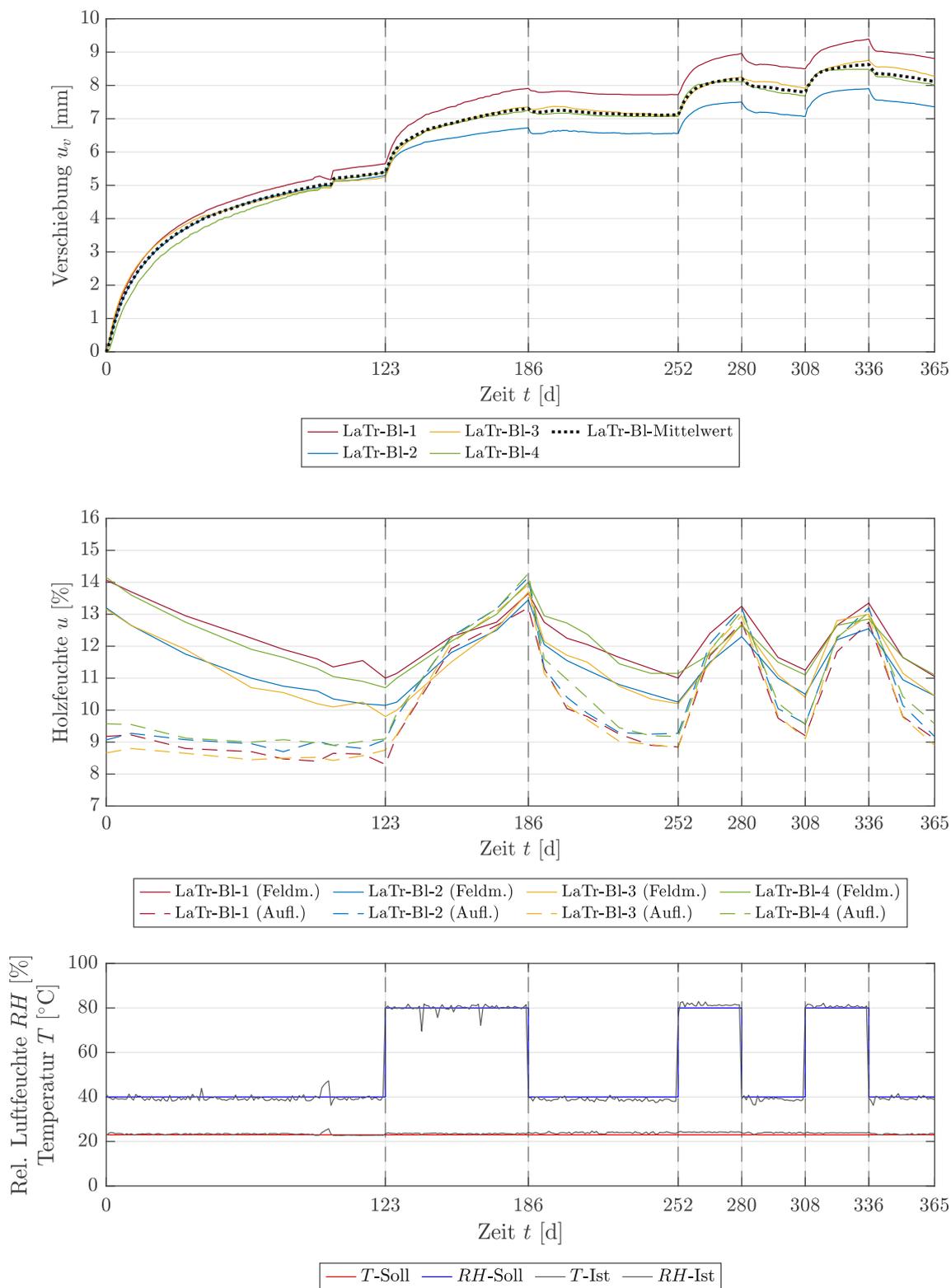


Abb. 6.18: Verschiebungs-Zeit-Zusammenhänge der experimentellen Dauerlastversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe LaTr-BI | Darstellung der zeitabhängigen Verschiebungen u_v (oben), Darstellung der zeitabhängigen Holzfeuchte u (mittig), Darstellung der zeitabhängigen klimatischen Randbedingungen (unten)

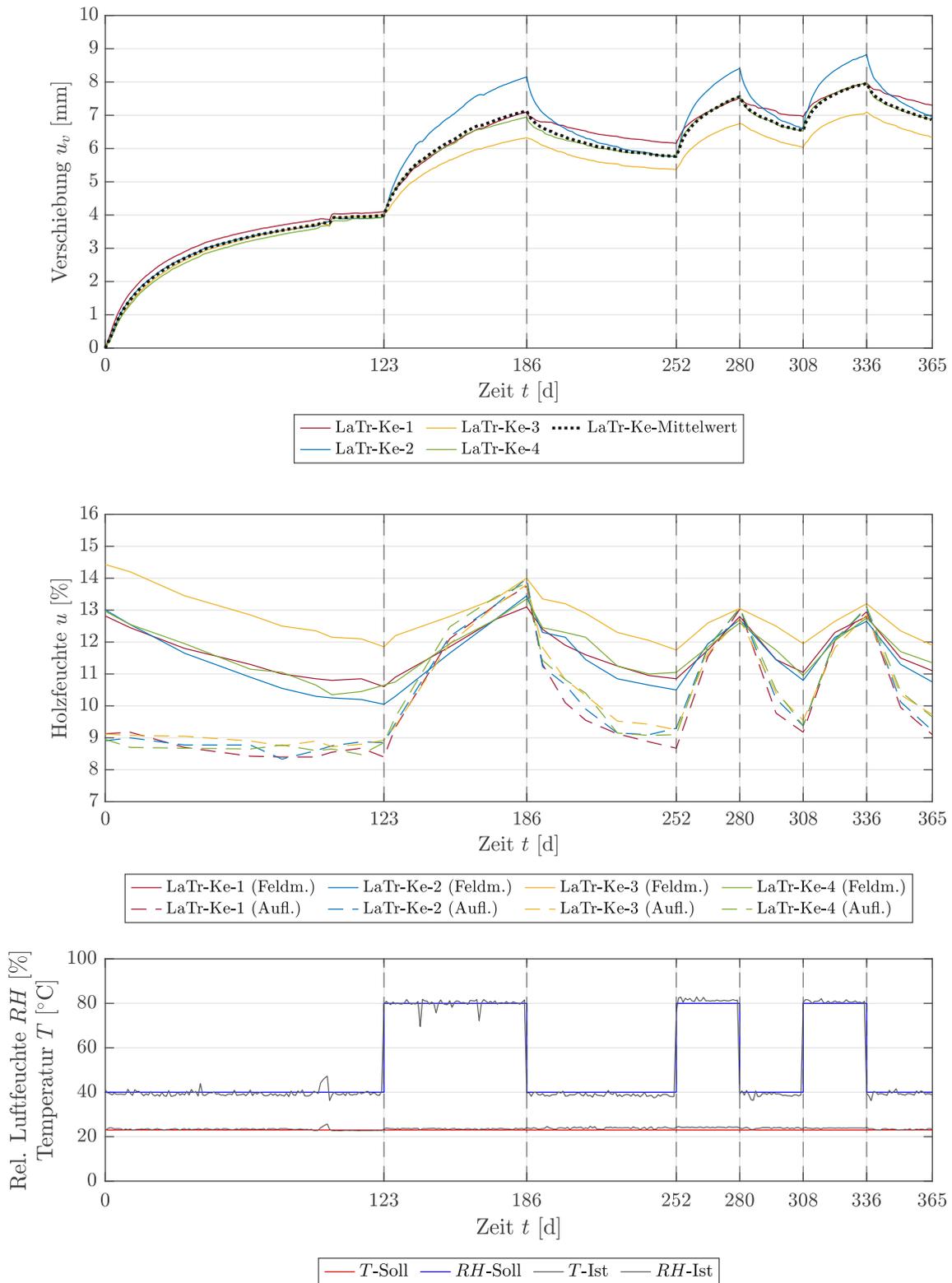


Abb. 6.19: Verschiebungs-Zeit-Zusammenhänge der experimentellen Dauerlastversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe LaTr-Ke | Darstellung der zeitabhängigen Verschiebungen u_v (oben), Darstellung der zeitabhängigen Holzfeuchte u (mittig), Darstellung der zeitabhängigen klimatischen Randbedingungen (unten)

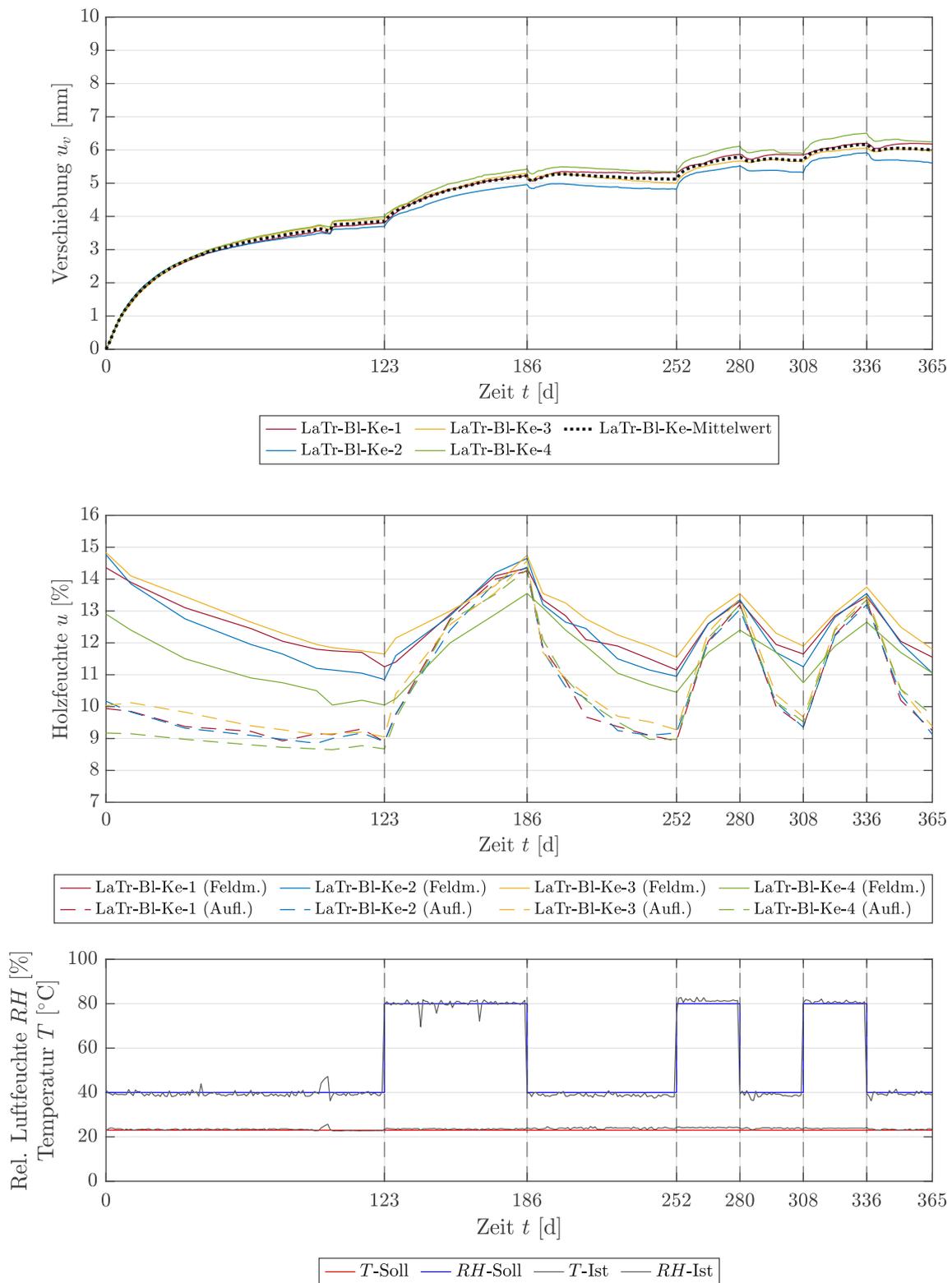


Abb. 6.20: Verschiebungs-Zeit-Zusammenhänge der experimentellen Dauerlastversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe LaTr-BI-Ke | Darstellung der zeitabhängigen Verschiebungen u_v (oben), Darstellung der zeitabhängigen Holzfeuchte u (mittig), Darstellung der zeitabhängigen klimatischen Randbedingungen (unten)

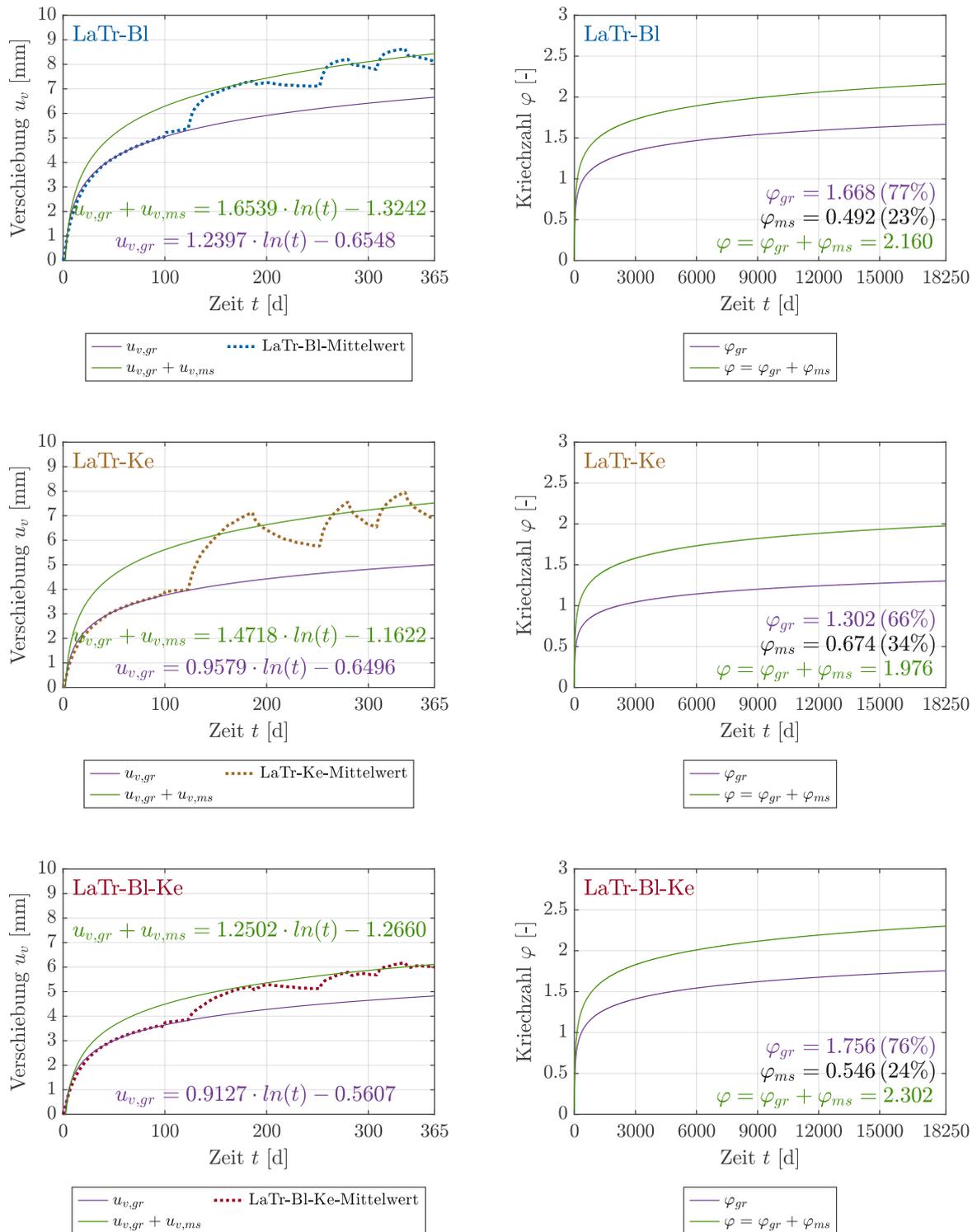


Abb. 6.21: Verschiebungs-Zeit- und Kriechzahl-Zeit-Zusammenhänge der experimentellen Dauerlastversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe LaTr-BI (oben), Versuchsreihe LaTr-Ke (mittig), Versuchsreihe LaTr-BI-Ke (unten)

6.4.1.3 Interpretation der Versuchsergebnisse

Aufbauend auf den gegebenen Versuchsergebnissen der experimentellen Dauerlastversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern gemäß Abb. 6.18 bis Abb. 6.21 zeigen die einzelnen Versuchsreihen ein für die vorhandenen klimatischen Randbedingungen charakteristisches, im Vergleich zu den Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern allerdings qualitativ teilweise variierendes, Verformungs- und Kriechverhalten. In diesem Sinne defieren sich die einzelnen großmaßstäblichen Versuchstypologien durch wiederum gegebene Verformungszunahmen in der beginnenden Trockenphase (0 bis 123 d), weisen in den darauf folgenden alternierenden Feucht- und Trockenphasen (123 bis 365 d) allerdings vergleichsweise gegengleiche Verformungsänderungen (Verformungszunahmen in den Feuchtephasen bzw. Verformungsabnahmen in den Trockenphasen) auf. Die genannten vorhandenen Zu- und Abnahmen zeichnen sich hierbei darüber hinaus wiederum durch ein grundsätzlich degressives (Verformungszunahmen) bzw. durch ein gleichermaßen regressives (Verformungsabnahmen) Erscheinungsbild aus, wobei die qualitative Ausprägung der regressiven Verformungsanteile sich im Allgemeinen jedoch als abhängig von der jeweiligen gegebenen Versuchstypologie (qualitativ starke Ausprägung bei der Versuchsreihe LaTr-Ke, qualitativ eher geringe Ausprägung bei den Versuchsreihen LaTr-Bl und LaTr-Bl-Ke) beschreiben lässt.

Betrachtet man die gegebenen Zeitverläufe weiterführend im genaueren Detail, zeigt sich für alle Versuchsreihen anfänglich eine qualitativ konsistente, deutliche Zunahme der vertikalen Verschiebungen u_v in der beginnenden ersten Trockenphase (vertikale Verschiebung aufgrund von Grundkriechen $u_{v,gr}$). Auf diesen vertikalen Verschiebungen u_v aufbauend, kommt es in der darauf folgenden ersten Feuchtphase, gegensätzlich zu den Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern, wiederum zu einer qualitativ konsistenten, maßgeblichen Zunahme der vertikalen Verschiebungen u_v und somit zu einem, im Vergleich zu den Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern bereits in der ersten Feuchtphase auftretenden, deutlich beginnenden Mitwirken der mechanosorptiven Kriechanteile. In äquivalenter Form stellt sich dieses Phänomen auch weiterführend mit Bezug auf die nachfolgenden Zyklusphasen (Feuchtphasen) bis zum Ende des Versuchszeitraums dar. So zeigt sich in diesem Kontext, wie auch bereits in kurzer Form einleitend beschrieben, jeweils eine wiederum deutliche Zunahme der vertikalen Verschiebungen u_v in den genannten Feuchtphasen, während demgegenüber in den gegebenen interstitiellen Trockenphasen eine quantitativ nur wesentlich geringere Abnahme der vertikalen Verschiebungen u_v zu verzeichnen ist, wodurch sich schlussfolgernd die gegebene kontinuierliche Steigerung der vertikalen Verschiebungen u_v in Abhängigkeit der zyklisch variierenden Luftfeuchtigkeit RH ableiten lässt. Ein wesentlicher vorhandener Einfluss variierender klimatischer Randbedingungen auf das allgemeine Verformungs- und Kriechverhalten der Versuchsreihen kann aufgrund dieser genannten Versuchsergebnisse demnach abschließend, äquivalent zu den Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern, deutlich hervorgehoben werden.

Mit konkretem Bezug auf das Verformungs- und Kriechverhalten der Versuchstypologie Blech (Versuchsreihe LaTr-Bl, Abb. 6.18 bzw. Abb. 6.21 oben) kennzeichnet sich dieses im Kontext der maßgebenden Versuchszeitpunkte $t = 123$ d (Ende der beginnenden Trockenphase) und $t = 365$ d (Ende des Versuchszeitraums) durch hierbei auftretende vertikale Verschiebungen u_v in einem Bereich zwischen 5.24 und 5.65 mm bzw. 7.36 und 8.81 mm.

Unter der Berücksichtigung der vorhandenen elastischen vertikalen Verschiebungen $u_{v,el}$ ergeben sich mit Bezug auf die genannten vertikalen Verschiebungen u_v im Mittel somit schlussfolgernd resultierende Kriechzahlen $\varphi(t = 123 \text{ d})$ und $\varphi(t = 365 \text{ d})$ von 0.781 bzw. 1.175. Die im weiteren Kontext dabei in den einzelnen Messpunkten auftretende Holzfeuchte u liegt hierbei in einem Bereich zwischen ≈ 8 und $\approx 14\%$, wobei in diesem Zusammenhang auch ein erwartbarer maßgebender Holzfeuchtegradient zwischen den in Feldmitte und den in den Auflagerbereichen situierten Messpunkten festgestellt werden kann. Demnach liegt die Holzfeuchte u der in Feldmitte situierten Messpunkte zu Versuchsbeginn in einem Bereich zwischen ≈ 13 und $\approx 14\%$, während sich die Holzfeuchte u der in den Auflagerbereichen situierten Messpunkte in einem vergleichsweise nur geringeren Bereich von ≈ 8.5 bis $\approx 9.5\%$ wiederfindet. Betrachtet man weiterführend den zeitlichen Verlauf der Holzfeuchte u innerhalb des Versuchszeitraums, wird darüber hinaus ebenso deutlich, dass sich dieser zu Beginn gegebene Holzfeuchtegradient auch in den hierfür maßgebenden Zyklusphasen qualitativ in äquivalenter Form ausbildet. Demnach zeigt sich die Holzfeuchte u in den Feuchtphasen sowohl in Feldmitte, als auch in den Auflagerbereichen, durch ähnliche maximale Werte und demzufolge keinen wesentlichen Holzfeuchtegradienten (äquivalente maximale Holzfeuchten u in einem Bereich zwischen ≈ 13 und $\approx 14\%$) bestimmt, während in den Trockenphasen demgegenüber ein deutlicher Holzfeuchtegradient zwischen den Messpunkten in Feldmitte und jenen in den Auflagerbereichen (minimale Holzfeuchte u in Feldmitte in einem Bereich zwischen ≈ 10 und $\approx 11\%$ bzw. minimale Holzfeuchte u in den Auflagerbereichen in einem Bereich von ≈ 8 bis $\approx 9\%$) vorliegt. Die Messpunkte in den Auflagerbereichen zeigen schlussfolgernd ein, grundsätzlich auch zu erwartendes, äußerst sensibles Verhalten auf gegebene Änderungen der äußeren klimatischen Randbedingungen, während sich die Messpunkte in Feldmitte konträr dazu demgegenüber auf Basis einer vergleichsweise nur wesentlich trägeren Charakteristik definieren.

Beschreibt man das auftretende Verformungs- und Kriechverhalten im weiteren Sinne darüber hinaus auf Basis von analytischen Näherungskurven (logarithmische Funktionen $\ln(t)$), können überdies die finale Kriechzahl φ , sowie deren Anteile φ_{gr} und φ_{ms} für den gesamten Lebenszyklus abgeleitet werden. Mit Hinblick auf diese Größen ergeben sich für die Versuchsreihe LaTr-BI schlussfolgernd Werte von $\varphi = 2.160$ bzw. $\varphi_{gr} = 1.668$ und $\varphi_{ms} = 0.492$. Unter der weiterführenden Betrachtung der jeweiligen Anteilsmäßigkeiten der Kriechzahl φ definiert sich die Grundkriechzahl φ_{gr} unter konstanten klimatischen Randbedingungen demnach durch einen Anteil von 77% der gesamten Kriechzahl φ , sowie liegt der Anteil der mechanosorptiven Kriechzahl φ_{ms} unter variierenden klimatischen Randbedingungen bei 23% ebendieser. Die Anteilsmäßigkeit des mechanosorptiven Kriechanteils spiegelt sich bei dieser Versuchsreihe demzufolge mit etwa einem Viertel der insgesamt auftretenden Kriechanteile wider.

Mit weiterführendem Bezug auf das Verformungs- und Kriechverhalten der Versuchstypologie Kerve (Versuchsreihe LaTr-Ke, Abb. 6.19 bzw. Abb. 6.21 mittig) kennzeichnet sich dieses im Kontext der maßgebenden Versuchszeitpunkte $t = 123 \text{ d}$ (Ende der beginnenden Trockenphase) und $t = 365 \text{ d}$ (Ende des Versuchszeitraums) durch, im Vergleich zur Versuchsreihe LaTr-BI geringere, auftretende vertikale Verschiebungen u_v in einem Bereich zwischen 3.94 und 4.10 mm bzw. 6.34 und 7.30 mm. Unter der Berücksichtigung der vorhandenen elastischen vertikalen Verschiebungen $u_{v,el}$ ergeben sich mit Bezug auf die genannten vertikalen Verschiebungen u_v im Mittel somit schlussfolgernd resultierende

Kriechzahlen $\varphi(t = 123 \text{ d})$ und $\varphi(t = 365 \text{ d})$ von 0.595 bzw. 1.021 für diese Versuchsreihe. Die im weiteren Kontext dabei in den einzelnen Messpunkten auftretende Holzfeuchte u liegt hierbei, äquivalent zur Versuchsreihe LaTr-BI, in einem Bereich zwischen ≈ 8 und $\approx 14\%$, wobei in diesem Zusammenhang wiederum auch ein erwartbarer maßgebender Holzfeuchtegradient zwischen den in Feldmitte und den in den Auflagerbereichen situierten Messpunkten festgestellt werden kann. Demnach liegt die Holzfeuchte u der in Feldmitte situierten Messpunkte zu Versuchsbeginn in einem Bereich zwischen ≈ 13 und $\approx 14\%$, während sich die Holzfeuchte u der in den Auflagerbereichen situierten Messpunkte in einem vergleichsweise abermalig nur geringeren Bereich von $\approx 9\%$ wiederfindet. Wie darüber hinaus ebenso bereits für die Versuchsreihe LaTr-BI beschrieben, bildet sich dieser genannte Holzfeuchtegradient auch bei dieser Versuchsreihe in den maßgebenden weiteren Zyklusphasen des gesamten Versuchszeitraums demgemäß aus. So zeigt sich die Holzfeuchte u in den Feuchtphasen sowohl in Feldmitte, als auch in den Auflagerbereichen, wiederum durch ähnliche maximale Werte und demzufolge keinen wesentlichen Holzfeuchtegradienten (äquivalente maximale Holzfeuchten u in einem Bereich zwischen ≈ 12.5 und $\approx 14\%$) bestimmt, während in den Trockenphasen demgegenüber abermalig ein deutlicher Holzfeuchtegradient zwischen den Messpunkten in Feldmitte und jenen in den Auflagerbereichen (minimale Holzfeuchte u in Feldmitte in einem Bereich zwischen ≈ 10 und $\approx 12\%$ bzw. minimale Holzfeuchte u in den Auflagerbereichen in einem Bereich von ≈ 8.5 bis $\approx 9.5\%$) festgestellt werden kann. Die Messpunkte in den Auflagerbereichen zeigen schlussfolgernd auch bei dieser Versuchsreihe ein äußerst sensibles Verhalten auf gegebene Änderungen der äußeren klimatischen Randbedingungen, während sich die Messpunkte in Feldmitte konträr dazu demgegenüber auf Basis einer vergleichsweise nur wesentlich trägeren Charakteristik definieren.

Mit weiterführendem Bezug auf die finale Kriechzahl φ , sowie deren Anteile φ_{gr} und φ_{ms} für den gesamten Lebenszyklus ergeben sich für die vorliegende Versuchsreihe LaTr-Ke darüber hinaus abschließende Werte von $\varphi = 1.976$ bzw. $\varphi_{gr} = 1.302$ und $\varphi_{ms} = 0.674$. Unter der Betrachtung der jeweiligen Anteilsmäßigkeiten der Kriechzahl φ definiert sich die Grundkriechzahl φ_{gr} unter konstanten klimatischen Randbedingungen demnach durch einen Anteil von 66% der gesamten Kriechzahl φ , sowie liegt der Anteil der mechanosorptiven Kriechzahl φ_{ms} unter variierenden klimatischen Randbedingungen bei 34% ebendieser. Die Anteilsmäßigkeit des mechanosorptiven Kriechanteils spiegelt sich bei dieser Versuchsreihe demzufolge mit etwa einem Drittel der insgesamt auftretenden Kriechanteile wider.

Mit darüber hinaus folgendem Bezug auf das Verformungs- und Kriechverhalten der Versuchstypologie Blech-Kerve (Versuchsreihe LaTr-BI-Ke, Abb. 6.20 bzw. Abb. 6.21 unten) kennzeichnet sich dieses im Kontext der maßgebenden Versuchszeitpunkte $t = 123 \text{ d}$ (Ende der beginnenden Trockenphase) und $t = 365 \text{ d}$ (Ende des Versuchszeitraums) durch, im Vergleich zu den Versuchsreihen LaTr-BI und LaTr-Ke geringste, auftretende vertikale Verschiebungen u_v in einem Bereich zwischen 3.70 und 3.98 mm bzw. 5.61 und 6.25 mm. Unter der Berücksichtigung der vorhandenen elastischen vertikalen Verschiebungen $u_{v,el}$ ergeben sich mit Bezug auf die genannten vertikalen Verschiebungen u_v im Mittel somit schlussfolgernd resultierende Kriechzahlen $\varphi(t = 123 \text{ d})$ und $\varphi(t = 365 \text{ d})$ von 0.805 bzw. 1.255 für diese Versuchsreihe. Die im weiteren Kontext dabei in den einzelnen Messpunkten auftretende Holzfeuchte u liegt hierbei, ähnlich zu den Versuchsreihen LaTr-BI und LaTr-Ke, in einem Bereich zwischen ≈ 9 und $\approx 15\%$, wobei in diesem Zusammenhang auch für

diese Versuchsreihe wiederum ein erwartbarer maßgebender Holzfeuchtegradient zwischen den in Feldmitte und den in den Auflagerbereichen situierten Messpunkten festgestellt werden kann. Demnach liegt die Holzfeuchte u der in Feldmitte situierten Messpunkte zu Versuchsbeginn in einem Bereich zwischen ≈ 13 und $\approx 15\%$, während sich die Holzfeuchte u der in den Auflagerbereichen situierten Messpunkte in einem vergleichsweise abermalig nur geringeren Bereich von ≈ 9 bis $\approx 10\%$ wiederfindet. Wie darüber hinaus ebenso bereits für die Versuchsreihen LaTr-BI und LaTr-Ke beschrieben, bildet sich der genannte Holzfeuchtegradient auch bei dieser Versuchsreihe in den maßgebenden weiteren Zyklusphasen des gesamten Versuchszeitraums demgemäß aus. So zeigt sich die Holzfeuchte u in den Feuchtphasen sowohl in Feldmitte, als auch in den Auflagerbereichen, wiederum durch ähnliche maximale Werte und demzufolge keinen wesentlichen Holzfeuchtegradienten (äquivalente maximale Holzfeuchten u in einem Bereich zwischen ≈ 12.5 und $\approx 14.5\%$) bestimmt, während in den Trockenphasen demgegenüber abermalig ein deutlicher Holzfeuchtegradient zwischen den Messpunkten in Feldmitte und jenen in den Auflagerbereichen (minimale Holzfeuchte u in Feldmitte in einem Bereich zwischen ≈ 10 und $\approx 12\%$ bzw. minimale Holzfeuchte u in den Auflagerbereichen in einem Bereich von ≈ 8.5 bis $\approx 10\%$) festgestellt werden kann. Die Messpunkte in den Auflagerbereichen zeigen schlussfolgernd, wie auch bereits für die Versuchsreihen LaTr-BI und LaTr-Ke festgehalten, ein äußerst sensibles Verhalten auf gegebene Änderungen der äußeren klimatischen Randbedingungen, während sich die Messpunkte in Feldmitte konträr dazu demgegenüber auf Basis einer vergleichsweise nur wesentlich trägeren Charakteristik definieren.

Mit darüber hinaus vorliegendem Bezug auf die finale Kriechzahl φ , sowie deren Anteile φ_{gr} und φ_{ms} für den gesamten Lebenszyklus ergeben sich für die betrachtete Versuchsreihe LaTr-BI-Ke weiterführend Werte von $\varphi = 2.302$ bzw. $\varphi_{gr} = 1.756$ und $\varphi_{ms} = 0.546$. Unter der Betrachtung der jeweiligen Anteilsmäßigkeiten der Kriechzahl φ definiert sich die Grundkriechzahl φ_{gr} unter konstanten klimatischen Randbedingungen demnach durch einen Anteil von 76% der gesamten Kriechzahl φ , sowie liegt der Anteil der mechanosorptiven Kriechzahl φ_{ms} unter variierenden klimatischen Randbedingungen bei 24% ebendieser. Die Anteilsmäßigkeit des mechanosorptiven Kriechanteils spiegelt sich bei dieser Versuchsreihe demzufolge, äquivalent zur Versuchsreihe LaTr-BI, mit etwa einem Viertel der insgesamt auftretenden Kriechanteile wider.

Unterzieht man das vorhandene Verformungs- und Kriechverhalten der einzelnen großmaßstäblichen Versuchstypologien abschließend einer weiterführenden kumulativen Vergleichsbetrachtung, wird klar ersichtlich, dass sich die vorhandenen Verschiebungs-Zeit-Zusammenhänge der einzelnen Versuchsreihen hierbei, wie prinzipiell auch bereits bei den Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern zu erkennen, deutlich in Abhängigkeit der jeweils applizierten Schubverbindersysteme definieren. In diesem Kontext zeigen sich die einzelnen Versuchstypologien bei genauerer Betrachtung dabei wesentlich durch den eventuellen Einsatz einer blechernen Komponente (Versuchsreihen LaTr-BI und LaTr-BI-Ke) beeinflusst, als sich durch den Einsatz dieser Schubverbindertypologie maßgebliche qualitative Unterschiede in der vorhandenen Verschiebungscharakteristik im Vergleich zu einem nicht vorhandenen Einsatz dieser Komponente (rein kervenbasierte Versuchsreihe LaTr-Ke) ergeben. Im Detail erkennbar wird dieses Phänomen hierbei weiterführend explizit in den an die beginnende Trockenphase (0 bis 123 d) anschließenden alternierenden Feucht- und Trockenphasen (123 bis 365 d) und somit im Speziellen in den

zur Ermittlung der mechanosorptiven Kriechanteile dienenden Zyklusphasen. Während in der beginnenden Trockenphase alle Versuchsreihen demgegenüber eine qualitativ äquivalente, sehr stark ausgeprägte degressive Verschiebungscharakteristik aufweisen, lässt sich dieses klar definierte Verhalten in den genannten, daran anschließenden, alternierenden Feucht- und Trockenphasen konträr dazu hingegen nicht so eindeutig erkennen. In diesem Sinne stellt sich eine klar definierte degressive und regressive Verschiebungscharakteristik zwar bei einer nicht vorhandenen Applikation einer blechernen Schubverbindertypologie (rein kervenbasierte Versuchsreihe LaTr-Ke) ein, im Falle eines jedoch gegebenen Einsatzes einer blechernen Komponente (Versuchsreihen LaTr-BI und LaTr-BI-Ke) kann dieses eindeutige charakteristische Verhalten schlussfolgernd demgegenüber aber nur in maßgeblich abgeschwächter Form erkannt werden.

Der Einsatz einer blechernen Komponente (Versuchsreihen LaTr-BI und LaTr-BI-Ke) führt im Vergleich zur rein kervenbasierten Versuchstypologie (Versuchsreihe LaTr-Ke) demgemäß zu zwar nur deutlich verringerten (Rück-)Verschiebungen u_v in den Trockenphasen der alternierenden Zyklusphasen, kann gleichzeitig aber auch verhältnismäßig nur geringere Verschiebungen u_v in den Feuchtphasen der alternierenden Zyklusphasen vorweisen. Der applikative Einsatz einer blechernen Komponente definiert sich demnach schlussfolgernd durch ein zwar vergleichsweise unstetigeres Verformungs- und Kriechverhalten in den alternierenden Feucht- und Trockenphasen, kann sich demgegenüber aber auf Basis einer quantitativ nur geringer ausgeprägten Verschiebungscharakteristik auszeichnen. Die Anteilsmäßigkeit des mechanosorptiven Kriechanteils liegt bei den blechbasierten Versuchstypologien (Versuchsreihen LaTr-BI und LaTr-BI-Ke) demgemäß auch in einem, vergleichsweise nur verringerten Bereich von rund einem Viertel (23 bzw. 24%) der insgesamt auftretenden Kriechanteile, während sich die rein kervenbasierte Versuchstypologie (Versuchsreihe LaTr-Ke) demgegenüber durch eine Anteilsmäßigkeit von rund einem Drittel (34%) der insgesamt auftretenden Kriechanteile kennzeichnet.

Darüber hinaus charakterisieren sich die vorhandenen Kriechzahlen φ der einzelnen Versuchstypologien durch generell ähnliche Werte von ≈ 2.0 (1.976 bis 2.302), zeichnen sich in ihrer jeweiligen Quantität aber durch eine, im Vergleich zu den aus dem Versuchszeitraum resultierenden vertikalen Verschiebungen u_v , variierende quantitative Reihung aus. So definiert sich die Versuchsreihe LaTr-BI-Ke in diesem Zusammenhang zwar durch geringste vertikale Verschiebungen u_v zwischen 5.61 und 6.25 mm zum Ende des Versuchszeitraums, weist aber aufgrund ihrer gleichzeitig vorhandenen äußerst geringen elastischen vertikalen Verschiebung $u_{v,el}$ die höchste Kriechzahl φ aller Versuchsreihen von 2.302 auf. Die Versuchsreihe LaTr-BI charakterisiert sich demgegenüber durch die höchsten vertikalen Verschiebungen u_v zwischen 7.36 und 8.81 mm zum Ende des Versuchszeitraums, zeigt sich angesichts ihrer zeitgleich vorhandenen erhöhten elastischen vertikalen Verschiebung $u_{v,el}$ aber auf Basis einer vergleichsweise verringerten Kriechzahl φ von 2.160 bestimmt. Vergleicht man abschließend die Versuchsreihe LaTr-Ke mit den bereits genannten Versuchsreihen LaTr-BI und LaTr-BI-Ke, zeichnet sich diese im weiteren Zusammenhang durch eine verhältnismäßig geringste Kriechzahl φ aller Versuchsreihen mit einem Wert von 1.976 aus, als diese eine ähnliche elastische vertikale Verschiebung $u_{v,el}$ wie die Versuchsreihe LaTr-BI aufweist, sich gleichzeitig aber auch durch vergleichsweise geringere vertikale Verschiebungen u_v zum Ende des Versuchszeitraums zwischen 6.34 und 7.30 mm definiert.

6.4.2 Bruchversuche

6.4.2.1 Versuchskonzeption und normative Grundlagen

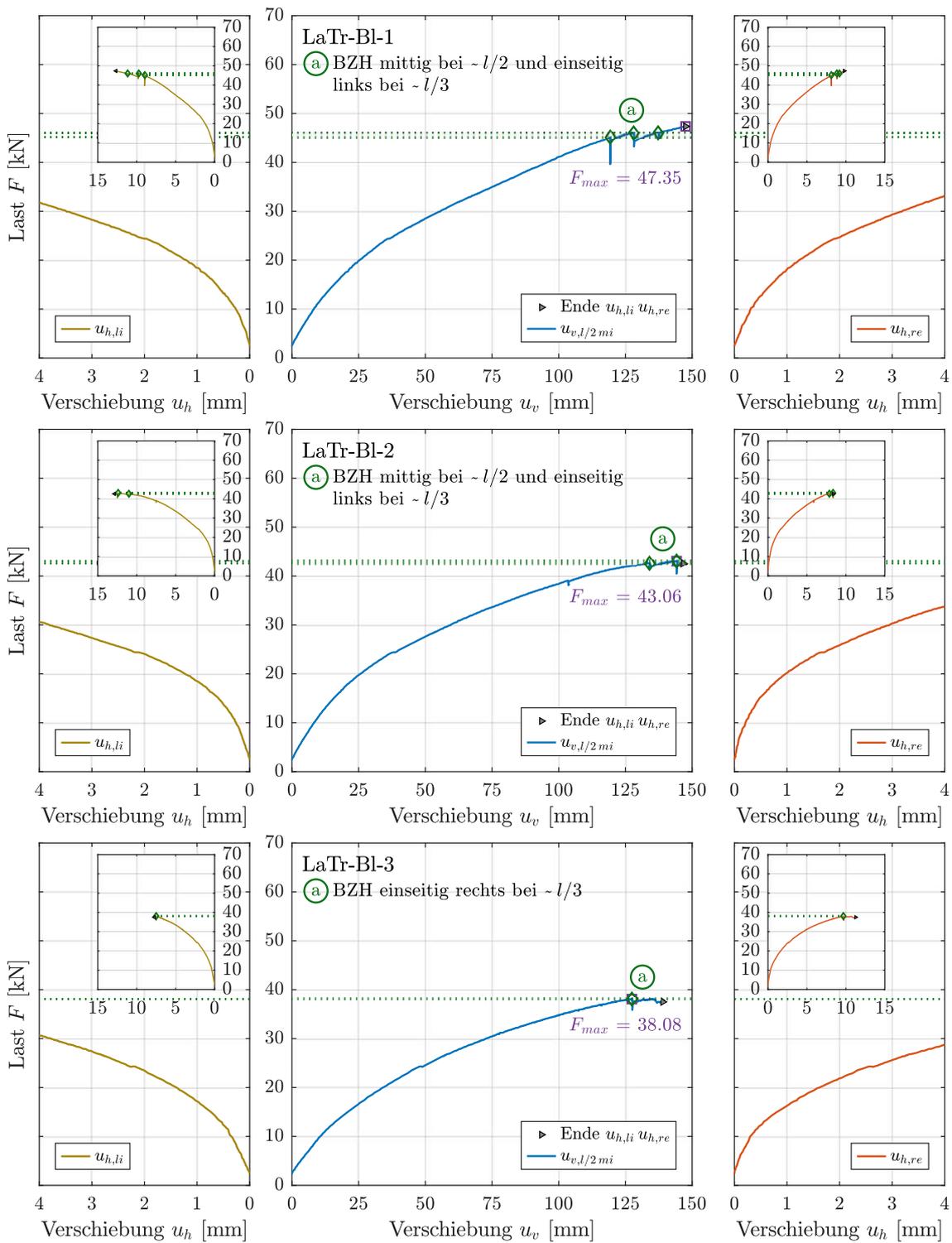
Als die experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern, wie auch bereits einleitend erwähnt, grundsätzlich auf den vorangegangenen ausgeführten experimentellen Dauerlastversuchen gemäß *Kapitel 6.4.1* aufbauen, umfasst die vollständige Versuchscharge der untersuchten Proben demnach insgesamt 12 Probekörper, wobei sich diese genannte Gesamtanzahl hierbei schlussfolgernd auf Basis der drei maßgebenden Versuchsreihen LaTr-Bl, LaTr-Ke und LaTr-Bl-Ke zu je 4 Proben darstellt.

Mit weiters vorliegendem Bezug auf die geometrische Ausgestaltung dieser genannten Versuchsreihen, definiert sich ebendiese, entsprechend den Ausführungen aus *Kapitel 6.4.1*, hierbei in Form einer vollständig identen Charakteristik im Vergleich zu den Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung (Versuchsreihen KuTr-Bl, KuTr-Ke und KuTr-Bl-Ke). Im Kontext einer entsprechenden detaillierten Beschreibung der dabei explizit vorhandenen Eigenschaften darf demnach wiederum auf die Inhalte aus *Kapitel 5.4.1* (Abb. 5.15 bis Abb. 5.18) verwiesen werden. Gemäß diesen genannten Ausführungen erfolgt die Detektion der maßgebenden mechanischen Entitäten weiterführend abermals auf Basis eines Lastregimes in Anlehnung an *ÖNORMEN 26891* [17], wie demgemäß abschließend auch aus *Anhang D* entnommen werden kann.

6.4.2.2 Darstellung der Versuchsergebnisse

Repräsentative Darstellungen der Versuchsergebnisse der Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern können in grafischer Form den nachfolgenden Abbildungen Abb. 6.22, Abb. 6.23 und Abb. 6.24 entnommen werden. Wie aus den gegebenen Abbildungen ersichtlich wird, gliedert sich die Darstellung der Versuchsergebnisse, äquivalent zu den Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung, hierbei in jeweils drei maßgebende Bereiche.

So beinhalten die Abbildungen einerseits die Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der absoluten vertikalen Verschiebungen in Feldmitte ($u_{v,l/2mi}$) inklusive auftretender Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen, sowie andererseits ebenso die Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der relativen horizontalen Verschiebungen zwischen den Verbundpartnern Holz und Beton im linken und rechten Auflager- bzw. Randbereich ($u_{h,li}$ und $u_{h,re}$). Basierend auf diesen Zusammenhängen kann demnach eine vollständige Interpretation bzw. Charakterisierung des maßgebenden Trag- und Verformungsverhaltens der großmaßstäblichen Verbundprobekörper erfolgen, wie nachfolgend aus *Kapitel 6.4.2.3* ersichtlich wird.



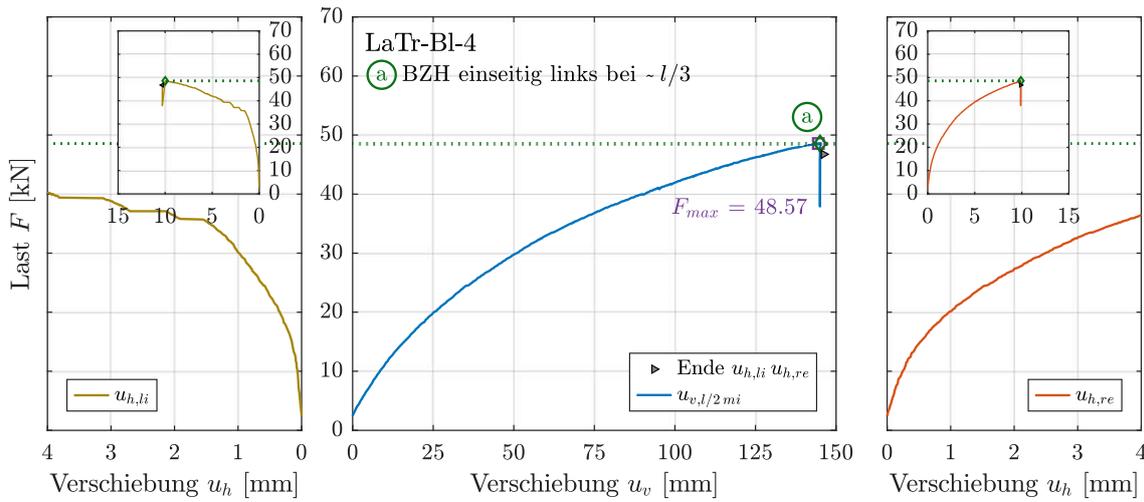
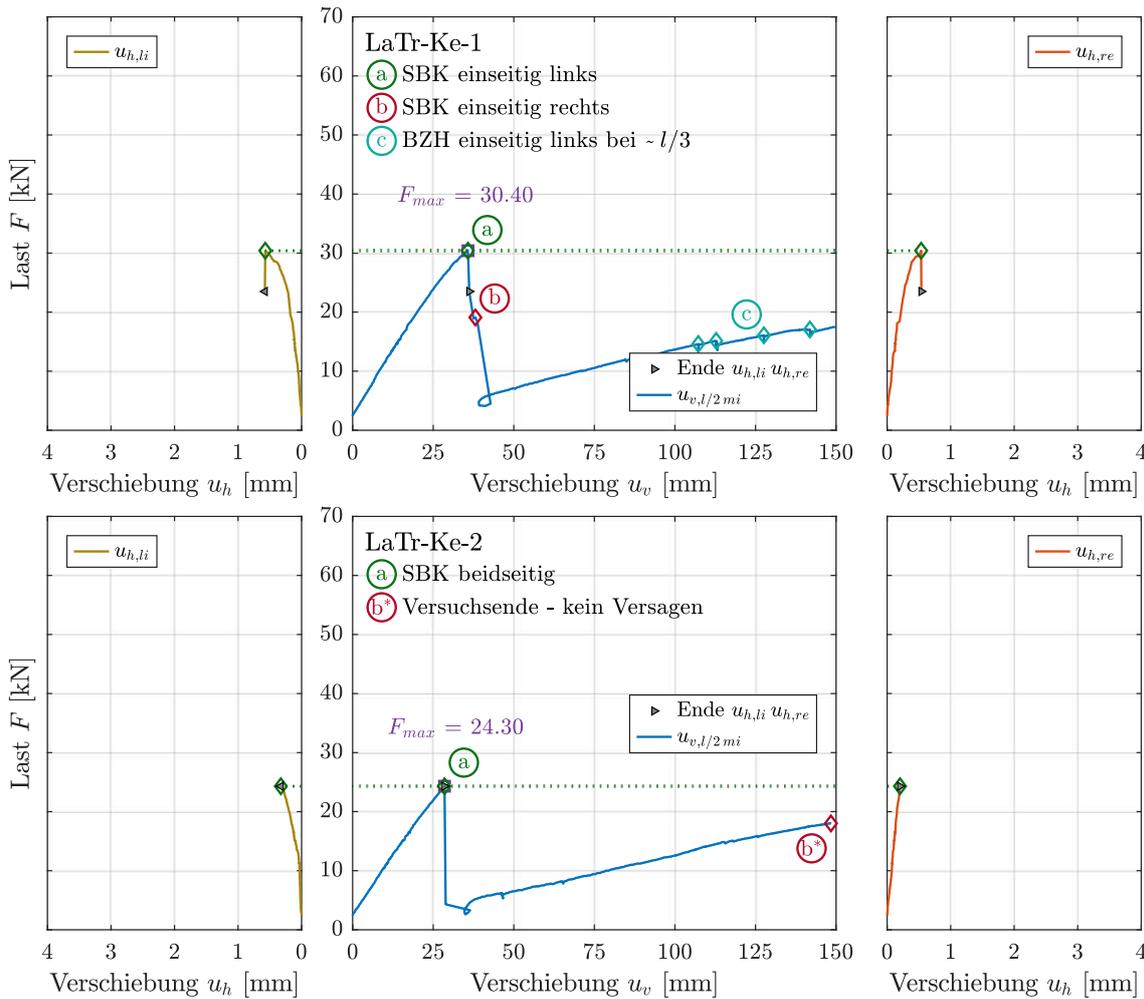


Abb. 6.22: Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe LaTr-BI | Darstellung der hor. Verschiebungen u_h (links und rechts), Darstellung der vert. Verschiebungen u_v inkl. Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen (mittig)



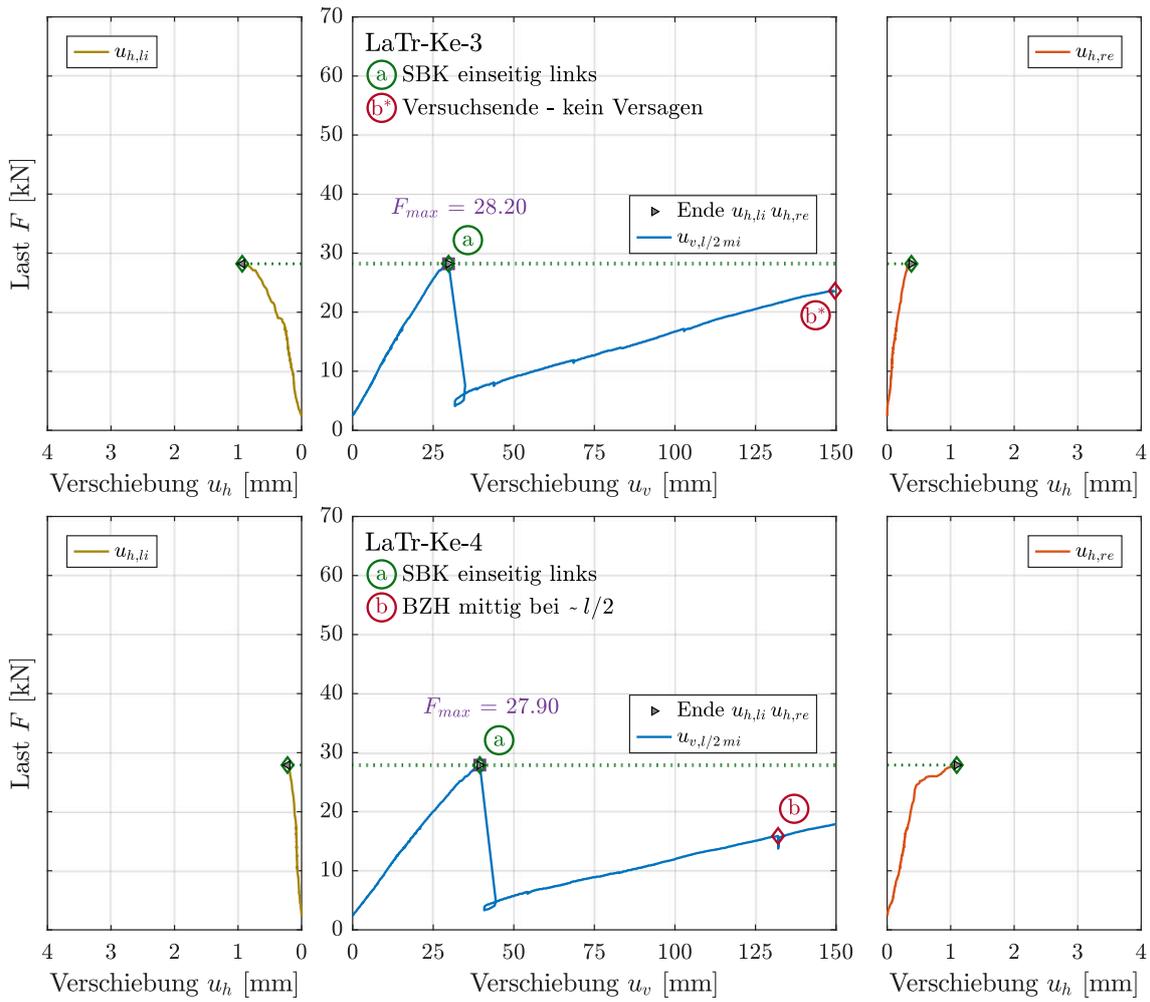
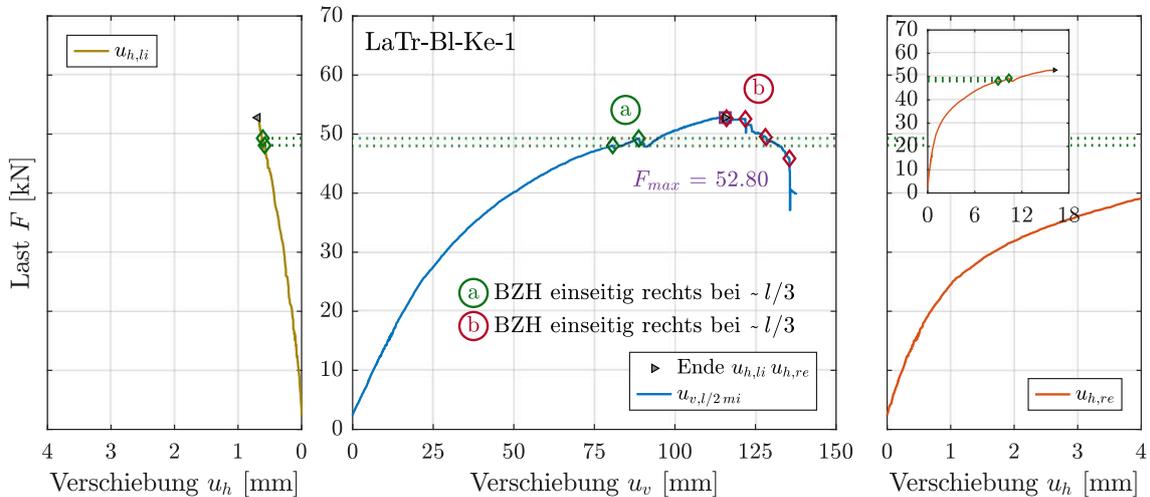


Abb. 6.23: Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe LaTr-Ke | Darstellung der hor. Verschiebungen u_h (links und rechts), Darstellung der vert. Verschiebungen u_v inkl. Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen (mittig)



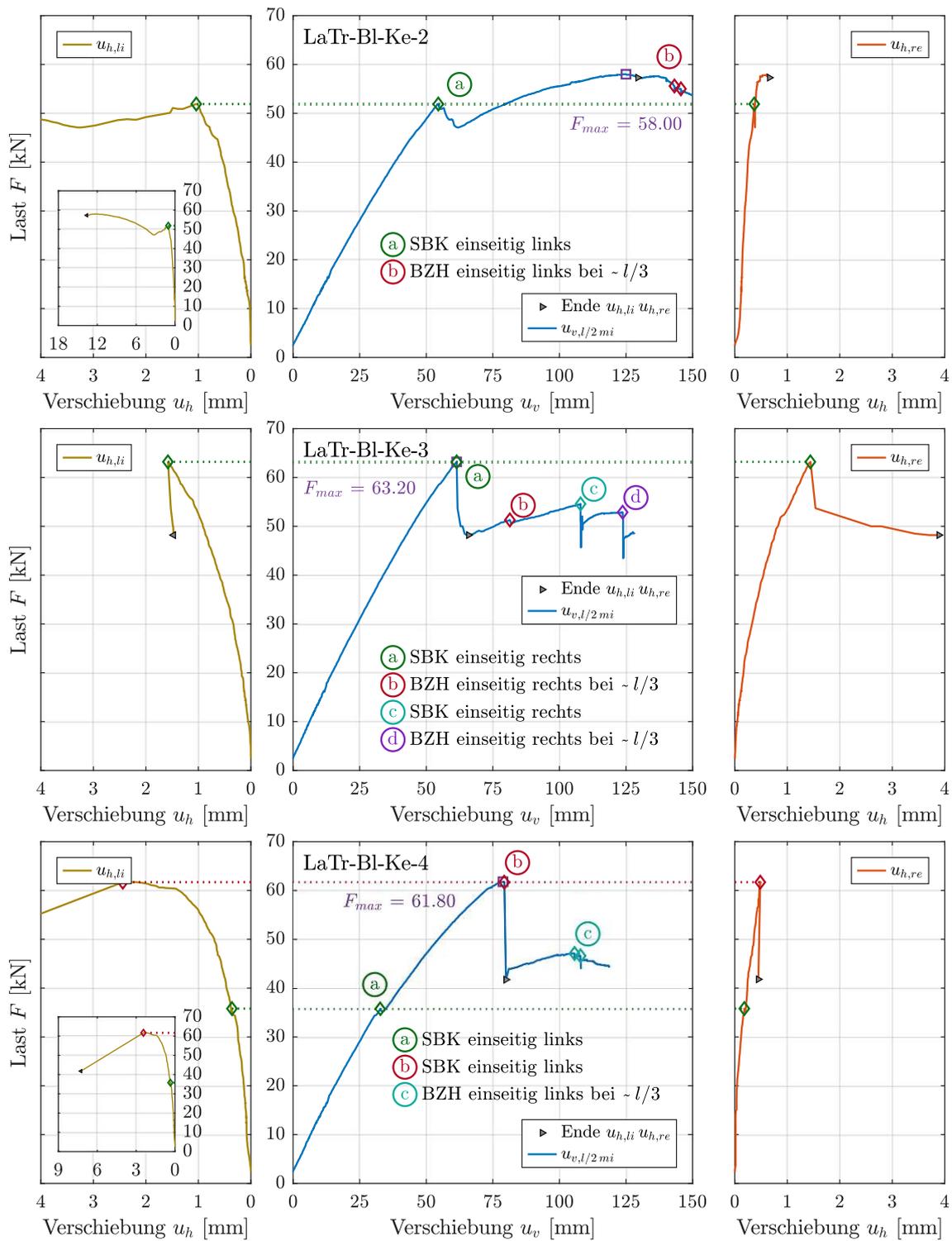


Abb. 6.24: Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Versuchsreihe LaTr-BI-Ke | Darstellung der hor. Verschiebungen u_h (links und rechts), Darstellung der vert. Verschiebungen u_v inkl. Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen (mittig)

6.4.2.3 Interpretation der Versuchsergebnisse

Wie aus den Versuchsergebnissen der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern gemäß Abb. 6.22 bis Abb. 6.24 allgemein ersichtlich wird, charakterisiert sich das vorliegende Trag- und Verformungsverhalten der Untersuchungen unter Langzeitbeanspruchung durch grundsätzlich ausgeprägte qualitative Ähnlichkeiten im Vergleich zu jenem der Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung. In diesem Sinne weisen die einzelnen Versuchsreihen dabei zwar großteils quantitative Unterscheidungsmerkmale auf, die dabei allerdings vorhandenen, so auch bereits in *Kapitel 5.4.3* beschriebenen, generellen Strukturcharakteristiken können in diesem Kontext aber auch für die Untersuchungen unter Langzeitbeanspruchung bestätigt werden, wie ebenso aus der zusammenfassenden Darstellung der Versuchsergebnisse gemäß Abb. 6.25 ersichtlich wird. Auf Basis dieser beschriebenen Zusammenhänge wird demnach eine Interpretation der vorliegenden Versuchsergebnisse weiterführend möglich, wobei in diesem Zusammenhang hierbei allerdings zusätzlich anzumerken sei, dass auf Basis der genannten Äquivalenzen zwischen den Versuchsergebnissen unter Kurz- und Langzeitbeanspruchung auf eine grafische Darstellung der auftretenden Schädigungs-, Versagens- und Systemmechanismen in der anschließenden Interpretation der Versuchsergebnisse verzichtet wird, diese aber entsprechend aus dem vorangegangenen *Kapitel 5.4.3* entnommen werden kann.

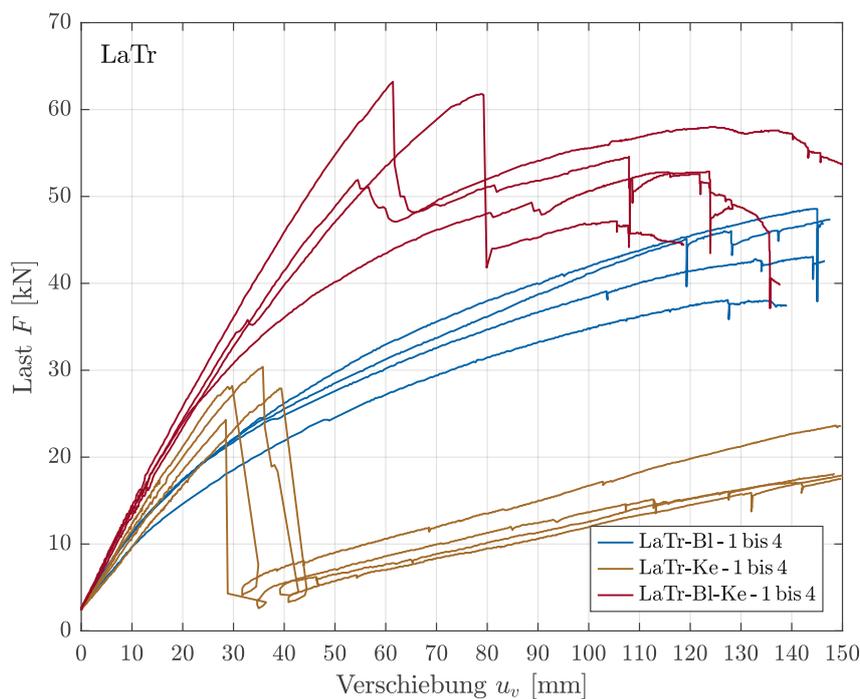


Abb. 6.25: Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Zusammenfassung der Versuchsreihen LaTr-BI, LaTr-Ke und LaTr-BI-Ke

Mit Bezug auf die Versuchstypologie Blech (Versuchsreihe LaTr-BI, Abb. 6.22 bzw. Abb. 6.25) charakterisiert sich das allgemeine Trag- und Verformungsverhalten dieser Pro-

bencharge, äquivalent zu den Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung, durch ein entsprechend hochduktileres Verhalten bei einer allerdings zeitgleich nur in gemäßigttem Maße vorhandenen Tragfähigkeit und Steifigkeit des Verbundsystems.

Wie hierzu aus Abb. 6.22 ersichtlich wird, zeigt die genannte Versuchsreihe demnach wiederum ein grundsätzlich äußerst kontinuierliches, vollständig symmetrisches (äquivalente horizontale Verschiebungen $u_{h,li}$ und $u_{h,re}$ in den Auflager- bzw. Randbereichen der einzelnen Proben) Verformungsverhalten bis zum Erreichen des Bereichs hoher und höchster Verschiebungen u_v . Ebenso ident zu den Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung treten in diesem genannten Verschiebungsbereich die jeweiligen Höchstlasten F_{max} (Höchstlasten F_{max} zwischen 38.08 und 48.57 kN) der Versuchstypologie auf, konträr zu den genannten Untersuchungen zeigt sich diese Versuchsreihe hierbei allerdings durch einen zusätzlich vorhandenen Versagensmechanismus in Form eines fortlaufenden Biegezugversagens der Strukturhölzer (Versagensmechanismus BZH) in einzelnen lokalen Bereichen (in Feldmitte, sowie auch im Felddrittel bzw. im Lasteinleitungsbereich) bestimmt.

Darüber hinaus charakterisiert sich die vorgestellte Versuchstypologie abermalig durch einen konstant während des Versuchsverlaufs auftretenden Schädigungsmechanismus in Form einer Lochleibung der Strukturhölzer (Schädigungsmechanismus LH), einer Plastifizierung der darin vernagelten ballistischen Glattschaftnägel (Schädigungsmechanismus PN), sowie einer Plastifizierung der damit in Verbindung stehenden Puzzle Strip Schubleche (Schädigungsmechanismus PS). Ebenfalls äquivalent zu den Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung kann demnach außerdem ein an der Verbundkomponente Beton kontinuierlich, symmetrisch fortschreitender Schädigungsmechanismus in Form von partiellen Rissbildungen in der Betonzugzone (Schädigungsmechanismus RB) detektiert werden. Im darüber hinaus vorliegenden Kontext einer projektspezifischen Ausformulierung der Kervencharakteristik ohne zusätzliche mechanische Verbindungsmittel zur Abhebesicherung kann für diese Versuchsreihe ebenso kein Abheben der Verbundkomponente Beton von der Verbundkomponente Holz (Systemmechanismus AB) festgestellt werden. Das beschriebene applizierte blecherne Schubverbindersystem kann demnach weiterführend wiederum als a priori gegebene Abhebesicherung innerhalb der Gesamtstruktur aufgefasst werden.

Mit weiterführendem Bezug auf das allgemeine Trag- und Verformungsverhalten der Versuchstypologie Kerve (Versuchsreihe LaTr-Ke, Abb. 6.23 bzw. Abb. 6.25) definiert sich ebendieses, qualitativ äquivalent zu den Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung, durch ein im Vergleich zur Versuchstypologie Blech entsprechend konträres, nicht duktileres Verhalten bei einer wiederum nur in gemäßigttem Maße vorhandenen Tragfähigkeit und Steifigkeit des Verbundsystems. Wie hierzu aus Abb. 6.23 ersichtlich wird, charakterisiert sich die genannte Versuchsreihe demnach abermalig durch ein relativ lineares, großteils symmetrisches (großteils äquivalente horizontale Verschiebungen $u_{h,li}$ und $u_{h,re}$ in den Auflager- bzw. Randbereichen der einzelnen Proben) Verformungsverhalten bis zum Erreichen der jeweiligen Höchstlast F_{max} (Höchstlasten F_{max} zwischen 24.30 und 30.40 kN), gefolgt von einem spontan auftretenden Versagensmechanismus in Form eines Schubversagens des Betons im Ansatz der Kervenflanke (Versagensmechanismus SBK).

So auch bereits aus den Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung zu erkennen, definiert sich die gesamte Versuchsreihe neben diesem maßgebenden Trag- und Verformungsverhalten im Bereich höchster Lasten F darüber hinaus durch ein entsprechend

charakteristisches Nachbruchverhalten im Bereich hoher und höchster Verschiebungen u_v , welches sich abermalig durch ein relativ lineares, symmetrisches Verformungsverhalten unter geringer Systemsteifigkeit ausdrücken lässt. In diesem Kontext kann in dem hierfür maßgebenden Bereich außerdem abermalig ein weiterer, teilweise vorhandener Versagensmechanismus in Form eines fortlaufenden Biegezugversagens der Strukturhölzer (Versagensmechanismus BZH) in einzelnen lokalen Bereichen (in Feldmitte, sowie auch im Felddrittel bzw. im Lasteinleitungsbereich) detektiert werden.

Ebenso lässt sich in dem genannten Bereich wiederum ein, für die projektspezifische konzeptionelle Ausformulierung der Kervencharakteristik ohne zusätzliche mechanische Verbindungsmittel zur Abhebesicherung maßgebendes, Abheben der Verbundkomponente Beton von der Verbundkomponente Holz (Systemmechanismus AB) beobachten. Darüber hinaus kann, äquivalent zur Versuchstypologie Blech, abermalig ein wiederum im gesamten Versuchsverlauf kontinuierlich auftretender, symmetrisch fortschreitender Schädigungsmechanismus in Form von partiellen Rissbildungen in der Betonzugzone (Schädigungsmechanismus RB) festgestellt werden.

Mit des Weiteren vorliegendem Bezug auf das allgemeine Trag- und Verformungsverhalten der Versuchstypologie Blech-Kerbe (Versuchsreihe LaTr-BI-Ke, Abb. 6.24 bzw. Abb. 6.25) definiert sich ebendieses, wie auch bereits aus den Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung zu erkennen, durch kumulierte qualitative Eigenschaften der vorangegangenen beschriebenen Versuchstypologien Blech (Versuchsreihe LaTr-BI) und Kerbe (Versuchsreihe LaTr-Ke), wobei für diese Versuchstypologie darüber hinaus abermalig ein in diesem Kontext wesentlicher Interaktionsmechanismus auf Basis der Kombination der divergenten Schubverbindersysteme zu erkennen ist. Wie hierzu aus Abb. 6.24 ersichtlich wird, charakterisiert sich die genannte Versuchsreihe demnach durch eine einerseits kombinierte, wesentlich gesteigerte Tragfähigkeit und Steifigkeit des Verbundsystems, sowie andererseits auch durch ein in diesem Sinne koexistentes Spektrum an auftretenden Schädigungs- und Versagensmechanismen. An dieser Stelle sei hierbei darüber hinaus zusätzlich anzumerken, dass diese beschriebenen, und nachfolgend detailliert ausgeführten, Eigenschaften sich hierbei hauptsächlich auf die Proben LaTr-BI-Ke-2 bis 4 beziehen, da die Probe LaTr-BI-Ke-1 aufgrund einer einseitig vorhandenen verminderten Betonagequalität im Kerven- bzw. Auflagerbereich ein vergleichsweise leicht abgeändertes Trag- und Verformungsverhalten im Bereich mittlerer Verschiebungen u_v (kein Auftreten eines Schubversagens des Betons im Ansatz der Kervenflanke) aufweist.

Die Versuchsreihe LaTr-BI-Ke zeigt demnach, wie grundsätzlich auch aus den Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung zu erkennen, im Bereich geringer vertikaler Verschiebungen u_v ein kontinuierliches, symmetrisches, mit zunehmender Last leicht nicht-lineares duktileres Verformungsverhalten bis zum Eintreten eines vollständig antimetrisch (einseitig maßgebende horizontale Verschiebungen $u_{h,li}$ bzw. $u_{h,re}$ in den Auflager- bzw. Randbereichen der einzelnen Proben) und spontan auftretenden, maßgebenden Versagensmechanismus in Form eines Schubversagens des Betons im Ansatz der Kervenflanke (Versagensmechanismus SBK). Im Vergleich zur Versuchstypologie Kerbe kann hierbei nach dem Eintreten dieses Versagensmechanismus allerdings abermalig eine ausgebildete Traglastreserve im Nachbruchverhalten festgestellt werden. So fällt das aufnehmbare Lastniveau bei dieser Versuchsreihe nach dem Auftreten des Versagensmechanismus SBK zwar wiederum ab, kann daraufhin folgend aber noch partiell gesteigert werden. In diesem

Sinne findet sich die erreichbare Höchstlast F_{max} bei den Proben LaTr-BI-Ke-1 und 2 ($F_{max} = 52.80$ bzw. 58.00 kN) auch erst im Bereich höchster Verschiebungen u_v wieder. Für die Probe LaTr-BI-Ke-1 ist dies aufgrund der einseitig vorhandenen verminderten Betonequalität zwar a priori naheliegend, für die Probe LaTr-BI-Ke-2 stellt sich dieser Umstand allerdings entsprechend einem Erreichen der Höchstlast F_{max} erst nach dem Auftreten des Versagensmechanismus SBK als maßgebend dar. Die Proben LaTr-BI-Ke-3 und 4 zeichnen sich demgegenüber zwar durch eine erreichbare Höchstlast F_{max} im Bereich des Versagensmechanismus SBK aus ($F_{max} = 63.20$ bzw. 61.80 kN), eine leichte charakteristische Steigerung des aufnehmbaren Lastniveaus im Nachbruchverhalten kann qualitativ aber wiederum auch bei diesen Proben beobachtet werden. Im Detail zeigt sich das Nachbruchverhalten im Bereich hoher bis höchster Verschiebungen u_v hierbei, äquivalent zu den Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung, als charakteristisch durch den Einsatz der blechernen Komponente bestimmt. So bildet sich nach dem Auftreten des maßgebenden Versagensmechanismus SBK wiederum ein kombinierter Schädigungsmechanismus in Form einer Lochleibung der Strukturhölzer (Schädigungsmechanismus LH), einer Plastifizierung der darin vernagelten ballistischen Glattschaftnägel (Schädigungsmechanismus PN), sowie einer Plastifizierung der damit in Verbindung stehenden Puzzle Strip Schubleche (Schädigungsmechanismus PS) aus.

Darauf hin folgend ist darüber hinaus abermalig ebenso ein entsprechender abschließender Versagensmechanismus in Form eines fortlaufenden Biegezugversagens der Strukturhölzer (Versagensmechanismus BZH) in einzelnen lokalen Bereichen (im Felddrittel bzw. im Lasteinleitungsbereich) zu erkennen. Wiederum äquivalent zu den Versuchstypologien Blech und Kerbe und wie auch aus den Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung zu erkennen, kann außerdem ein an der Verbundkomponente Beton im gesamten Versuchsverlauf kontinuierlich auftretender, symmetrisch fortlaufender Schädigungsmechanismus in Form von partiellen Rissbildungen in der Betonzugzone (Schädigungsmechanismus RB) detektiert werden. Im darüber hinaus vorliegenden Kontext einer projektspezifischen Ausformulierung der Kervencharakteristik ohne zusätzliche mechanische Verbindungsmittel zur Abhebesicherung kann auch für diese Versuchsreihe, im Vergleich zur Versuchstypologie Kerbe, kein Abheben der Verbundkomponente Beton von der Verbundkomponente Holz (Systemmechanismus AB) festgestellt werden. Der festgehaltene Interaktionsmechanismus innerhalb der applizierten Schubverbindersysteme kann demnach weiterführend ebenso für die Untersuchungen unter Langzeitbeanspruchung wiederum als a priori gegebene Abhebesicherung innerhalb der Gesamtstruktur aufgefasst werden.

6.4.2.4 Vergleich der Versuchsergebnisse unter Kurz- und Langzeitbeanspruchung

Unter der Berücksichtigung der Versuchsergebnisse der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern unter Kurz- und Langzeitbeanspruchung gemäß *Kapitel 5.4* bzw. *Kapitel 6.4.2* kann abschließend ein komparativer Vergleich der hierbei jeweils vorhandenen mechanischen Eigenschaften und Entitäten stattfinden, wie kumulativ dargestellt auch aus nachfolgender Abb. 6.26 entnommen werden kann.

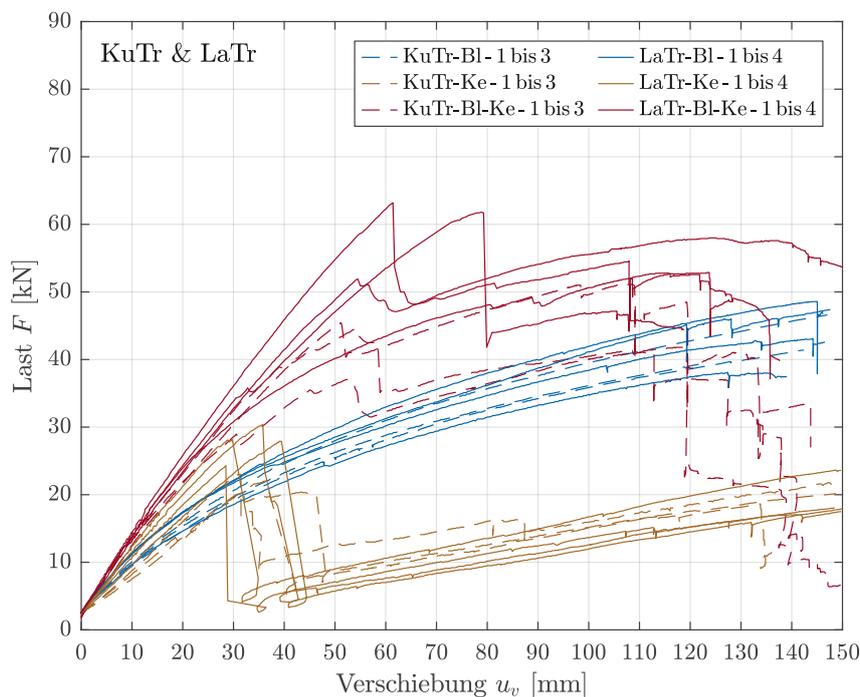


Abb. 6.26: Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern | Zusammenfassung der Versuchsreihen KuTr-BI, KuTr-Ke und KuTr-BI-Ke sowie LaTr-BI, LaTr-Ke und LaTr-BI-Ke

Wie aus Abb. 6.26 ersichtlich, definieren sich die resultierenden Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche unter Kurz- und Langzeitbeanspruchung (KuTr und LaTr), wie auch bereits eingangs erwähnt, durch qualitativ grundsätzlich ähnliche Charakteristiken, weisen in ihrer dabei vorhandenen quantitativen Ausprägung darüber hinaus jedoch moderate bis teilweise maßgebliche Unterscheidungsmerkmale auf. In diesem Sinne zeigen sich die Versuchsreihen KuTr-BI und LaTr-BI hierbei durch ein im Allgemeinen sehr ähnliches Last-Verschiebungs-Verhalten im gesamten Verschiebungsbereich bestimmt, während die Versuchsreihen KuTr-Ke und LaTr-Ke bzw. die Versuchsreihen KuTr-BI-Ke und LaTr-BI-Ke demgegenüber allerdings teilweise deutliche Unterschiede in ihrem jeweiligen Last-Verschiebungs-Verhalten im Bereich mittlerer bis höchster Verschiebungen u_v aufweisen.

Basierend auf diesen Zusammenhängen kann ein maßgeblicher Einfluss des zeitlichen Verlaufs (Betrachtung der zeitlichen Langzeit Ebene im Vergleich zur zeitlichen Kurzzeit Ebene) auf das explizite Trag- und Verformungsverhalten schlussfolgernd im Speziellen für die kernenbasierten Versuchstypologien (KuTr-Ke und LaTr-Ke bzw. KuTr-BI-Ke und LaTr-BI-Ke) festgehalten werden, während für den darüber hinaus vorliegenden Fall der rein blechbasierten Versuchstypologien (KuTr-BI und LaTr-BI) demgegenüber nur verhältnismäßig geringere zeitliche Entitätsänderungen abgeleitet werden können, wie auch nachfolgend aus Abb. 6.27 entnommen werden kann.

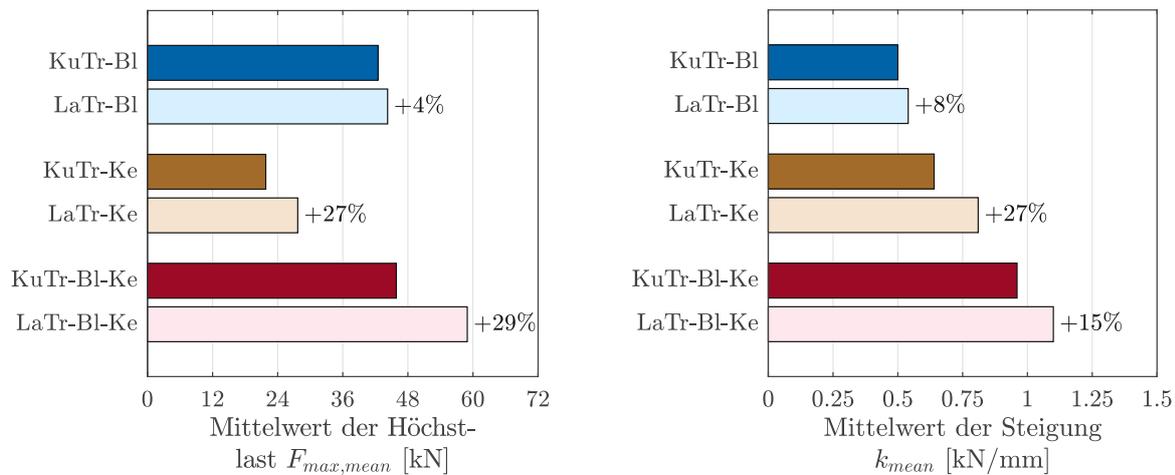


Abb. 6.27: Vergleich der maßgebenden mechanischen Entitäten der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern unter Kurz- und Langzeitbeanspruchung | Mittelwert der Höchstlast $F_{max,mean}$ (links), Mittelwert der Steigung k_{mean} (rechts)

Wie aus Abb. 6.27 ersichtlich wird, beinhaltet die genannte Darstellung die zeitlichen Entitätsänderungen mit Bezug auf den Mittelwert der Höchstlast $F_{max,mean}$, sowie auf den Mittelwert der Steigung k_{mean} . Im Sinne einer erklärenden Beschreibung dieser Größen handelt es sich hierbei einerseits um die gemittelte auftretende Höchstlast der einzelnen Versuchsreihen, sowie andererseits um die gemittelte Steigung der gegebenen Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der einzelnen Versuchsreihen in einem Lastbereich zwischen 10 und 20 kN.

Mit konkretem Bezug auf die rein blechbasierten Versuchsreihen KuTr-BI und LaTr-BI zeigen sich ebendiese, wie auch bereits eingangs erwähnt, durch grundsätzlich nur geringe zeitliche Entitätsänderungen bestimmt, die in diesem Sinne für diese Versuchsreihen vorliegenden Last-Verschiebungs-Zusammenhänge stellen sich demnach schlussfolgernd durch entsprechende, sowohl qualitativ als auch quantitativ vorhandene, Äquivalenzen dar. Mit genauerem Hinblick auf die dabei vorhandenen mechanischen Entitäten kann hierbei mit fortschreitender zeitlicher Komponente weiterführend eine Steigerung des Mittelwerts der Höchstlast $F_{max,mean}$ von 42.50 auf 44.27 kN (+4%) festgehalten werden, sowie definiert sich der Mittelwert der Steigung k_{mean} durch eine Erhöhung von 0.50 auf 0.54 kN/mm (+8%). Betrachtet man in diesem Kontext weiterführend die mit diesen Versuchsreihen in Verbindung stehenden Versuchsergebnisse der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern gemäß Kapitel 6.3.2.4 (Versuchsreihen KuPu-BI und LaPu-BI), wird gemäß der hierbei vorliegenden zeitlichen Entitätsänderungen (mittlerer Verschiebungsmodul $K_{ser,mean}$ -11% bzw. Mittelwert der Schubtragfähigkeit $F_{vR,mean}$ +3%) abschließend der Einfluss der zeitabhängigen Betondruckfestigkeit $f_c(t)$ innerhalb der Tragstruktur sichtbar. Eine mit zeitlichem Verlauf zunehmende Betondruckfestigkeit $f_c(t)$ der Strukturkomponente Beton führt demnach, trotz verringertem mittleren Verschie-

bungsmodul $K_{ser,mean}$ des applizierten Schubverbindersystems, zu schlussfolgernd leicht erhöhten mechanischen Entitäten der großmaßstäblichen Versuchstypologie und somit zu einem grundsätzlich verbesserten Trag- und Verformungsverhalten der vorliegenden Versuchsreihe.

Mit weiterem Bezug auf die rein kervenbasierten Versuchsreihen KuTr-Ke und LaTr-Ke charakterisieren sich ebendiese, gegensätzlich zu den rein blechbasierten Versuchsreihen KuTr-Bl und LaTr-Bl, durch deutliche zeitliche Entitätsänderungen, die in diesem Kontext für diese Versuchsreihen vorliegenden Last-Verschiebungs-Zusammenhänge zeigen sich demnach schlussfolgernd durch maßgebliche quantitative Unterscheidungsmerkmale (bei qualitativ grundsätzlich vorliegenden Äquivalenzen) bestimmt. Bei detaillierter Betrachtung der dabei vorhandenen mechanischen Entitäten kann hierbei mit fortschreitendem zeitlichen Verlauf weiterführend eine Steigerung des Mittelwerts der Höchstlast $F_{max,mean}$ von 21.80 auf 27.70 kN (+27%) erreicht werden, sowie charakterisiert sich der Mittelwert der Steigung k_{mean} durch eine Erhöhung von 0.64 auf 0.81 kN/mm (+27%). Die betrachteten mechanischen Entitäten können bei dieser Versuchsreihe schlussfolgernd demnach um mehr als ein Viertel der ursprünglichen Werte gesteigert werden. Stellt man in diesem Kontext weiterführend die mit diesen Versuchsreihen in Verbindung stehenden Versuchsergebnisse der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern gemäß Kapitel 6.3.2.4 (Versuchsreihen KuPu-Ke und LaPu-Ke) in den Fokus, wird gemäß der hierbei vorliegenden zeitlichen Entitätsänderungen (mittlerer Verschiebungsmodul $K_{ser,mean} +11\%$ bzw. Mittelwert der Schubtragfähigkeit $F_{vR,mean} +27\%$) abschließend wiederum der Einfluss der zeitabhängigen Betondruckfestigkeit $f_c(t)$ innerhalb der Tragstruktur sichtbar. So führt eine mit zeitlichem Verlauf zunehmende Betondruckfestigkeit $f_c(t)$ der Strukturkomponente Beton bei dieser Versuchsreihe zu schlussfolgernd maßgeblich erhöhten mechanischen Entitäten der großmaßstäblichen Versuchstypologie und somit zu einem abermalig höherwertigen Trag- und Verformungsverhalten. Konträr zu den vorliegenden Charakteristiken bei den rein blechbasierten Versuchstypologien stellt sich dieser Umstand bei den rein kervenbasierten Versuchsreihen grundsätzlich allerdings nicht nur auf Basis der verbesserten Materialeigenschaften der allgemeinen Strukturkomponente Beton dar, sondern wird a priori darüber hinaus auch durch die erhöhte Betondruckfestigkeit f_c des eigentlichen kervenbasierten Schubverbindersystems wesentlich beeinflusst.

Mit des Weiteren vorliegendem Bezug auf die kombiniert ausgeführten, blech- und kervenbasierten Versuchsreihen KuTr-Bl-Ke und LaTr-Bl-Ke können ebendiese, ähnlich zu den rein kervenbasierten Versuchsreihen KuTr-Ke und LaTr-Ke, auf Basis von teilweise deutlichen zeitlichen Entitätsänderungen beschrieben werden, die für diese Versuchsreihen vorliegenden Last-Verschiebungs-Zusammenhänge zeigen sich demnach schlussfolgernd wiederum durch maßgebliche quantitative Unterscheidungsmerkmale (bei qualitativ grundsätzlich vorliegenden Äquivalenzen) bestimmt. Mit genauerem Hinblick auf die dabei vorhandenen mechanischen Entitäten kann hierbei mit fortschreitender zeitlicher Komponente weiterführend abermalig eine Steigerung des Mittelwerts der Höchstlast $F_{max,mean}$, als auch eine Erhöhung des Mittelwerts der Steigung k_{mean} festgestellt werden. In diesem Sinne steigert sich der Mittelwert der Höchstlast $F_{max,mean}$ von 45.87 auf 58.95 kN (+29%) bzw. erhöht sich der Mittelwert der Steigung k_{mean} von 0.96 auf 1.10 kN/mm (+15%), die betrachteten mechanischen Entitäten können somit auch bei dieser Versuchsreihe schlussfolgernd maßgeblich, um annähernd ein Drittel bzw. ein annäherndes Sechstel der

ursprünglichen Werte, gesteigert werden, wobei in diesem Kontext im Speziellen die besonders deutliche Erhöhung des Mittelwerts der Höchstlast $F_{max,mean}$ hervorgehoben werden kann. Betrachtet man in diesem Kontext weiterführend die mit diesen Versuchsreihen in Verbindung stehenden Versuchsergebnisse der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern gemäß *Kapitel 6.3.2.4* (Versuchsreihen KuPu-BI-Ke und LaPu-BI-Ke), wird gemäß der hierbei vorliegenden zeitlichen Entitätsänderungen (mittlerer Verschiebungsmodul $K_{ser,mean} +18\%$ bzw. Mittelwert der Schubtragfähigkeit $F_{vR,mean} +25\%$) abschließend auch bei dieser Versuchsreihe der Einfluss der zeitabhängigen Betondruckfestigkeit $f_c(t)$ innerhalb der Tragstruktur sichtbar. Grundsätzlich äquivalent zur rein kervenbasierten Versuchstypologie, führt eine mit zeitlichem Verlauf zunehmende Betondruckfestigkeit $f_c(t)$ demnach abermalig zu schlussfolgernd maßgeblich erhöhten mechanischen Entitäten der betrachteten großmaßstäblichen Versuchstypologie und somit zu einem gleichfalls höherwertigen Trag- und Verformungsverhalten, wobei sich dieser Umstand im Speziellen wiederum nicht nur auf Basis der verbesserten Materialeigenschaften der allgemeinen Strukturkomponente Beton darstellt, sondern weiterführend abermalig auch durch die erhöhte Betondruckfestigkeit f_c des eigentlichen unter anderem kervenbasierten Schubverbindersystems beeinflusst wird.

Kapitel 7

Versuchsergebnisse im Kontext literarischer und normativer Vergleichsbetrachtungen

Während in *Kapitel 3* allgemeine, den generellen Untersuchungsgegenstand betreffende, forschungs- und entwicklungsrelevante, sowie auch damit in Verbindung stehende normative, Inhalte grundsätzlich eingeführt und betrachtet werden, beinhalten *Kapitel 4*, *Kapitel 5* und *Kapitel 6* demgegenüber die den expliziten Forschungsgegenstand betreffenden, maßgebenden Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten des untersuchten Verbunddeckensystems.

Um eine entsprechende Verbindung zwischen diesen, bisher alleinstehenden, Teilbereichen zu schaffen, und um weiterführend eine demgemäße kontextuelle Einordnung der vorhandenen forschungsrelevanten Versuchsergebnisse zu gewährleisten, werden im nachfolgenden *Kapitel 7* entsprechende Vergleichsbetrachtungen zwischen den maßgebenden Versuchsergebnissen gemäß *Kapitel 5* und *Kapitel 6* sowie den begleitenden literarischen und normativen Bezugsgrößen gemäß *Kapitel 3*, und darüber hinaus weiteren maßgebenden literarischen und normativen Inhalten, durchgeführt. Auf Basis dieser Betrachtungen soll es schlussfolgernd demnach möglich werden, einerseits nicht nur einen kumulierten Überblick über die generierten Versuchsergebnisse zu geben, sondern diese andererseits auch in einem komparativen Kontext gegenüberzustellen und darüber hinaus auch im Sinne einer aktuellen Normungslage zu bewerten sowie auch kontextuelle Empfehlungen und Anmerkungen zu ebendieser zu generieren.

7.1 Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern

7.1.1 Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern

Der kontextuelle Umfang der Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern kann gemäß den Inhalten aus *Kapitel 5* und *Kapitel 6* anhand der sechs maßgebenden Versuchsreihen KuPu-BI, KuPu-Ke und KuPu-BI-Ke bzw. LaPu-BI, LaPu-Ke und LaPu-BI-Ke

der drei Versuchstypologien Blech, Kerbe und Blech-Kerbe festgehalten werden. Wesentlichste, aus diesen Kapiteln weiterführend ableitbare und im nachfolgenden behandelte, Untersuchungsgrößen stellen in diesem Sinne hierbei der mittlere Verschiebungsmodul $K_{ser,mean}$, die charakteristische Schubtragfähigkeit $F_{vR,k}$ und der Mittelwert des Duktilitätsmaßes $D_{s,mean}$ der Versuchsreihen dar.

Mit Bezug auf diese genannten mechanischen Entitäten können demgemäß die maßgebenden Vergleichsbetrachtungen der beschriebenen Versuchstypologien stattfinden, wobei die weiterführende Gliederung der Untersuchungsergebnisse hierbei grundsätzlich auf Basis der einerseits blechbasierten, sowie andererseits der kervenbasierten Versuchsreihen (KuPu-BI und LaPu-BI bzw. KuPu-Ke, LaPu-Ke, KuPu-BI-Ke und LaPu-BI-Ke) erfolgen soll. Basierend auf dieser genannten Strukturierung wird es schlussfolgernd demnach möglich, einerseits eine entsprechende kontextuelle Gegenüberstellung der vorliegenden Untersuchungsergebnisse mit ausgewählten literarischen und normativen Vergleichswerten für die jeweils vorhandenen individuellen Systemcharakteristiken zu erreichen, sowie diese andererseits auch auf Basis der vorliegenden literarischen und normativen Vergleichsparameter folglich zu bewerten und zu verifizieren.

7.1.1.1 Blechbasierte Versuchsreihen KuPu-BI und LaPu-BI

Gemäß dieser beschriebenen Strukturierung und mit entsprechendem weiterführenden Bezug auf die rein blechbasierten Versuchsreihen KuPu-BI und LaPu-BI beziehen sich die kontextuellen nachfolgenden Vergleichsbetrachtungen gemäß Abb. 7.1, neben den Versuchsergebnissen aus *Kapitel 5* und *Kapitel 6*, hierbei in literarischer Hinsicht in vollem Umfang auf vorhandene, ausgewählte Versuchsreihen gemäß *Kapitel 3*, sowie des Weiteren darüber hinaus auf normative Bezugsentitäten gemäß *ÖNORM B 1995-1-1* [12] und *ONR CEN/TS 19103* [3] (unter ebenso gegebener Berücksichtigung des zugehörigen nationalen Anhangs *ONR CEN/TS 19103/NA* [63]). Mit speziellem Hinblick auf die vergleichend dargestellten Versuchsreihen gemäß *Kapitel 3* lassen sich diese, entsprechend den spezifischen Eigenschaften der rein blechbasierten Versuchsreihen, als grundsätzlich variierende Konzepttypologien in Form der Versuchsreihen St-gp-90°-1 nach *Branco* [25], St-gp-90°-2 nach *Dias* [19] und Npl-1 nach *Van der Linden* [33] kumuliert zusammenfassen.

Hierbei handelt es sich gemäß den genannten unterschiedlichen Konzepttypologien, um einerseits *stiftförmige glattschaftige/profilierete VM - 90°* in Form von Nägeln bzw. Stabdübeln aus Bewehrungsstahl (St-gp-90°-1 bzw. 2), sowie um andererseits *Nagelplatten* in Form einer rechteckig gefalzten, in der Verbundfuge verpressten Ausführung (Npl-1). Eine vergleichende Betrachtung der rein blechbasierten Versuchsreihen KuPu-BI und LaPu-BI soll demnach nicht nur auf Basis einer konzeptionell äquivalenten Strukturtypologie (St-gp-90°-1) erfolgen, sondern schlussfolgernd des Weiteren ebenso im Kontext typologisch divergenter Schubverbindersysteme (St-gp-90°-2 bzw. Npl-1) betrachtet werden⁵. Die abschließend weiters gegebene normative Vergleichsgrundlage innerhalb der Betrachtungen stellt sich darüber hinaus als das in den eingangs erwähnten Normungsdokumenten

⁵Die Versuchsreihen St-gp-90°-1 und 2, sowie auch die normative Vergleichsgrundlage und die Versuchsreihen KuPu-BI und LaPu-BI werden hierbei auf einen einzelnen *fiktiven Verbindungspunkt* bezogen und somit gemäß den mechanischen Entitäten eines einzelnen Verbindungsmittels dargestellt, darüber hinaus bezieht sich die Versuchsreihe Npl-1 auf entsprechende mechanische Entitäten einer Längenausdehnung von 1 cm.

vorhandene Berechnungskonzept für die in den Untersuchungen gemäß *Kapitel 5* und *Kapitel 6* verwendeten ballistisch vernagelten Glattschaftnägel der applizierten Puzzle Strip Schubbleche dar.

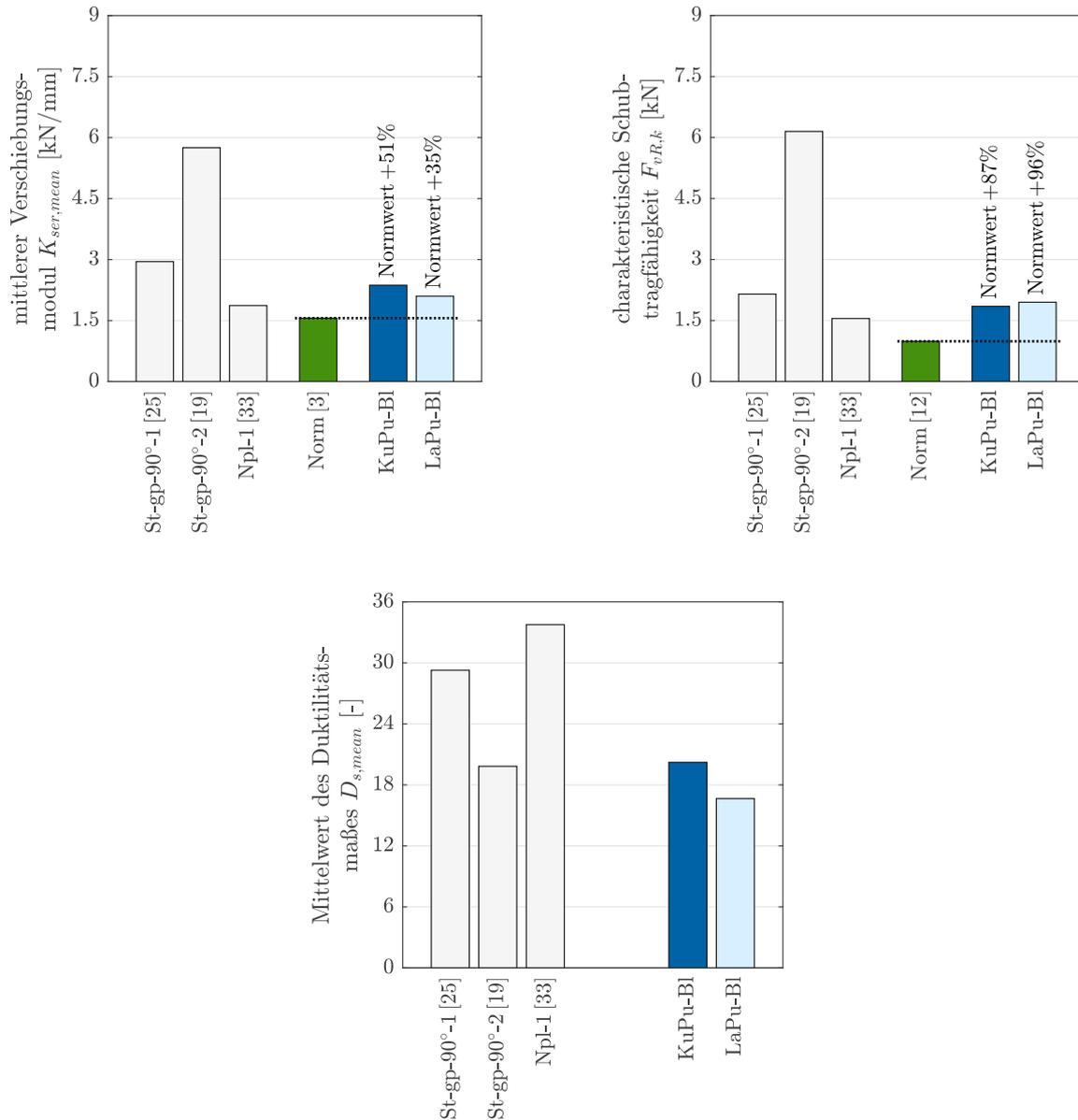


Abb. 7.1: Vergleich der maßgebenden mechanischen Entitäten der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern unter Kurz- und Langzeitbeanspruchung im Kontext literarischer und normativer Vergleichsbetrachtungen | Versuchreihen KuPu-BI und LaPu-BI | mittlerer Verschiebungsmodul $K_{ser,mean}$ (oben links), charakteristische Schubtragfähigkeit $F_{vR,k}$ (oben rechts), Mittelwert des Duktilitätsmaßes $D_{s,mean}$ (unten)

Wie weiterführend aus der gegebenen Abb. 7.1 entnommen werden kann, wird eine entsprechende Vergleichsbetrachtung der Versuchsreihen KuPu-BI und LaPu-BI mit den

vorhandenen literarischen und normativen Bezugsentitäten demgemäß folglich möglich. Betrachtet man in diesem Zusammenhang die Untersuchungsergebnisse der Versuchsreihen KuPu-BI und LaPu-BI vergleichend mit den vorliegenden normativen Bezugsgrößen, wird deutlich, dass das vorhandene Schubverbindersystem in Form der ballistisch vernagelten Puzzle Strip Schubleche vollumfänglich wesentliche Sicherheitsreserven aufweist und die gängige normative Berechnungsgrundlage die mechanischen Eigenschaften der Versuchstypologie schlussfolgernd maßgebend unterschätzt. Mit Bezug auf den mittleren Verschiebungsmodul $K_{ser,mean}$ können in diesem Kontext, trotz einer vorhandenen Abnahme dieser Entität mit fortschreitendem zeitlichen Verlauf, demnach Sicherheitsreserven von 51% (KuPu-BI) bzw. 35% (LaPu-BI) der genannten mechanischen Größe festgestellt werden. Vergleichsweise noch stärker ausgeprägt zeigt sich dieser Zusammenhang darüber hinaus auch mit Bezug auf die charakteristische Schubtragfähigkeit $F_{vR,k}$, als sich die beschriebene mechanische Entität in diesem Kontext sogar durch gesteigerte Größen in einem Bereich von 87% (KuPu-BI) bzw. 96% (LaPu-BI) charakterisiert. Im Sinne einer normativen Vergleichsbetrachtung lässt sich das vorliegende Schubverbindersystem in Form der ballistisch vernagelten Puzzle Strip Schubleche abschließend folglich als vollständig abgesichert bezeichnen, eine Verwendung der tatsächlichen experimentell generierten mechanischen Größen anstelle des normativen Berechnungsprozederes wird aus Sicht des Autors demnach folglich empfohlen.

Betrachtet man die Untersuchungsergebnisse der Versuchsreihen KuPu-BI und LaPu-BI darüber hinaus vergleichend mit den ausgewählten literarischen Bezugsgrößen, können die Eigenschaften des gegebenen Schubverbindersystems als in einem grundsätzlich erwartbaren Rahmen beschrieben werden. Stellt man in diesem Sinne die mechanischen Entitäten der Versuchsreihen KuPu-BI und LaPu-BI denen der konzeptionell ähnlichen Versuchsreihe St-gp-90°-1 (*stiftförmige glattschaftige/profilierete VM - 90°* in Form von Nägeln) gegenüber, können auch dementsprechende qualitative Äquivalenzen in den jeweiligen mechanischen Vergleichsgrößen erkannt werden. Zeigt sich die Versuchsreihe St-gp-90°-1 hierbei durch, sowohl mit Hinblick auf den mittleren Verschiebungsmodul $K_{ser,mean}$, als auch mit Bezug auf die charakteristische Schubtragfähigkeit $F_{vR,k}$ und den Mittelwert des Duktilitätsmaßes $D_{s,mean}$, vergleichsweise jeweils gesteigerte mechanische Entitäten bestimmt, lässt sich für diese Versuchsreihe jedoch trotzdem das für die generelle Konzepttypologie Nagel charakteristische Erscheinungsbild erkennen. Die grundsätzlichen mechanischen Eigenschaften der Versuchsreihen KuPu-BI und LaPu-BI lassen sich auf Basis der Versuchsreihe St-gp-90°-1 demnach schlussfolgernd konzeptionell bestätigen und darüber hinaus ebenso vergleichend validieren.

Stellt man die mechanischen Entitäten der Versuchsreihen KuPu-BI und LaPu-BI darüber hinaus denen der konzeptionell abweichenden Versuchsreihe St-gp-90°-2 (*stiftförmige glattschaftige/profilierete VM - 90°* in Form von Stabdübeln aus Bewehrungsstahl) gegenüber, zeigen sich dabei sowohl der mittlere Verschiebungsmodul $K_{ser,mean}$, als auch die charakteristische Schubtragfähigkeit $F_{vR,k}$, durch grundsätzlich wesentlich gesteigerte Vergleichsentitäten bestimmt (der Mittelwert des Duktilitätsmaßes $D_{s,mean}$ liegt demgegenüber in einem ähnlichen Bereich), aufgrund der allerdings einleitend in *Kapitel 3* festgestellten kontextuellen Zusammenhänge lässt sich dieser Umstand aber als dementsprechend erwartbar beschreiben. Die in diesem Sinne dabei festgestellten proportionalen Prinzipien lassen sich basierend auf den vorliegenden Versuchsergebnissen folglich demnach

auch für die untersuchten Versuchsreihen KuPu-BI und LaPu-BI entsprechend feststellen. Eine demgemäße Einordnung der vorliegenden Untersuchungsergebnisse im Kontext der in *Kapitel 3* abgeleiteten Zusammenhänge wird schlussfolgernd auch auf Basis der gegebenen Vergleichsbetrachtungen mit der Versuchsreihe St-gp-90°-2 folglich möglich.

Betrachtet man abschließend darüber hinaus die mechanischen Entitäten der Versuchsreihen KuPu-BI und LaPu-BI vergleichend mit jenen der ebenfalls konzeptionell abweichenden Versuchsreihe Npl-1 (*Nagelplatten* in Form einer rechteckig gefalzten, in der Verbundfuge verpressten Ausführung), liegen hierbei, sowohl mit Bezug auf den mittleren Verschiebungsmodul $K_{ser,mean}$, als auch mit Hinblick auf die charakteristische Schubtragfähigkeit $F_{vR,k}$, grundsätzlich sehr ähnliche mechanische Entitäten vor (der Mittelwert des Duktilitätsmaßes $D_{s,mean}$ liegt demgegenüber in einem nochmals erhöhten Bereich). Als die gegebenen Eigenschaften der Versuchsreihe Npl-1 sich, wie eingangs angemerkt, hierbei auf eine Längenausdehnung von 1 cm beziehen und die Versuchsreihen KuPu-BI und LaPu-BI sich in den Vergleichsbetrachtungen durch einen einzelnen Verbindungspunkt charakterisieren, können daraus demnach entsprechende Schlüsse mit Hinblick auf die jeweilige Längenausdehnung der betrachteten Schubverbindersysteme gezogen werden. Die mechanischen Eigenschaften eines einzelnen in den Untersuchungen verwendeten ballistisch vernagelten Glattschaftnagels in Verbindung mit dem dabei applizierten Puzzle Strip Schublech entsprechen somit ungefähr den vergleichenden Eigenschaften einer Nagelplatte pro cm Längenausdehnung. Beurteilt man das generelle Tragverhalten der beschriebenen Schubverbindertypologien schlussfolgernd in einem rein kleinmaßstäblichen Kontext (keine Berücksichtigung des systemischen Tragverhaltens in großmaßstäblichen Trägerstrukturen), lassen sich für das Strukturverhalten der vergleichend betrachteten Versuchsreihen KuPu-BI und LaPu-BI bzw. Npl-1 abschließend demnach deutliche, einerseits qualitative, als andererseits auch entsprechende quantitative Ähnlichkeiten erkennen.

7.1.1.2 Kervenbasierte Versuchsreihen KuPu-Ke und LaPu-Ke bzw. KuPu-BI-Ke und LaPu-BI-Ke

Gemäß der einleitend beschriebenen Strukturierung und mit entsprechendem weiterführenden Bezug auf die kervenbasierten Versuchsreihen KuPu-Ke und LaPu-Ke bzw. KuPu-BI-Ke und LaPu-BI-Ke beziehen sich die kontextuellen nachfolgenden Vergleichsbetrachtungen gemäß Abb. 7.2, neben den Versuchsergebnissen aus *Kapitel 5* und *Kapitel 6*, hierbei in literarischer Hinsicht in vollem Umfang wiederum auf vorhandene, ausgewählte Versuchsreihen gemäß *Kapitel 3*, sowie des Weiteren darüber hinaus abermalig auf normative Bezugsentitäten gemäß *ONR CEN/TS 19103* [3] (unter ebenso gegebener Berücksichtigung des zugehörigen nationalen Anhangs *ONR CEN/TS 19103/NA* [63]).

Mit speziellem Hinblick auf die vergleichend dargestellten Versuchsreihen gemäß *Kapitel 3* lassen sich diese, entsprechend den spezifischen Eigenschaften der kervenbasierten Versuchsreihen, als strukturell generell ähnliche Konzepttypologien in Form der Versuchsreihen Ke-oVMs-1 nach *Djoubissie* [28], Ke-oVMs-2 nach *Jiang* [37] und Ke-oVMs-5 nach *Zhang* [38], sowie Ke-mVM-2 nach *Jiang* [37], Ke-mVM-3 nach *Zhang* [38] und Ke-mVM-5 nach *Shi* [43] kumuliert zusammenfassen. Hierbei handelt es sich gemäß den strukturell generell ähnlichen Konzepttypologien, um einerseits *Kerven ohne VM spröde* (Ke-oVMs-1, 2 und 5) und somit um den Versuchsreihen KuPu-Ke und LaPu-Ke ähnliche Strukturtypen, sowie um andererseits *Kerven mit stiftförmigen geschraubten VM - 90°* (Ke-mVM-2, 3

und 5) und in diesem Sinne den Versuchsreihen KuPu-Bl-Ke und LaPu-Bl-Ke angenäherte Konzeptideen. Neben diesen grundsätzlich konzeptionellen Auswahlkriterien definiert sich die vorliegende Vergleichsgrundlage darüber hinaus auch wesentlich auf Basis der hierbei jeweils vorhandenen Kervertiefe h_n .

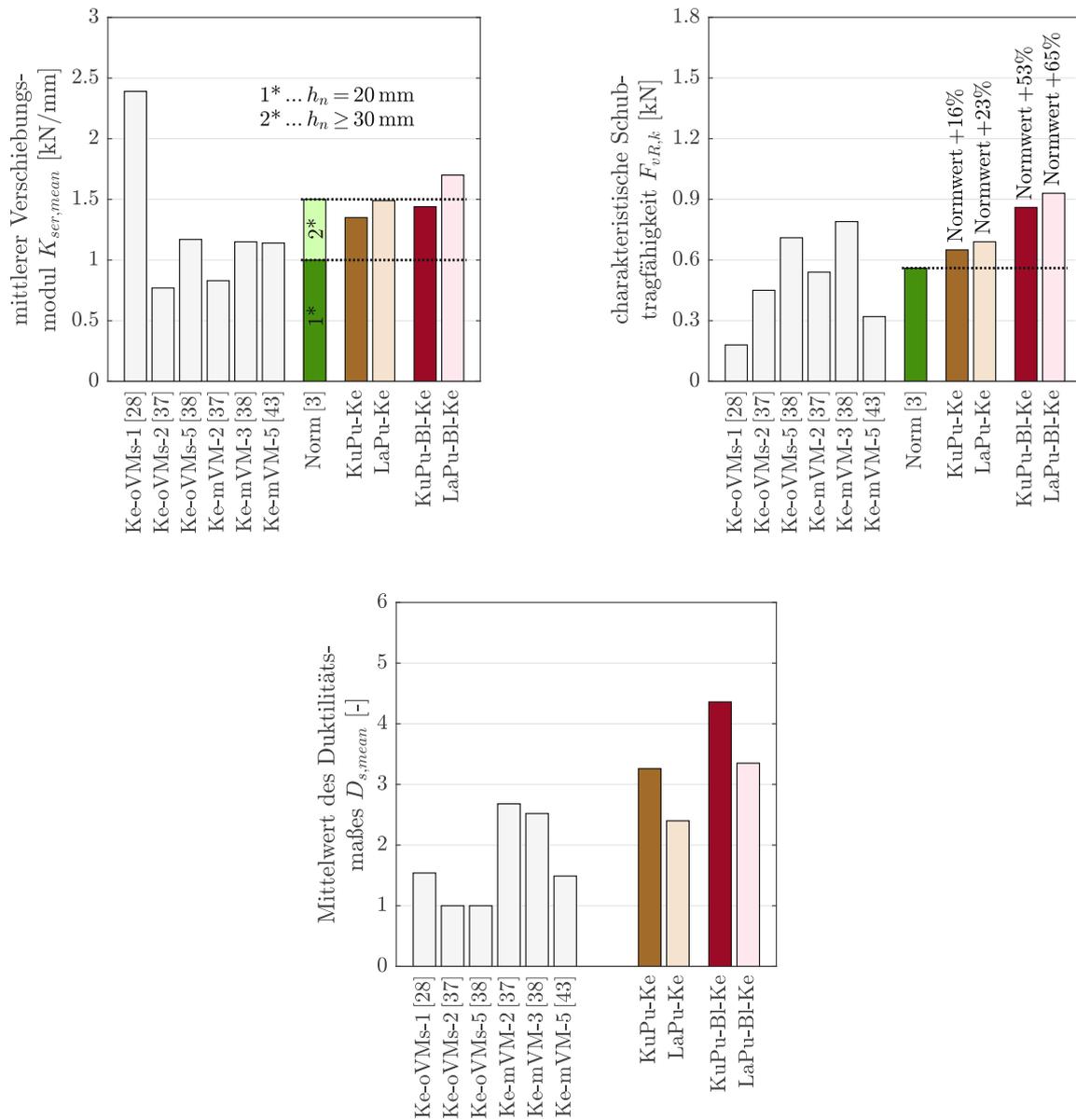


Abb. 7.2: Vergleich der maßgebenden mechanischen Entitäten der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern unter Kurz- und Langzeitbeanspruchung im Kontext literarischer und normativer Vergleichsbetrachtungen | Versuchsreihen KuPu-Ke und LaPu-Ke bzw. KuPu-Bl-Ke und LaPu-Bl-Ke | mittlerer Verschiebungsmodul $K_{ser,mean}$ (oben links), charakteristische Schubtragfähigkeit $F_{vR,k}$ (oben rechts), Mittelwert des Duktilitätsmaßes $D_{s,mean}$ (unten)

Als sich die gegebene Kerventiefe h_n des untersuchten Verbunddeckensystems in einem grundsätzlich hohen Bereich ($h_n = 40 \text{ mm}$) wiederfindet, umfasst die vorliegende Auswahl an Vergleichstypologien dementsprechend auch nur Strukturkonzepte mit demgemäß ebenfalls erhöhter Kerventiefe h_n . Die abschließend weiters gegebene normative Vergleichsgrundlage innerhalb der Betrachtungen stellt sich darüber hinaus als das in dem eingangs erwähnten Normungsdokument vorhandene Berechnungskonzept für die in den Untersuchungen gemäß *Kapitel 5* und *Kapitel 6* verwendeten punktuellen ausgerundeten Kerven ohne zusätzliche mechanische Verbindungsmittel zur Abhebesicherung dar⁶.

Wie weiterführend aus der gegebenen Abb. 7.2 entnommen werden kann, wird eine entsprechende Vergleichsbetrachtung der Versuchsreihen KuPu-Ke und LaPu-Ke bzw. KuPu-BI-Ke und LaPu-BI-Ke mit den vorhandenen literarischen und normativen Bezugsentitäten demgemäß folglich wiederum möglich. Betrachtet man in diesem Zusammenhang die Untersuchungsergebnisse der rein kervenbasierten Versuchsreihen KuPu-Ke und LaPu-Ke vergleichend mit den vorliegenden normativen Bezugsgrößen, wird deutlich, dass das vorhandene Schubverbindersystem in Form der punktuellen ausgerundeten Kerven ohne zusätzliche mechanische Verbindungsmittel zur Abhebesicherung im Generellen moderate bis teilweise wesentliche Sicherheitsreserven aufweist und die gängige normative Berechnungsgrundlage die mechanischen Eigenschaften der Versuchstypologie somit grundsätzlich folgerichtig einordnet, diese darüber hinaus aber auch teilweise entsprechend unterschätzt. Mit vorliegendem kontextuellen Bezug auf den mittleren Verschiebungsmodul $K_{ser,mean}$ weisen die Untersuchungsergebnisse der Versuchsreihen KuPu-Ke und LaPu-Ke demnach schlussfolgernd grundsätzlich komparativen Vergleichscharakter auf. In diesem Sinne sei dabei erwähnt, dass sich der maßgebende normative Vergleichswert hierbei weiterführend nicht wie üblich auf Basis einer entsprechend festgelegten Einzahlgröße, sondern vielmehr als variable Entität in Abhängigkeit der jeweils vorhandenen Kerventiefe h_n (definierte Grenzwerte von $K_{ser,mean}$ für $h_n = 20 \text{ mm}$ bzw. für $h_n \geq 30 \text{ mm}$ und demgemäß interpolierte Darstellung der Größe für vorhandene interstitielle Kerventiefen h_n) charakterisiert. Betrachtet man die gegebenen Ergebnisgrößen der Versuchsreihen KuPu-Ke und LaPu-Ke demnach in diesem Kontext, wird deutlich, dass diese hierbei grundsätzlich in einem Bereich zwischen den genannten Grenzwerten von $K_{ser,mean}$ für $h_n = 20 \text{ mm}$ und $h_n \geq 30 \text{ mm}$ angesiedelt sind, und sich quantitativ darüber hinaus in einem angenäherten Bereich des höheren Werts von $K_{ser,mean}$ für $h_n \geq 30 \text{ mm}$ bewegen. Dieser Umstand zeugt aus mechanischer Sicht schlussfolgernd von demgemäß komparativen Eigenschaften des untersuchten Schubverbindersystems, als eine entsprechende Einordnung der in diesem Kontext neuartig vorhandenen Kervengeometrie (zweiflächig ausgerundeter Einschnitt mit schrägem Kervengrund) demnach folglich auch möglich wird. Trotz der genannten nicht konventionellen Kervengeometrie mit schrägem Kervengrund, und somit nicht konstant verlaufender Kerventiefe h_n (gegebene Kerventiefe zwischen $h_n = 0 \text{ mm}$ und $h_n = 40 \text{ mm}$) kann dieses neuartige Schubverbindersystem normativ demnach nach konventionellen Kriterien abgesichert und bewertet werden, eine entsprechende Verwendung der tatsächlich experimentell generierten mechanischen Größen anstelle des normativen Berechnungszeders wird mit Hinblick auf den gegebenen mittleren Verschiebungsmodul $K_{ser,mean}$ der punktuellen ausgerundeten Kerven ohne zusätzliche mechanische Verbindungsmittel zur

⁶Alle dargestellten Versuchsreihen, sowie auch die normative Vergleichsgrundlage werden hierbei entsprechend den mechanischen Entitäten einer Breitenausdehnung von 1 mm dargebracht.

Abhebesicherung aus Sicht des Autoren allerdings wiederum empfohlen.

Bei einer darüber hinaus vorliegenden normativen Vergleichsbetrachtung der maßgeblichen Versuchsreihen KuPu-Ke und LaPu-Ke mit Bezug auf die charakteristische Schubtragfähigkeit $F_{vR,k}$ können ebendiese auch im Kontext dieser genannten mechanischen Entität als normativ grundsätzlich entsprechend abgesichert bezeichnet werden, als das gegebene Berechnungsprozedere die vorhandene mechanische Entität abermalig moderat bis maßgebend unterschätzt. In diesem Sinne weisen die vorliegenden Versuchsreihen Sicherheitsreserven von 16% (KuPu-Ke) bzw. 23% (LaPu-Ke) auf, eine demgemäße Verwendung der tatsächlich experimentell generierten mechanischen Größen anstelle des normativen Berechnungsprozederes wird aus Sicht des Autoren demnach auch mit Hinblick auf die gegebene charakteristische Schubtragfähigkeit $F_{vR,k}$ der punktuellen ausgerundeten Ker-ven ohne zusätzliche mechanische Verbindungsmittel zur Abhebesicherung entsprechend empfohlen.

Betrachtet man darüber hinaus die Untersuchungsergebnisse der blech- und kervenbasierten Versuchsreihen KuPu-BI-Ke und LaPu-BI-Ke vergleichend mit den vorliegenden normativen Bezugsgrößen, wird deutlich, dass auch die vorhandenen, kombiniert ausgeführten Schubverbindersysteme in Form der ballistisch vernagelten Puzzle Strip Schubleche in Kombination mit den punktuellen ausgerundeten Kerven ohne zusätzliche mechanische Verbindungsmittel zur Abhebesicherung grundsätzlich wiederum entsprechende Sicherheitsreserven aufweisen. Wie demnach bereits aus den Inhalten gemäß *Kapitel 5* und *Kapitel 6* ersichtlich wird, zeigen sich die Versuchsreihen KuPu-BI-Ke und LaPu-BI-Ke durch entsprechende Interaktionsmechanismen der applizierten Schubverbindersysteme bestimmt, und weisen somit folglich auch demgemäß gesteigerte mechanische Entitäten auf. Das Einbringen einer zusätzlichen blechernen Komponente führt im Vergleich zu einer rein kervenbasierten Applikation somit schlussfolgernd zu verhältnismäßig gesteigerten Sicherheitsreserven und somit zu einer erhöhten normativen Absicherung des eigentlich rein kervenbasierten Schubverbindersystems. In diesem Sinne liegt der mittlere Verschiebungsmodul $K_{ser,mean}$ der genannten Versuchsreihen einerseits wiederum in einem angenäherten Bereich von $K_{ser,mean}$ für $h_n \geq 30 \text{ mm}$ (KuPu-BI-Ke), sowie andererseits auch noch in einer Größenordnung deutlich über diesem Wert (LaPu-BI-Ke). Qualitativ äquivalent verhält es sich in diesem Zusammenhang des Weiteren auch im Kontext einer Vergleichsbetrachtung mit Bezug auf die charakteristische Schubtragfähigkeit $F_{vR,k}$. Die genannte mechanische Entität der vorliegenden Versuchsreihen KuPu-BI-Ke und LaPu-BI-Ke liegt demnach in einem normativ wiederum deutlich abgesicherten Bereich, als diese dementsprechende Sicherheitsreserven von 53% (KuPu-BI-Ke) bzw. 65% (LaPu-BI-Ke) aufweisen.

Betrachtet man die Untersuchungsergebnisse der Versuchsreihen KuPu-Ke und LaPu-Ke bzw. KuPu-BI-Ke und LaPu-BI-Ke des Weiteren vergleichend mit den ausgewählten literarischen Bezugsgrößen, werden konkludierend demgemäße komparative Eigenschaften deutlich. Stellt man in diesem Sinne die mechanischen Entitäten der rein kervenbasierten Versuchsreihen KuPu-Ke und LaPu-Ke jenen der für diese Strukturart ähnlichen Konzepttypologie in Form der *Kerven ohne VM spröde* (Ke-oVMs-1, 2 und 5) gegenüber, lassen sich in diesem Kontext hierbei vorwiegend grundsätzlich ähnliche, teilweise aber auch variierende, Größenordnungen der jeweiligen Entitäten erkennen. Mit Bezug auf den mittleren Verschiebungsmodul $K_{ser,mean}$ stellen sich die genannten vergleichenden Versuchsreihen demnach als äußerst diametral dar (sehr hoher mittlerer Verschiebungsmodul $K_{ser,mean}$

der Versuchsreihe Ke-oVMs-1 im Vergleich zu den Versuchsreihen Ke-oVMs-2 und 5), die mittleren Verschiebungsmoduln $K_{ser,mean}$ der Versuchsreihen KuPu-Ke und LaPu-Ke liegen schlussfolgernd vergleichsweise im Mittelfeld der betrachteten Werte, ähneln in diesem Kontext aber vielmehr den Ergebniswerten der Versuchsreihen mit geringerem mittleren Verschiebungsmodul $K_{ser,mean}$ (Ke-oVMs-2 und 5), als die verbleibende Versuchsreihe mit sehr hohem mittleren Verschiebungsmodul $K_{ser,mean}$ (Ke-oVMs-1) generell eher als Ausreißer innerhalb der Betrachtungen zu bewerten ist. Mit weiterem Bezug auf die charakteristische Schubtragfähigkeit $F_{vR,k}$ stellen sich die vergleichenden Versuchsreihen als grundsätzlich konsistenter, allerdings abermalig variierend, dar. In diesem Sinne liegen die charakteristischen Schubtragfähigkeiten $F_{vR,k}$ der Versuchsreihen KuPu-Ke und LaPu-Ke vergleichsweise wiederum im Mittelfeld der betrachteten Werte, sind in diesem Kontext aber deutlicher der Versuchsreihe mit höchster charakteristischer Schubtragfähigkeit $F_{vR,k}$ (Ke-oVMs-5) angenähert. Mit des Weiteren folgendem Hinblick auf den Mittelwert des Duktilitätsmaßes $D_{s,mean}$ liegen die Ergebniswerte der Versuchsreihen KuPu-Ke und LaPu-Ke darüber hinaus abschließend in einem vergleichsweise quantitativen höchsten Bereich, sie weisen demgemäß ein verhältnismäßig maßgeblich gesteigertes Plastifizierungspotential im Vergleich zu den dargebrachten literarischen Versuchsreihen auf.

Stellt man im weiteren Sinne die mechanischen Entitäten der kombiniert ausgeführten, blech- und kervenbasierten Versuchsreihen KuPu-BI-Ke und LaPu-BI-Ke jenen der für diese Strukturart ähnlichen Konzepttypologie in Form der *Kerven mit stiftförmigen geschraubten VM - 90°* (Ke-mVM-2, 3 und 5) gegenüber, lassen sich in diesem Kontext wiederum grundsätzlich ähnliche, für die Versuchsreihen KuPu-BI-Ke und LaPu-BI-Ke allerdings jeweils in quantitativen höchsten Form vorliegende, Größenordnungen der gegenständlichen Entitäten erkennen. Somit zeigen sich im Vergleich zu den literarischen Versuchsreihen Ke-mVM-2, 3 und 5 sowohl mit Bezug auf den mittleren Verschiebungsmodul $K_{ser,mean}$, als auch mit Hinblick auf die charakteristische Schubtragfähigkeit $F_{vR,k}$ und den Mittelwert des Duktilitätsmaßes $D_{s,mean}$ schlussfolgernd jeweils höchste Ergebniswerte, die genannten Versuchsreihen zeichnen sich folglich durch ein vergleichsweise maßgeblich gesteigertes Trag- und Verformungsverhalten aus. Begründet werden kann dieser Umstand schlussfolgernd anhand der in *Kapitel 3*, *Kapitel 5* und *Kapitel 6* gewonnenen Erkenntnisse, als durch die Applikation eines additiven stiftförmigen Verbindungsmittels innerhalb der Kerve keine explizite Erhöhung der Tragfähigkeit bzw. Steifigkeit der jeweiligen Verbindung zu erwarten ist, die kombiniert ausgeführte Konzeption der untersuchten Schubverbindersysteme jedoch zu erkennbaren Änderungen im vorhandenen Trag- und Verformungsverhalten führt.

7.1.2 Dauerlastversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern

Der kontextuelle Umfang der Dauerlastversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern kann gemäß den Inhalten aus *Kapitel 6* anhand der drei maßgebenden Versuchsreihen LaPu-BI, LaPu-Ke und LaPu-BI-Ke der drei Versuchstypologien Blech, Kerve und Blech-Kerve festgehalten werden. Wesentlichste, aus diesen Kapiteln weiterführend ableitbare und im nachfolgenden behandelte, Untersuchungsgrößen stellen in diesem Sinne hierbei die Kriechzahl φ für den Lebenszyklus (Dauer 50 Jahre), als auch deren Anteilsmäßigkeiten in Form der Grundkriechzahl φ_{gr} sowie der mechanosorptiven Kriechzahl φ_{ms} dar.

Mit Bezug auf diese genannten mechanischen Entitäten können demgemäß die maßgebenden Vergleichsbetrachtungen der beschriebenen Versuchstypologien stattfinden, wobei

die weiterführende Gliederung der Untersuchungsergebnisse in diesem Kontext grundsätzlich auf Basis aller gegebenen Versuchsreihen (LaPu-BI, LaPu-Ke und LaPu-BI-Ke) erfolgen soll. Basierend auf dieser genannten Strukturierung wird es schlussfolgernd demnach wiederum möglich, einerseits eine entsprechende kontextuelle Gegenüberstellung der vorliegenden Untersuchungsergebnisse mit ausgewählten literarischen und normativen Vergleichswerten für die jeweils vorhandenen individuellen Systemcharakteristiken zu erreichen, sowie diese andererseits auch auf Basis der vorliegenden literarischen und normativen Vergleichsparameter folglich zu bewerten und zu verifizieren.

Gemäß dieser beschriebenen Strukturierung und mit entsprechend weiterführendem Bezug auf die rein blechbasierten, als auch auf die rein kervenbasierten bzw. auf die kombiniert ausgeführten, blech- und kervenbasierten Versuchsreihen LaPu-BI, LaPu-Ke und LaPu-BI-Ke beziehen sich die kontextuellen nachfolgenden Vergleichsbetrachtungen gemäß Abb. 7.3, neben den Versuchsergebnissen aus *Kapitel 6*, hierbei in literarischer Hinsicht auf eine ausgewählte Versuchsreihe gemäß *Shi* [64], sowie des Weiteren darüber hinaus auf normative Bezugsentitäten gemäß *ONR CEN/TS 19103* [3] (unter ebenso gegebener Berücksichtigung des zugehörigen nationalen Anhangs *ONR CEN/TS 19103/NA* [63]). Mit speziellem Hinblick auf die vergleichend dargestellte literarische Versuchsreihe gemäß *Shi* [64], lässt sich diese, als nicht bereits in *Kapitel 3* beinhaltete Literatur, mit Hinblick auf eine grundsätzliche strukturelle Kategorisierung in die Konzepttypologie der *Kerven mit stiftförmigen geschraubten VM - 90°* einordnen (Versuchsreihenbezeichnung dementsprechend Ke-mVM-6, für explizite Details zu dieser literarischen Versuchsreihe siehe weiterführend darüber hinaus auch *Anhang E*), eine vergleichende Betrachtung dieser Versuchsreihe mit den vorhandenen maßgebenden Versuchsreihen wird demnach möglich.

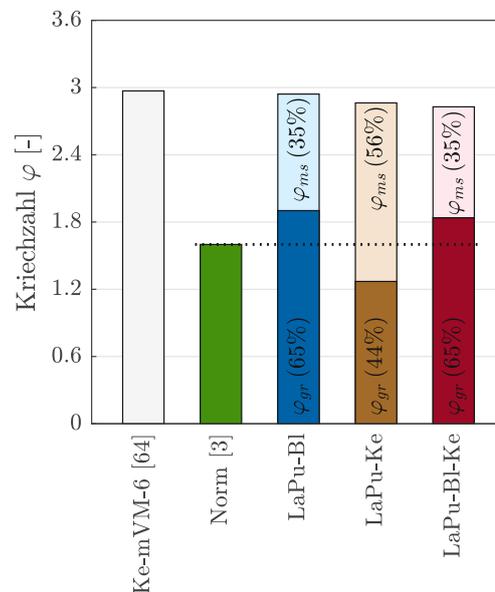


Abb. 7.3: Vergleich der maßgebenden mechanischen Entitäten der experimentellen Dauerlastversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern unter Langzeitbeanspruchung im Kontext literarischer und normativer Vergleichsbetrachtungen | Versuchsreihen LaPu-BI, LaPu-Ke und LaPu-BI-Ke | Kriechzahl φ

Die abschließend weiters gegebene normative Vergleichsgrundlage innerhalb der Betrachtungen stellt sich darüber hinaus als das in dem eingangs erwähnten Normungsdokument vorhandene Berechnungskonzept für die in den Untersuchungen gemäß *Kapitel 6* verwendeten ballistisch vernagelten Glattschaftnägel der applizierten Puzzle Strip Schubleche, sowie für die punktuellen ausgerundeten Kerven ohne zusätzliche mechanische Verbindungsmittel zur Abhebesicherung dar. Das in diesem Sinne genannte Berechnungskonzept bezieht sich hierbei im Detail weiterführend grundsätzlich auf Berechnungsgrößen der Nutzungsklasse 2, als sich einerseits die klimatischen Randbedingungen innerhalb der Untersuchungen gemäß *Kapitel 6* durch eine relative Luftfeuchtigkeit RH von maximal 80% definieren (relative Luftfeuchtigkeit RH gemäß Nutzungsklasse 2 $\leq 85\%$) und andererseits die in den Proben daraus resultierende Holzfeuchte u 14% nicht überschreitet (Holzfeuchte u gemäß Nutzungsklasse 2 $\leq 20\%$).

Betrachtet man gemäß Abb. 7.3 folglich die Untersuchungsergebnisse der Versuchsreihen LaPu-Bl, LaPu-Ke und LaPu-Bl-Ke vergleichend mit jenen der literarischen und normativen Bezugsentitäten, können auf Basis der vorliegenden Größen hierbei demnach zwei maßgebliche Erkenntnisse gewonnen werden. Auf der einen Seite zeigt sich demgemäß eine quantitativ deutliche Übereinstimmung der vorhandenen Untersuchungsergebnisse mit denen der literarischen Versuchsreihe Ke-mVM-6 gemäß *Shi* [64], sowie bildet das normative Berechnungskonzept auf der anderen Seite die vorhandenen Kriechzahlen φ demgegenüber nur auf einer wesentlich unsicheren Seite liegend ab. In diesem Sinne liegt bei den blechbasierten Versuchsreihen LaPu-Bl und LaPu-Bl-Ke bereits der jeweilige Kriechanteil in Form der Grundkriechzahl φ_{gr} , ausschließlich basierend auf der beginnenden Trockenphase der Untersuchungen gemäß *Kapitel 6*, leicht über der normativen Definition der Kriechzahl φ , und führt der darüber hinaus vorhandene Kriechanteil in Form der mechanosorptiven Kriechzahl φ_{ms} , resultierend aus den an die beginnende Trockenphase anschließenden alternierenden Feucht- und Trockenphasen der Untersuchungen gemäß *Kapitel 6*, schlussfolgernd zu einer noch deutlicheren Überschreitung des normativen Ansatzes. Kumulativ betrachtet ähnlich verhält es sich in diesem Zusammenhang ebenfalls mit Bezug auf die rein kervenbasierte Versuchsreihe LaPu-Ke, als hierbei der gegebene Kriechanteil in Form der Grundkriechzahl φ_{gr} zwar unterhalb der normativen Kriechzahl φ liegt, der vorhandene Kriechanteil in Form der mechanosorptiven Kriechzahl φ_{ms} bei dieser Versuchsreihe aber wesentlich höher ausfällt, und die kumulativ generierte Kriechzahl φ schlussfolgernd in einem, vergleichend zu den blechbasierten Versuchsreihen, ähnlichen Bereich liegt.

Das gegebene normative Berechnungskonzept unterschätzt die für den Lebenszyklus (Dauer 50 Jahre) auftretenden Kriechzahlen φ demnach schlussfolgernd deutlich, eine Adaptation der gegebenen normativen Grundlage wird aus Sicht des Autoren folglich empfohlen. Betrachtet man dabei das hierfür gemäß *ONR CEN/TS 19103* [3] vorliegende Berechnungskonzept, lassen sich der Verschiebungsmodul $K_{ser}(t = 50 \text{ a})$ zum Ende des Lebenszyklus und die damit in Verbindung stehende Kriechzahl φ für den Lebenszyklus auf Basis der Zusammenhänge gemäß Glg. 7.1 bis Glg. 7.3 definieren.

$$K_{ser}(t = 50 \text{ a}) = \frac{K_{ser}}{1 + \varphi} \quad (7.1)$$

$$\varphi = \Psi_{VM}(t = 50 \text{ a}) \cdot k_{def}' \quad (7.2)$$

$$\text{mit: } k_{def}' = 2 \cdot k_{def} \quad (7.3)$$

Dabei bezeichnen k_{def} bzw. k_{def}' den Verformungsbeiwert für den Werkstoff Holz an sich bzw. den Verformungsbeiwert der eigentlichen Schubverbindung, sowie stellt sich $\Psi_{VM}(t=50\text{ a})$ als der zugehörige Koeffizient des Verformungsbeiwerts der Schubverbindung zum Zeitpunkt t dar. Während sich in diesem Sinne der Verformungsbeiwert für den Werkstoff Holz k_{def} und der Verformungsbeiwert für die Schubverbindung k_{def}' normativ wertbehaftet entsprechend der gegebenen Nutzungsklasse definieren ($k_{def} = 0.8$ bzw. $k_{def}' = 1.6$ für Nutzungsklasse 2), kann der Koeffizient des Verformungsbeiwerts der Schubverbindung zum Zeitpunkt t $\Psi_{VM}(t=50\text{ a})$ im normativen Kontext als eigentlich wertunbehaftet ($\Psi_{VM}(t=50\text{ a}) = 1.0$) bezeichnet werden. Entsprechend dieser Definitionen kann für den genannten Koeffizienten des Verformungsbeiwerts der Schubverbindung zum Zeitpunkt t $\Psi_{VM}(t=50\text{ a})$ aufgrund der vorliegenden Untersuchungsergebnisse ein von diesem aktuellen Zahlenwert abweichender, alternativer Wert von $\Psi_{VM}(t=50\text{ a}) = 1.9$ vorgeschlagen werden, eine entsprechende normative Absicherung der gegebenen Versuchsergebnisse (und auch der literarischen Vergleichsbetrachtung) wäre auf Basis dieser Änderung demnach folglich möglich.

7.2 Untersuchungen an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern

7.2.1 Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern

Der kontextuelle Umfang der Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern kann gemäß den Inhalten aus *Kapitel 5* und *Kapitel 6* anhand der sechs maßgebenden Versuchsreihen KuTr-Bl, KuTr-Ke und KuTr-Bl-Ke bzw. LaTr-Bl, LaTr-Ke und LaTr-Bl-Ke der drei Versuchstypologien Blech, Kerne und Blech-Kerne festgehalten werden. Als es sich bei den genannten Versuchsreihen im weiteren Sinne um symmetrische Biegeträger, und somit vollständig ausgebildete Tragstrukturen mit projektspezifisch definierten Systemabmessungen, handelt, liegen für diese Konzepttypologien im allgemeinen Sinne folglich keine expliziten vergleichenden literarischen Versuchsreihen vor, eine komparative normative Vergleichsbetrachtung kann auf Basis der entsprechend vorhandenen Möglichkeiten zur Strukturbewertung großmaßstäblicher Trägersysteme aber erfolgen. In diesem Kontext soll demgemäß das in *ONR CEN/TS 19103* [3] bzw. *ONR CEN/TS 19103/NA* [63] und *ÖNORM B 1995-1-1* [12] verankerte und zur allgemeinen Bemessung von HBV-Konstruktionen empfohlene normative Berechnungsverfahren (γ -Verfahren) hinsichtlich seiner grundsätzlichen Tauglichkeit für die Bemessung des vorliegenden Vollholz-Beton-Verbunddeckensystem bewertet werden, sowie soll darüber hinaus ebenso das für die Bemessung von HBV-Konstruktionen gängig angewendete Prozedere in Form einer baustatischen Modellbildung nach *Rautenstrauch* [65] im gleichen Kontext komparativ betrachtet werden.

Mit Bezug auf das gegenständliche, normativ verankerte γ -Verfahren lässt sich dieses im Allgemeinen als vereinfachte Näherungslösung für die lineare Berechnung von kontinuierlich verbundenen Biegestäben bzw. Querschnitten beschreiben. In diesem Sinne werden den gegebenen Stäben bzw. Querschnitten (im vorliegenden Fall die beiden Stäbe bzw. Querschnitte Holz und Beton) dabei einerseits die von einander unabhängigen jeweiligen Eigen-

anteile der Biege- und Dehnsteifigkeiten (EI_{Holz} und EA_{Holz} bzw. EI_{Beton} und EA_{Beton}) zugeordnet, sowie werden diese darüber hinaus auf Basis der vorliegenden Steineranteile in Zusammenhang mit einem Abminderungsfaktor γ andererseits gekoppelt, woraus sich resultierend eine effektive Biegesteifigkeit EI_{eff} des Gesamtsystems zur weiterführenden Berechnung gemäß Stabtheorie ergibt. Die im genaueren Detail hierbei geltenden maßgebenden mathematischen Zusammenhänge für ein gegebenes zweiteiliges Stab- bzw. Querschnittssystem können weiterführend anhand der nachfolgenden Gleichungen Glg. 7.4 bis Glg. 7.7 dargestellt werden.

$$EI_{eff} = EI_{Beton} + EI_{Holz} + a^2 \cdot \frac{EA_{Beton} \cdot \gamma \cdot EA_{Holz}}{EA_{Beton} \cdot \gamma + EA_{Holz}} \quad (7.4)$$

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{EA_{Beton} \cdot \delta \cdot \pi^2}{c \cdot l^2}} \quad (7.5)$$

$$c = \frac{K_{ser}}{s_{eff}} \quad (7.6)$$

$$\text{mit: } s_{eff} = 0.75 \cdot s_{min} + 0.25 \cdot s_{max} \quad (7.7)$$

Wie aus den gegebenen Gleichungen Glg. 7.5 bis Glg. 7.7 ersichtlich wird, definiert sich der für das γ -Verfahren repräsentative Abminderungsfaktor γ weiterführend einerseits auf Basis allgemeiner material- und geometrieabhängiger Eigenschaften in Form des Produkts der Dehnsteifigkeit des Betons EA_{Beton} mit einem zugehörigen Abminderungsfaktor δ ($s_{eff} \leq 0.05 \cdot l \rightarrow \delta = 1$, $s_{eff} > 0.05 \cdot l \rightarrow \delta = 0.7$), sowie auch in Form der Spannweite l des Systems, als andererseits ebenso in Abhängigkeit der Eigenschaften der dabei vorhandenen Verbundfuge, indes sich in diesem Sinne demnach die vorliegende Fugensteifigkeit c als hierbei maßgebender Parameter ebendieser darstellt. Diese genannte Fugensteifigkeit c definiert sich dabei grundsätzlich als Quotient aus dem gegebenen Verschiebungsmodul K_{ser} der Verbindung und dem in diesem Kontext vorhandenen effektiven Verbindungsmittelabstand s_{eff} der einzelnen VM, wobei sich der erwähnte effektive Verbindungsmittelabstand s_{eff} hierbei weiterführend auf Basis eines proportionalen Zusammenhangs des jeweils minimal und des maximal vorhandenen Verbindungsmittelabstands innerhalb des Verbundsystems (s_{min} und s_{max}) ergibt. Das Berechnungsverfahren baut demnach folglich auf einem gewichtet gemittelten Verbindungsmittelabstand s auf, eine dementsprechende Berücksichtigung darüber hinaus vorliegender variierender, und im weiteren Sinne diskontinuierlicher, Verbindungsmittelabstände kann innerhalb des vorliegenden Berechnungsprozederes schlussfolgernd nicht explizit erfolgen.

Mit weiterführendem Bezug auf die in den Vergleichsbetrachtungen ebenfalls berücksichtigte Modellbildung nach *Rautenstrauch* [65] lässt sich diese im Allgemeinen als ein für ein zweiteiliges Stab- bzw. Querschnittssystem optimiertes lineares Berechnungsverfahren auf Basis eines repräsentativen Stabwerkmodells beschreiben, wobei auf diesen Eigenschaften aufbauend hierbei demnach sowohl kontinuierlich, als auch diskontinuierlich verbundene Struktursysteme abgebildet werden können. Im weiteren Sinne werden dabei zwei Stabebenen für die Einzelquerschnitte Holz und Beton definiert und diese anhand von systemcharakteristischen Verbindungsstäben (dehn- und schubstarre Biegestäbe mit Verbindungsgelenk in der Verbundfuge) in den geometrisch korrekten Lagepositionen der

einzelnen VM demgemäß gekoppelt (in Lagepositionen ohne einzelne VM kommen für eine Verformungsäquivalenz der einzelnen Stab- bzw. Querschnittssysteme Holz und Beton darüber hinaus zusätzliche dehnstarre Pendelstäbe als Koppellelemente zur Anwendung), worauf aufbauend schlussfolgernd eine entsprechende Systemberechnung stattfinden kann. Im weiteren Detail werden den gegebenen Stäben der Einzelquerschnitte Holz und Beton hierbei die von einander unabhängigen jeweiligen Eigenanteile der Biege-, Dehn- und Schubsteifigkeiten (EI_{Holz} , EA_{Holz} und $G\tilde{A}_{Holz}$ bzw. EI_{Beton} , EA_{Beton} und $G\tilde{A}_{Beton}$) zugeordnet, sowie wird für die systemcharakteristischen Verbindungsstäbe weiterführend eine entsprechende Ersatzbiegesteifigkeit EI_{VM}^* in Abhängigkeit der Verbindungseigenschaften der einzelnen VM definiert. Die in diesem Kontext vorhandene Ersatzbiegesteifigkeit EI_{VM}^* der jeweiligen Verbindungsstäbe definiert sich dabei grundsätzlich in Abhängigkeit des vorhandenen Verschiebungsmoduls K_{ser} des an der jeweiligen Stelle vorhandenen VM, sowie darüber hinaus auf Basis systemischer geometrischer Randbedingungen des Gesamtsystems, wie weiterführend auch aus den Zusammenhängen gemäß nachfolgender Abb. 7.4 ersichtlich wird.

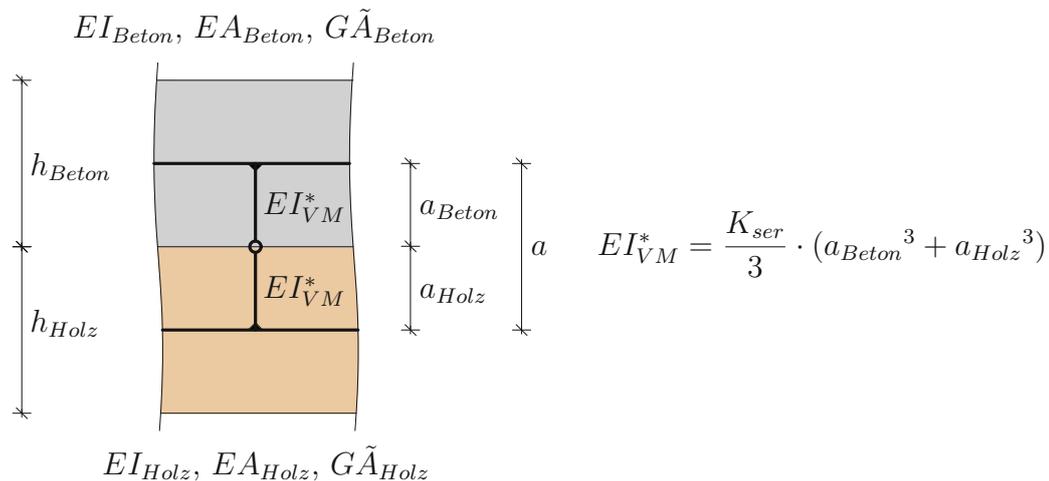


Abb. 7.4: Prinzip der baustatischen Modellbildung nach *Rautenstrauch* [65]

Auf diesen beiden beschriebenen Verfahren aufbauend, kann demnach, wie auch bereits einleitend beschrieben, folglich eine entsprechende komparative Betrachtung der durchgeführten experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern mit den genannten theoretischen Berechnungsprozedere stattfinden. Im näheren Detail soll hierbei grundsätzlich ein demgemäßer Vergleich der resultierenden Last-Verschiebungs-Zusammenhänge aus den jeweiligen experimentellen bzw. theoretischen Zusammenhängen durchgeführt werden, und soll auf Basis dessen weiterführend die jeweils resultierende Eignung der gegenständlichen theoretischen Berechnungsprozedere für die einzelnen Versuchstypologien bewertet werden. Bei kontextuell expliziter Betrachtung sollen in diesem Sinne demnach die gegebenen experimentell und theoretisch ermittelten resultierenden vertikalen Verschiebungen u_v der einzelnen Versuchstypologien unter definierten Lastniveaus gegenübergestellt und hinsichtlich ihrer dabei vorhandenen Kompatibilität überprüft werden. Darüber hinaus sollen bei eventuell vorhandener Inkompatibilität der jeweiligen

Untersuchungsergebnisse entsprechende notwendige Adaptionsmaßnahmen zur abgesicherten Anwendung der untersuchten Berechnungsprozedere vorgeschlagen und vorgestellt werden.

Mit weiterem konkreten Bezug auf die kontextuell vorliegenden definierten Lastniveaus innerhalb der Vergleichsbetrachtungen lassen sich diese grundsätzlich als innerhalb eines konventionellen Bemessungskonzepts vorliegende Größen im Sinne von Lastniveaus für einerseits den Grenzzustand der Tragfähigkeit, als andererseits auch für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit beschreiben. Für den Grenzzustand der Tragfähigkeit definiert sich die genannte Entität dabei weiterführend auf Basis einer ständigen und veränderlichen Einwirkungskombination ($E_d = \sum_{i \geq 1} \gamma_{g,i} \cdot g_{k,i} + \gamma_{q,1} \cdot q_{k,1} + \sum_{j > 1} \gamma_{q,j} \cdot \Psi_{0,j} \cdot q_{k,j}$), indes sich ebendiese für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit basierend auf einer quasi-ständigen Einwirkungskombination ($E_{d,qs} = \sum_{i \geq 1} g_{k,i} + \sum_{j \geq 1} \Psi_{2,j} \cdot q_{k,j}$) beschreiben lässt. Wie demgemäß auch bereits in *Kapitel 6.4.1* erwähnt, charakterisieren sich die hierbei einerseits vorhandenen ständigen Lasten durch das Eigengewicht $g_{k,1}$ der eigentlichen Tragstruktur von $g_{k,1} = 2.96 \text{ kN/m}^2$ und durch eine vorhandene Ausbaulast $g_{k,2}$ von $g_{k,2} = 2.5 \text{ kN/m}^2$, sowie zeichnen sich die dabei gegebenen veränderlichen Lasten andererseits durch eine vorhandene Nutzlast $q_{k,1}$ (Nutzlast der Kategorie B2 gemäß *ÖNORMEN 1991-1-1* [62]) von $q_{k,1} = 3.0 \text{ kN/m}^2$, als auch durch einen zusätzlichen Trennwandzuschlag $q_{k,2}$ von $q_{k,2} = 1.2 \text{ kN/m}^2$, unter der jeweiligen Verwendung von Kombinationsbeiwerten Ψ_0 und Ψ_2 (Kombinationsbeiwerte für die Kategorien A und B gemäß *ÖNORMEN 1990* [18]) von $\Psi_0 = 0.7$ und $\Psi_2 = 0.3$, aus. Auf Basis dieser Zusammenhänge ergeben sich daraus schlussfolgernd demnach resultierende Flächenlasten p von $p = 13.13 \text{ kN/m}^2$ für den Grenzzustand der Tragfähigkeit, sowie von $p = 6.72 \text{ kN/m}^2$ für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit. Als es sich bei den für die Vergleichsbetrachtungen repräsentativen Bruchversuchen an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern im Detail weiterführend darüber hinaus allerdings um entsprechende Vierpunkt-Biegeprüfungen, und somit um konzeptionell nicht flächig sondern punktförmig belastete Versuchstypologien handelt, können die genannten komparativen Betrachtungen demgemäß auch nur unter der Berücksichtigung von entsprechend punktförmigen Lasten F durchgeführt werden, weshalb für die angestrebten Vergleichsbetrachtungen ein hierfür demgemäßes Umrechnungsprozedere notwendig wird. Basierend auf den allgemeinen Prinzipien nach Stabtheorie lässt sich dieser notwendige Zusammenhang (unter der Berücksichtigung Einflussbreite b der eigentlichen Tragstruktur) entsprechend der Form $F = \frac{q \cdot l \cdot b}{2.726}$ herstellen, woraus schlussfolgernd äquivalente punktförmige Lasten F von $F = 11.09 \text{ kN}$ für den Grenzzustand der Tragfähigkeit, sowie von $F = 5.67 \text{ kN}$ für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit innerhalb der vorliegenden Vergleichsbetrachtungen resultieren.

Mit weiterführendem Bezug auf den generellen Umfang der durchgeführten komparativen Betrachtungen kann dieser im Allgemeinen als vollumfassend für alle drei vorliegenden Versuchstypologien Blech, Kerbe und Blech-Kerbe auf Basis der sechs maßgebenden Versuchsreihen KuTr-Bl, KuTr-Ke und KuTr-Bl-Ke bzw. LaTr-Bl, LaTr-Ke und LaTr-Bl-Ke beschrieben werden. Wie darüber hinaus ebenfalls aus den einleitenden Zusammenhängen zu entnehmen ist, zielen die gegebenen Vergleichsbetrachtungen im eigentlichen Sinne aber nur auf die Überprüfung der Eignung der beschriebenen Berechnungsprozedere für das tatsächlich vorliegende Vollholz-Beton-Verbunddeckensystem, und somit lediglich für

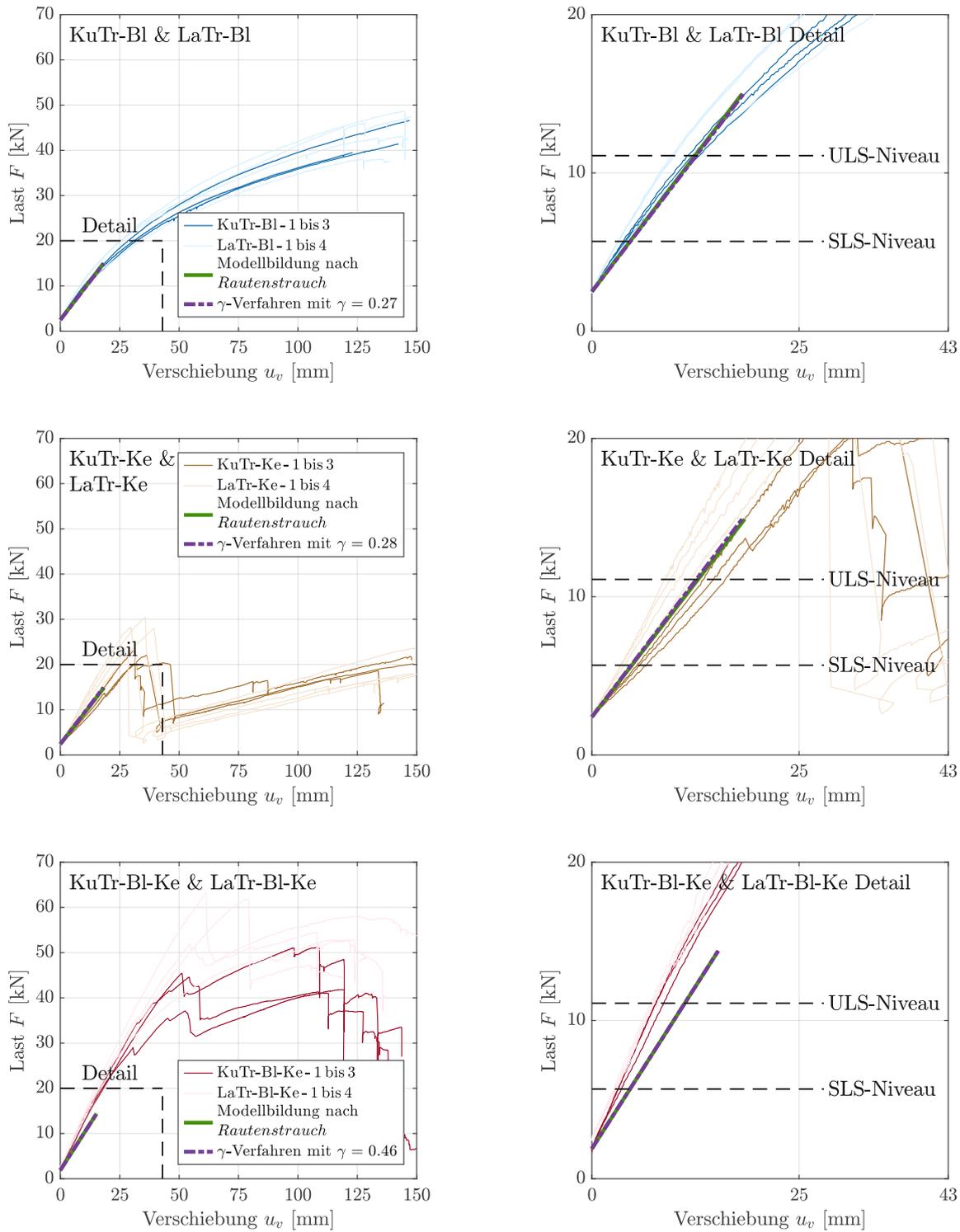


Abb. 7.5: Vergleich der maßgebenden mechanischen Entitäten der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern unter Kurz- und Langzeitbeanspruchung im Kontext normativer Vergleichsbetrachtungen | Experimentell und theoretisch nach γ -Verfahren bzw. nach Modellbildung nach *Rautenstrauch* [65] ermittelte Last-Verschiebungs-Zusammenhänge | Versuchsreihen KuTr-BI und LaTr-BI (oben), KuTr-Ke und LaTr-Ke (mittig), KuTr-BI-Ke und LaTr-BI-Ke (unten)

die kombiniert ausgeführte Versuchstypologie Blech-Kerbe, ab. Aus Gründen der Vollständigkeit, und um weiterführend eine ebenfalls ganzheitliche Überprüfung der vorliegenden Berechnungsprozedere zu ermöglichen, beinhalten die gegebenen komparativen Betrachtungen demnach aber ebenso die Versuchstypologien Blech und Kerbe, wobei der vorliegende Fokus dabei aber wesentlich auf die kombiniert ausgeführte Versuchstypologie Blech-Kerbe gerichtet sein soll. Basierend auf diesen genannten Kriterien können die maßgebenden komparativen Betrachtungen folglich durchgeführt werden, wie weiterführend auch aus den Ergebnisdarstellungen gemäß Abb. 7.5 ersichtlich wird. Bei entsprechend genauere Betrachtung dieser gezeigten Zusammenhänge lassen sich im näheren Detail dabei grundsätzlich kumulativ ähnliche Aussagen zur jeweils vorhandenen Eignung der beiden untersuchten Berechnungsprozedere ableiten, die dabei gegebene Tauglichkeit stellt sich darüber hinaus allerdings maßgeblich auf Basis der jeweilig gegebenen Randbedingungen der variierenden Versuchstypologien dar.

Mit konkretem Bezug auf die Vergleichsbetrachtungen der Versuchstypologie Blech (Versuchsreihen KuTr-BI und LaTr-BI) gemäß Abb. 7.5 (oben) kann eine grundsätzliche Eignung der beiden Berechnungsprozedere zur Abbildung der experimentell generierten Last-Verschiebungs-Zusammenhänge hierbei weiterführend im Allgemeinen bestätigt werden. In diesem Sinne zeichnet sich der mithilfe des γ -Verfahrens ermittelte Last-Verschiebungs-Zusammenhang (repräsentativer γ -Wert der rein blechbasierten Versuchstypologie von $\gamma(K_{ser}) = 0.27$) durch eine realitätsnahe, in gewissem Maße auf der sicheren Seite liegende, Steigung k aus, die tatsächlich vorhandene vertikale Verschiebung u_v wird auf Basis dieses Berechnungsprozederes demnach sowohl für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit, sowie auch für den Grenzzustand der Tragfähigkeit realistisch repräsentiert. Dies gilt, wie erwähnt, weiterführend auch mit Hinblick auf das Lastniveau für den Grenzzustand der Tragfähigkeit, als mit dem für duktile Verbindungen hierbei gängigen Zusammenhang von $K_u = 2/3 \cdot K_{ser}$ adäquate vertikale Verschiebungen u_v erreicht werden, wie weiterführend demgemäß auch aus Abb. 7.6 (links) ersichtlich wird. In diesem Sinne ergibt sich bei einer entsprechenden Anwendung des beschriebenen Zusammenhangs ein repräsentativer γ -Wert von $\gamma(K_u = 2/3 \cdot K_{ser}) = 0.20$ und somit folglich eine quantitativ adäquate Reduktion des vorliegenden γ -Werts, woraus schlussfolgernd ebenso realitätsnahe vertikale Verschiebungen u_v am Lastniveau des Grenzzustands der Tragfähigkeit abgeleitet werden können. Die grundsätzliche Eignung des vorliegenden γ -Verfahrens als Berechnungsprozedere für die (charakteristisch nicht-lineare) rein blechbasierte Versuchstypologie kann daher folglich im Allgemeinen bestätigt werden. Indes äquivalent verhält es sich weiterführend auch mit Hinblick auf die gegebene Modellbildung nach *Rautenstrauch* [65], als der anhand dieses Berechnungsprozederes ermittelte Last-Verschiebungs-Zusammenhang gemäß Abb. 7.5 (oben) die auftretenden vertikalen Verschiebungen u_v des Grenzzustands der Gebrauchstauglichkeit ebenso grundsätzlich realitätsnah, mit überdies wiederum leicht vorhandenen Sicherheitsreserven repräsentieren kann. Ähnlich verhält es sich darüber hinaus auch mit Hinblick auf die gegebenen vertikalen Verschiebungen u_v des Grenzzustands der Tragfähigkeit, wie weiterführend auch aus Abb. 7.6 (rechts) ersichtlich wird. In diesem Sinne kann hierbei bei einer Anwendung des für duktile Verbindungen gängigen Zusammenhangs $K_u = 2/3 \cdot K_{ser}$ ebenfalls ein für das Lastniveau des Grenzzustands der Tragfähigkeit repräsentativer Last-Verschiebungs-Zusammenhang mit wiederum leicht vorhandenen Sicherheitsreserven abgeleitet werden, die grundsätzliche Eignung der vorliegenden Mo-

dellbildung nach *Rautenstrauch* [65] als Berechnungsprozedere für die (charakteristisch nicht-lineare) rein blechbasierte Versuchstypologie kann demnach folglich im allgemeinen Sinne auch bestätigt werden.

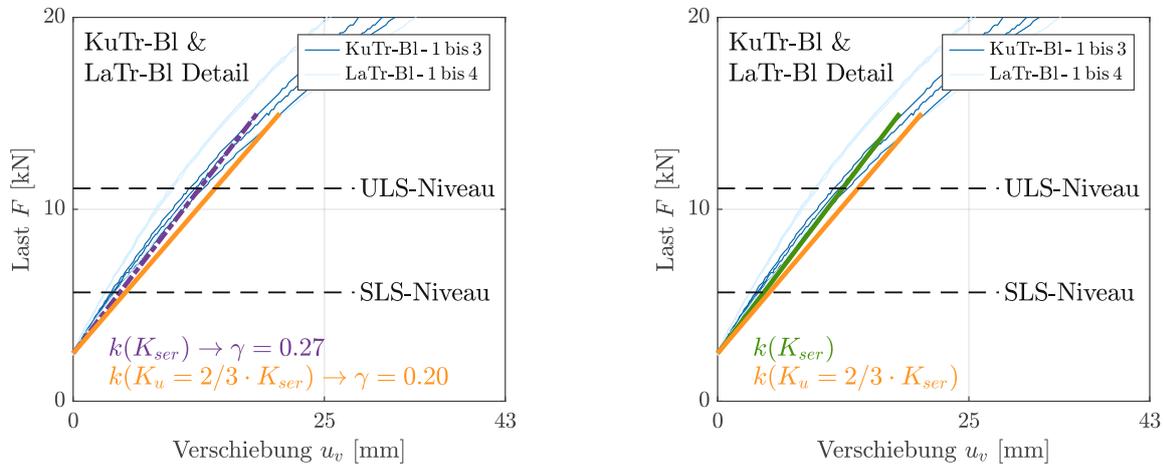


Abb. 7.6: Vergleich der maßgebenden mechanischen Entitäten der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern unter Kurz- und Langzeitbeanspruchung im Kontext normativer Vergleichsbetrachtungen | Variantenstudie der theoretisch ermittelten Last-Verschiebungs-Zusammenhänge an den Versuchsreihen KuTr-BI und LaTr-BI | Zusammenhänge nach γ -Verfahren (links), Zusammenhänge nach Modellbildung nach *Rautenstrauch* [65] (rechts)

Mit darüber hinaus vorliegendem Bezug auf die Vergleichsbetrachtungen der Versuchstypologie Kerne (Versuchsreihen KuTr-Ke und LaTr-Ke) gemäß Abb. 7.5 (mittig) kann, ähnlich zur Versuchstypologie Blech, eine grundsätzliche Eignung der beiden untersuchten Berechnungsprozedere zur Abbildung der experimentell generierten Last-Verschiebungs-Zusammenhänge hierbei weiterführend im Allgemeinen bestätigt werden. Der dabei resultierende Last-Verschiebungs-Zusammenhang des γ -Verfahrens (repräsentativer γ -Wert der rein kernenbasierten Versuchstypologie von $\gamma(K_{ser}) = 0.28$) zeigt in diesem Sinne dabei grundsätzlich sehr ähnliche Charakteristiken wie die Modellbildung nach *Rautenstrauch* [65], unterschätzt die in Realität auftretenden vertikalen Verschiebungen u_v der Versuchsreihe KuTr-Ke aber in geringem Maße, überschreitet jene der Versuchsreihe LaTr-Ke aber deutlich (ein entsprechend gegebener maßgeblicher Einfluss des zeitlichen Verlaufs auf das explizite Trag- und Verformungsverhalten der kernenbasierten Versuchstypologien wie in *Kapitel 6* bereits dargebracht wird wiederum ersichtlich). Ein gleichfalls ähnliches Bild zeichnen in diesem Zusammenhang weiterführend ebenso die Untersuchungsergebnisse der Modellbildung nach *Rautenstrauch* [65], als die auftretenden vertikalen Verschiebungen u_v der realen Versuchsreihen KuTr-Ke bzw. LaTr-Ke auch hierbei in äquivalentem Sinne einerseits in geringem Maße unter- bzw. andererseits deutlich überschritten werden. In diesem Kontext lässt sich eine qualitative Eignung beider Verfahren als Berechnungsprozedere für die (charakteristisch annähernd lineare) rein kernenbasierte Versuchstypologie schlussfolgernd grundsätzlich ableiten, eine gewisse Reduktion des vorhandenen Verschie-

bungsmoduls der Gebrauchstauglichkeit K_{ser} bzw. des gegebenen Verschiebungsmoduls der Tragfähigkeit K_u der rein kervenbasierten Verbindung ($K_{ser} = K_u = 0.9 \cdot K_{ser}$) wird zur tatsächlichen realitätsgetreuen, und überdies mit gewissen Sicherheitsreserven bedachten, Abbildung des vorhandenen Last-Verschiebungs-Zusammenhangs aus Sicht des Autors demnach aber trotzdem empfohlen.

Mit weiters gegebenem Bezug auf die, wie einleitend erwähnt, als wesentlichst zu erachtenden Vergleichsbetrachtungen der kombiniert ausgeführten Versuchstypologie Blech-Kerbe (real tatsächlich ausgeführtes Vollholz-Beton-Verbunddeckensystem, Versuchsreihen KuTr-BI-Ke und LaTr-BI-Ke) gemäß Abb. 7.5 (unten) kann hierbei, ähnlich zu den Versuchstypologien Blech bzw. Kerbe, schlussfolgernd eine demnach grundsätzliche Eignung der beiden Berechnungsprozedere zur Abbildung der experimentell generierten Last-Verschiebungs-Zusammenhänge bestätigt werden. Mit konkretem Hinblick auf eine dabei gegebene kontextuelle Anwendung des normativ verankerten γ -Verfahrens müssen aufgrund der hierbei vorhandenen speziellen strukturellen Systemcharakteristik kombinierter Schubverbinder allerdings bereits a priori zusätzliche maßgebende Randbedingungen definiert werden, da bei entsprechend detaillierterer Betrachtung des Verfahrens keine rechnerische Möglichkeit zur Definition eines kombiniert ausgeführten γ -Werts für beide Schubverbindersysteme vorliegt. In diesem Sinne bedarf es folglich daher einer demgemäß untersuchungsgestützten Festlegung eines repräsentativen γ -Werts für die kombiniert ausgeführte Applikation der beiden divergenten Schubverbindersysteme Blech bzw. Kerbe, wie entsprechend auch aus Abb. 7.5 (unten) bzw. Abb. 7.7 ersichtlich wird.

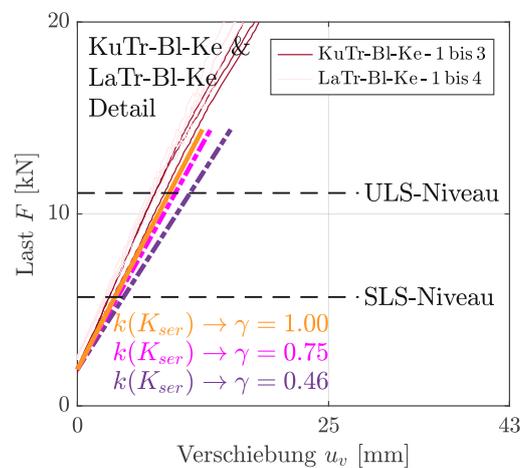


Abb. 7.7: Vergleich der maßgebenden mechanischen Entitäten der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern unter Kurz- und Langzeitbeanspruchung im Kontext normativer Vergleichsbetrachtungen | Variantenstudie der theoretisch ermittelten Last-Verschiebungs-Zusammenhänge an den Versuchsreihen KuTr-BI-Ke und LaTr-BI-Ke | Zusammenhänge nach γ -Verfahren

Wie aus diesen genannten Abbildungen im Allgemeinen zu entnehmen ist, kann eine Festlegung des repräsentativen γ -Werts grundsätzlich einerseits in Anlehnung an die Untersuchungsergebnisse der additiven Modellbildung nach *Rautenstrauch* [65] stattfinden

(siehe hierzu Abb. 7.5 (unten)), sowie andererseits ebenso auf Basis der realen experimentell generierten Last-Verschiebungs-Zusammenhänge durchgeführt werden (siehe hierzu Abb. 7.7). Betrachtet man in diesem Zusammenhang den resultierenden Last-Verschiebungs-Zusammenhang der Modellbildung nach *Rautenstrauch* [65], kann, wie bereits einleitend erwähnt, eine grundsätzliche Eignung dieses Berechnungsprozederes im Allgemeinen festgestellt werden, dieses Verfahren zeichnet sich weiterführend allerdings durch deutliche Sicherheitsreserven, und somit eine feststellbar geringere Steigung k als die experimentell abgeleiteten Zusammenhänge, aus. Der in Anlehnung an diese Modellbildung ermittelte repräsentative γ -Wert ($\gamma(K_{ser}) = 0.46$) charakterisiert sich demnach äquivalent zu ebendieser selbst durch deutliche Sicherheitsreserven, eine weitere gegebene Erhöhung dieser kontextuellen Entität kann folglich angestrebt werden.

Betrachtet man in diesem Zusammenhang demnach weiterführend ein auf Basis der experimentell generierten Last-Verschiebungs-Zusammenhänge abgeleitetes Spektrum repräsentativer γ -Werte, wird, wie aus Abb. 7.7 ersichtlich, eine theoretisch nochmalig deutliche Erhöhung dieser Entität möglich. In diesem Sinne zeichnen sich die gegebenen Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der kombiniert ausgeführten Versuchstypologie Blech-Kerbe durch einen eigentlich starren Verbund der Komponenten Holz und Beton aus, eine theoretische Festlegung des repräsentativen γ -Werts auf $\gamma(K_{ser}) = 1.00$ wäre demnach möglich, stellt sich mit Bezug auf vorhandene Sicherheitsreserven aus Sicht des Autors allerdings als nicht zwingend sinnvoll dar. Unter einer entsprechenden Berücksichtigung gegebener Sicherheitsaspekte soll demnach schlussfolgernd abschließend ein demgemäß resultierender repräsentativer γ -Wert von $\gamma(K_{ser}) = 0.75$ vorgeschlagen werden, als auf Basis dieser Entitätsfestlegung ein qualitativ durchwegs kennzeichnender Last-Verschiebungs-Zusammenhang abgeleitet werden kann, gleichzeitig aber ebenso gewisse Sicherheitsreserven gewährleistet werden können. Unter der Berücksichtigung dieser vorliegenden Randbedingung kann eine grundsätzliche Eignung des normativ verankerten Berechnungsprozederes in Form des γ -Verfahrens für die kombiniert ausgeführte, dem realen Vollholz-Beton-Verbunddeckensystem entsprechende, Versuchstypologie Blech-Kerbe folglich festgehalten werden, eine gegebene Berechnung auf Basis eines, im weiteren Detail untersuchungsgestützt ermittelten, repräsentativen γ -Werts wird abschließend demgemäß möglich.

Zusammengefasst lassen sich die beiden Berechnungsprozedere in Form des normativ verankerten γ -Verfahrens, sowie der additiven Modellbildung nach *Rautenstrauch* [65] als, sowohl für das real ausgeführte, tatsächlich vorliegende Vollholz-Beton-Verbunddeckensystem in Form der Versuchstypologie Blech-Kerbe, wie auch für dessen Teilsysteme in Form der Versuchstypologien Blech bzw. Kerbe, grundsätzlich geeignet beschreiben. Die beiden jeweils variierenden Berechnungskonzepte können die experimentell generierten Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der unterschiedlichen Versuchstypologien sowohl für das Lastniveau des Grenzzustands der Gebrauchstauglichkeit als auch für jenes des Grenzzustands der Tragfähigkeit in guter Näherung realistisch abbilden und weisen in diesem Zusammenhang dabei überdies auch in gewissem Maße vorhandene Sicherheitsreserven auf. Aus Sicht einer normativen Vergleichsbetrachtung kann eine entsprechende Anwendung der gegebenen Berechnungsprozedere demnach als geeignet bezeichnet werden, eine demgemäße Anwendung zur rechnerischen Bewertung des vorliegenden Vollholz-Beton-Verbunddeckensystems erscheint abschließend dementsprechend sinnvoll.

7.2.2 Dauerlastversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern

Der kontextuelle Umfang der Dauerlastversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern kann gemäß den Inhalten aus *Kapitel 6* anhand der drei maßgebenden Versuchsreihen LaTr-BI, LaTr-Ke und LaTr-BI-Ke der drei Versuchstypologien Blech, Kerbe und Blech-Kerbe festgehalten werden. Als es sich bei den genannten Versuchsreihen im weiteren Sinne, wie auch bereits in *Kapitel 7.2.1* erwähnt, um symmetrische Biegeträger, und somit vollständig ausgebildete Tragstrukturen mit projektspezifisch definierten Systemabmessungen, handelt, liegen für diese Konzepttypologien einerseits nur grundsätzlich ähnliche, geometrisch und strukturell allerdings nicht vollständig idente, vergleichende literarische Versuchsreihen vor, sowie können andererseits im Kontext einer normativen Vergleichsbetrachtung, entsprechend der vorhandenen Möglichkeiten zur Strukturbewertung großmaßstäblicher Trägersysteme, ebenso nur indirekt abgeleitete Systemgrößen komparativ betrachtet werden.

Unter der Berücksichtigung dieser genannten Eigenschaften umfassen die nachfolgenden kontextuellen Vergleichsbetrachtungen, neben den Versuchsergebnissen aus *Kapitel 6*, in literarischer Hinsicht ausgewählte Versuchsreihen gemäß *Blaß* [66], sowie des Weiteren darüber hinaus normative Bezugsentitäten gemäß *ONR CEN/TS 19103* [3] (unter ebenso gegebener Berücksichtigung des zugehörigen nationalen Anhangs *ONR CEN/TS 19103/NA* [63]). Mit speziellem Hinblick auf die vergleichend dargestellten literarischen Versuchsreihen gemäß *Blaß* [66], lassen sich diese, als nicht bereits in *Kapitel 3* beinhaltete Literatur, mit Hinblick auf eine grundsätzliche strukturelle Kategorisierung in die Konzepttypologien der *Nagelplatten*, sowie der *Kerven* (mit einerseits *stiftförmigen glattschaftig/profilierendem VM - 90°* sowie andererseits *ohne VM mit Bewehrungseinlage*) einordnen (Versuchsreihenbezeichnungen dementsprechend Npl-4, als auch Ke-mVM-7 und Ke-oVM-Bew-1). Überdies weisen die genannten Versuchsreihen eine einerseits rippenförmige Ausführung (Npl-4 und Ke-mVM-7) auf, sowie kann diese andererseits dementsprechend auch als plattenförmige Konzeption mit geringer Breitenausdehnung (Ke-oVM-Bew-1) bezeichnet werden (für weiterführende explizite Details zu den maßgebenden Eigenschaften dieser literarischen Versuchsreihen siehe darüber hinaus auch *Anhang E*). Die genannten Literaturreferenzen zeichnen sich aus konzeptioneller Sicht folglich grundsätzlich durch in gewissem Maße vorhandene Ähnlichkeiten mit den eigens durchgeführten maßgebenden Untersuchungen an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern aus, eine vergleichende Betrachtung dieser Versuchsreihen soll schlussfolgernd trotz a priori teilweise vorhandener, struktureller Divergenzen jedenfalls möglich werden. Wesentlichste Untersuchungsgröße in dieser vorhandenen Vergleichsbetrachtung stellt hierbei weiterführend die Kriechzahl φ für den Lebenszyklus (Dauer 50 Jahre) dar, darüber hinaus sollen aber auch die gemäß den Untersuchungen aus *Kapitel 6* generierten Anteilsmäßigkeiten der Kriechzahl φ in Form der Grundkriechzahl φ_{gr} sowie der mechanosorptiven Kriechzahl φ_{ms} Betrachtung finden.

Neben dieser kumulativen Darbringung der beschriebenen systemischen Charakteristiken der literarischen Versuchsreihen können im weiteren Sinne auch die genaueren Details der normativen Vergleichsbetrachtungen kontextuell beleuchtet werden. Wie in diesem Zusammenhang bereits einleitend erwähnt, wird eine demgemäße Vergleichsbetrachtung der vorliegenden Untersuchungsergebnisse mit normativen Entitäten nur auf Basis einer indirekten komparativen Gegenüberstellung möglich. In diesem Sinne beinhaltet das in dem eingangs erwähnten Normungsdokument vorhandene Berechnungskonzept demnach

ein Formelwerk zur Berücksichtigung der auftretenden Langzeiteffekte an den Verbundkomponenten Holz und Beton, sowie an den dabei applizierten Schubverbindersystemen. Basierend auf dieser Konzeption lässt sich mithilfe verschiedenster baustatischer Methoden weiterführend unter anderem auf das zeitabhängige Verformungsverhalten der jeweiligen Tragstruktur schließen, wobei im Kontext des genannten Berechnungskonzepts gemäß *ONR CEN/TS 19103* [3] zwei Zeitpunkte innerhalb der allgemeinen Langzeitbetrachtungen (am relativen Beginn des Lebenszyklus bei $t = 3$ bis 7 a sowie am Ende des Lebenszyklus bei $t = 50$ a) als im Detail maßgebend erachtet werden. Die auf Basis dieses Berechnungskonzepts generierten zeitabhängigen vertikalen Verschiebungen $u_v(t)$ zu den maßgebenden Zeitpunkten $t = 3$ bis 7 a bzw. $t = 50$ a können demnach folglich den analytisch abgeleiteten Versuchsergebnissen gemäß *Kapitel 6* vergleichend gegenübergestellt werden, wodurch einerseits eine quantitative Verifikation der eigens durchgeführten maßgebenden Untersuchungen an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern stattfinden kann, sowie andererseits eine kritische Betrachtung der jeweiligen Entitäten innerhalb des gemäß *ONR CEN/TS 19103* [3] vorliegenden Berechnungskonzepts möglich werden soll.

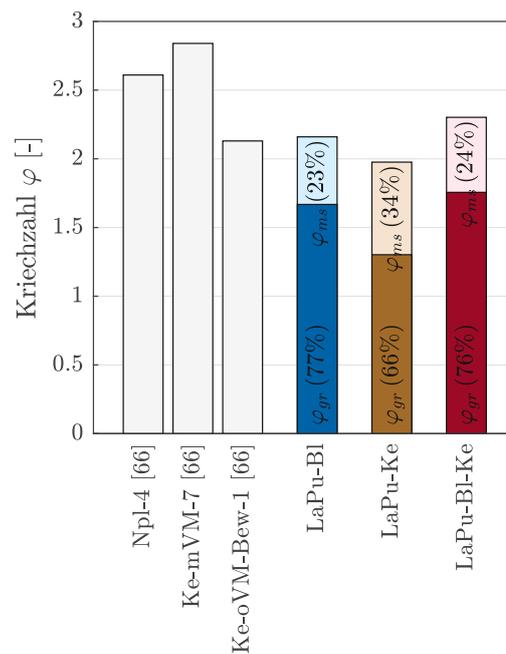


Abb. 7.8: Vergleich der maßgebenden mechanischen Entitäten der experimentellen Dauerlastversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern unter Langzeitbeanspruchung im Kontext literarischer Vergleichsbetrachtungen | Versuchsreihen LaTr-BI, LaTr-Ke und LaTr-BI-Ke | Kriechzahl φ

Betrachtet man mit weiterführendem Bezug auf die kontextuelle vergleichende Gegenüberstellung der vorliegenden Untersuchungsergebnisse der Versuchsreihen LaTr-BI, LaTr-Ke und LaTr-BI-Ke mit jenen der genannten Literaturreferenzen gemäß *Blaß* [66], werden die maßgebenden komparativen Eigenschaften dieser Versuchstypologien entsprechend gegebener Abb. 7.8 deutlich. Wie demgemäß ersichtlich, liegen die Kriechzahlen φ

der gegebenen Versuchsreihen LaTr-Bl, LaTr-Ke und LaTr-Bl-Ke grundsätzlich in einem quantitativ ähnlichen Bereich wie jene der literarischen Versuchsreihen gemäß *Blafß* [66], eine qualitative, wie im weiteren Sinne auch quantitative Einordnung der vorliegenden Untersuchungsergebnisse wird demnach im Allgemeinen folglich möglich. Das zeitabhängige Verformungsverhalten der maßgebenden Versuchsreihen LaTr-Bl, LaTr-Ke und LaTr-Bl-Ke lässt sich schlussfolgernd demgemäß als komparativ ähnlich im Vergleich zu jenem der Literaturreferenzen bezeichnen. Neben diesem allgemein feststellbaren, generellen Vergleichscharakteristikum lässt sich mit Bezug auf das Kriechverhalten der literarischen Versuchsreihen weiterführend darüber hinaus ein überdies vorhandener Einfluss der generellen strukturellen Ausführungsform (rippen- bzw. plattenförmige Konzeption) erkennen. Als sich das untersuchte Verbunddeckensystem mit schmalseitig aneinandergereihten, flachkantigen Vollholzbalken im Allgemeinen als grundlegend plattenförmiges Ausführungskonzept charakterisieren lässt, kann demnach ebenso eine quantitative Ähnlichkeit der Untersuchungsergebnisse der eigens durchgeführten Untersuchungen an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern mit jenen der literarischen plattenförmigen Ausführungsform (Ke-oVM-Bew-1) festgestellt werden. Von diesem Charakteristikum demgegenüber in gewissem Maße entsprechend abweichend verhält es sich überdies folglich bei einer komparativen Betrachtung der Untersuchungsergebnisse der vorliegenden Versuchsreihen LaTr-Bl, LaTr-Ke und LaTr-Bl-Ke und jenen der literarischen rippenförmigen Ausführungsformen (Npl-4 und Ke-mVM-7). In diesem Sinne ergeben sich im Gegensatz zu den Versuchsreihen LaTr-Bl, LaTr-Ke und LaTr-Bl-Ke hierbei vergleichsweise erhöhte Kriechzahlen φ für die genannten Versuchsreihen Npl-4 und Ke-mVM-7, aus diesem Umstand geschlussfolgert kann daraus abschließend folglich auch ein entsprechend ebenso erhöhtes Verformungspotential dieser Versuchsreihen im Vergleich zu den eigens durchgeführten Untersuchungen an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern abgeleitet werden.

Stellt man im überdies vorhandenen Kontext der normativen Vergleichsbetrachtungen das eingangs bereits kurz erläuterte Formelwerk zur Berücksichtigung der auftretenden Langzeiteffekte an den Verbundkomponenten Holz und Beton, sowie an den dabei applizierten Schubverbindersystemen darüber hinaus in den näheren Blickpunkt, lässt sich ebendieses grundsätzlich in Abhängigkeit der für die einzelnen genannten Modellkomponenten jeweils maßgeblich auftretenden Langzeiteffekte beschreiben, wobei als in diesem Zusammenhang kontextuell maßgebliche Langzeiteffekte hierbei generell jene in Form des Kriechens der Verbundkomponenten Holz und Beton, sowie der dabei applizierten Schubverbindersysteme, als auch ebendieser in Form des Schwindens bzw. Quellens der expliziten Verbundkomponenten Holz und Beton genannt werden können.

Betrachtet man in diesem Kontext demgemäß das Berechnungskonzept zur rechnerischen Berücksichtigung des auftretenden Langzeiteffekts in Form des Kriechens weiterführend im genaueren Detail, lässt sich dieses hierbei grundsätzlich auf Basis von zeitabhängigen Entitätsabminderungen mechanischer Kenngrößen des Kurzzeittragzustands, wie teilweise ebenso bereits in *Kapitel 7.1.2* angeführt, beschreiben. In diesem Sinne werden die mechanischen Eigenschaften der kriechrelevanten Strukturkomponenten auf Basis gegebener Abminderungsfaktoren reduziert und auf Grundlage dessen folglich einer weiteren allgemeinen Modellberechnung zugeführt, wobei die genannte Reduktion sich hierbei grundsätzlich in Abhängigkeit der als maßgebend erachteten Betrachtungszeitpunkte ($t = 3$ bis 7 a bzw. $t = 50$ a) definiert, wie nachfolgend demgemäß auch aus den hierfür repräsentativen Glei-

chungen Glg. 7.8 bis Glg. 7.13 entnommen werden kann. Als der Langzeiteffekt in Form des Kriechens, wie auch bereits entsprechend erwähnt, dabei generell sowohl in Verbindung mit den Verbundkomponenten Holz und Beton, als auch mit Bezug auf die dabei applizierten Schubverbindersysteme auftritt, sei in diesem Kontext hierbei schlussfolgernd gleichermaßen angemerkt, dass sich die nachfolgend angeführten repräsentativen Gleichungen demgemäß auch ebenso auf mechanische Entitäten all dieser einzelnen Modellkomponenten beziehen.

$$E_{\text{Beton}}(t = 3 \text{ bis } 7 \text{ a}) = \frac{E_{\text{Beton}}}{1 + \Psi_{\text{Beton}}(t = 3 \text{ bis } 7 \text{ a}) \cdot \varphi_{\text{Beton}}} \quad (7.8)$$

$$E_{\text{Beton}}(t = 50 \text{ a}) = \frac{E_{\text{Beton}}}{1 + \Psi_{\text{Beton}}(t = 50 \text{ a}) \cdot \varphi_{\text{Beton}}} \quad (7.9)$$

$$E_{\text{Holz}}(t = 3 \text{ bis } 7 \text{ a}) = \frac{E_{\text{Holz}}}{1 + \Psi_{\text{Holz}}(t = 3 \text{ bis } 7 \text{ a}) \cdot k_{\text{def}}} \quad (7.10)$$

$$E_{\text{Holz}}(t = 50 \text{ a}) = \frac{E_{\text{Holz}}}{1 + \Psi_{\text{Holz}}(t = 50 \text{ a}) \cdot k_{\text{def}}} \quad (7.11)$$

$$K_{\text{ser}}(t = 3 \text{ bis } 7 \text{ a}) = \frac{K_{\text{ser}}}{1 + \Psi_{\text{VM}}(t = 3 \text{ bis } 7 \text{ a}) \cdot k_{\text{def}}'} \quad (7.12)$$

$$K_{\text{ser}}(t = 50 \text{ a}) = \frac{K_{\text{ser}}}{1 + \Psi_{\text{VM}}(t = 50 \text{ a}) \cdot k_{\text{def}}'} \quad (7.13)$$

Wie aus der konzeptionellen Strukturierung der dargebrachten Gleichungen ersichtlich wird, beziehen sich sowohl die Zusammenhänge für die zeitabhängigen Elastizitätsmoduln $E_{\text{Beton}}(t)$ bzw. $E_{\text{Holz}}(t)$ als auch der Zusammenhang für den zeitabhängigen Verschiebungsmodul $K_{\text{ser}}(t)$, wie bereits angemerkt, grundsätzlich auf jeweils entsprechende Entitätsreduktionen der einzelnen Größen des Kurzzeittragzustands E_{Beton} , E_{Holz} und K_{ser} , die Berücksichtigung des maßgebenden Langzeiteffekts in Form des Kriechens erfolgt daraus schlussfolgernd somit im Allgemeinen ausschließlich auf Basis einer expliziten quantitativen Abminderung ursprünglicher zeitungebundener Ausgangsgrößen. Im genaueren Detail definiert sich die jeweilige Abminderung hierbei generell auf Basis des Produkts einer jeweils repräsentativen Kriechentität für den Lebenszyklus (Endkriechzahl des Betons φ_{Beton} , Verformungsbeiwert des Holzes k_{def} und Verformungsbeiwert der Schubverbindung k_{def}') mit einem entsprechenden Koeffizienten dieser Größe ($\Psi_{\text{Beton}}(t)$, $\Psi_{\text{Holz}}(t)$ und $\Psi_{\text{VM}}(t)$). Während sich die jeweils repräsentativen Kriechentitäten hierbei im weiteren Kontext demnach als grundsätzlich konstante, zeitunabhängige Größen charakterisieren (jeweiliger Bezug auf das Ende des Lebenszyklus, $t = 50 \text{ a}$), stellen sich die entsprechend verknüpften Koeffizienten demgegenüber als jeweils zeitabhängige Entitäten dar. In diesem Sinne definieren sich die repräsentativen Kriechentitäten demnach als tatsächliche physikalische bzw. mechanische Kenngrößen, während die gegebenen zugehörigen Koeffizienten konträr dazu aus zugehörigen Parameterstudien entstammen. Weiterführendes Ziel der vorliegenden normativen Vergleichsbetrachtungen soll es demnach unter anderem auch

sein diese zugehörigen Koeffizienten auf Basis der vorhandenen Dauerlastversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern entsprechend zu validieren und diese normativ vorhandenen Zahlenwerte dementsprechend auch zu bewerten.

Betrachtet man im weiteren Kontext überdies das demgemäße Berechnungskonzept zur rechnerischen Berücksichtigung des gleichermaßen auftretenden Langzeiteffekts in Form des Schwindens bzw. Quellens im genaueren Detail, lässt sich dieses hierbei grundsätzlich auf Basis einer zusätzlich aufgebracht, dehnungsabhängigen fiktiven vertikalen Ersatz(gleich)last beschreiben. In diesem Sinne wird auf Grundlage der aus den inneren und äußeren Randbedingungen resultierenden zeitabhängigen Dehnungen der Verbundkomponenten Holz und Beton eine jeweils resultierende fiktive Ersatzlast definiert und diese im Zuge der weiteren allgemeinen Modellbildung auf die dabei jeweilig gegebenen Tragstrukturen aufgebracht. Die rechnerische Abbildung dieser genannten Prozesse erfolgt im weiteren Kontext hierbei sowohl für den Effekt des Schwindens, als auch für ebendiesen des Quellens in analytisch grundsätzlich äquivalenter Form, beide Mechanismen können schlussfolgernd im Allgemeinen auf Basis der selben repräsentativen Gleichungen abgebildet werden. Als für die Verbundkomponente Beton aber im Allgemeinen kein Quelleneffekt vorliegt und die Schwind- und Quelleffekte der Verbundkomponente Holz auf Basis der Gegebenheiten der vorliegenden Untersuchungen gemäß *Schänzlin* [67] ($\Delta u \leq 6\%$) gleichermaßen vernachlässigt werden können, definiert sich als demgemäß im gegebenen Berechnungskonzept ausschließlich zu berücksichtigender Langzeiteffekt das Schwinden der Verbundkomponente Beton, welcher in Abhängigkeit der als maßgebend erachteten Betrachtungszeitpunkte ($t = 3$ bis 7 a bzw. $t = 50$ a) schlussfolgernd auf Basis der nachfolgend dargestellten repräsentativen Gleichungen Glg. 7.14 bis Glg. 7.17 abgebildet werden kann.

$$p_{s,Beton}(t = 3 \text{ bis } 7 \text{ a}) = C_p(t = 3 \text{ bis } 7 \text{ a}) \cdot \varepsilon_{s,Beton} \quad (7.14)$$

$$p_{s,Beton}(t = 50 \text{ a}) = C_p(t = 50 \text{ a}) \cdot \varepsilon_{s,Beton} \quad (7.15)$$

$$C_p(t = 3 \text{ bis } 7 \text{ a}) = \pi^2 \cdot a \cdot \frac{EA_{Holz}(t = 3 \text{ bis } 7 \text{ a}) \cdot EA_{Beton}(t = 3 \text{ bis } 7 \text{ a}) \cdot \gamma}{(EA_{Holz}(t = 3 \text{ bis } 7 \text{ a}) + EA_{Beton}(t = 3 \text{ bis } 7 \text{ a})) \cdot l^2} \quad (7.16)$$

$$C_p(t = 50 \text{ a}) = \pi^2 \cdot a \cdot \frac{EA_{Holz}(t = 50 \text{ a}) \cdot EA_{Beton}(t = 50 \text{ a}) \cdot \gamma}{(EA_{Holz}(t = 50 \text{ a}) + EA_{Beton}(t = 50 \text{ a})) \cdot l^2} \quad (7.17)$$

Wie aus dem konzeptionellen Aufbau der dargestellten Gleichungen ersichtlich wird, definiert sich die fiktive zeitabhängige Ersatzlast $p_{s,Beton}(t)$ auf Basis eines Produkts aus der vorliegenden zeitunabhängigen Schwinddehnung $\varepsilon_{s,Beton}$ und einem zugehörigen wiederum zeitabhängigen Lastkoeffizienten $C_p(t)$. Betrachtet man diese genannten Entitäten hierbei weiterführend im näheren Detail, zeigt sich die Schwinddehnung $\varepsilon_{s,Beton}$ dabei folglich als tatsächliche physikalische bzw. mechanische Kenngröße bestimmt, während der Lastkoeffizient $C_p(t)$ demgegenüber als rein systemcharakteristische Entität interpretiert werden kann. In diesem Sinne definiert sich diese neben allgemeinen strukturellen Größen in Form der Dehnsteifigkeiten der einzelnen Verbundkomponenten Holz und Beton $EA_{Holz}(t)$ bzw. $EA_{Beton}(t)$, sowie der Spannweite l im Speziellen auf Basis des

repräsentativen Abminderungsfaktors γ gemäß normativ verankertem γ -Verfahren (siehe hierzu auch *Kapitel 7.2.1*), die Auswirkungen des Langzeiteffekts in Form des Schwindens werden neben den effektrelevanten Eigenschaften der eigentlichen Verbundkomponente Beton schlussfolgernd demgemäß ebenso wesentlich durch die gegebene Verbundwirkung zwischen den einzelnen Verbundkomponenten Holz und Beton beeinflusst. Die explizite Berücksichtigung des genannten Langzeiteffekts stellt sich abschließend zusammengefasst demnach nicht nur als demgemäß material-, sondern überdies hinaus als ebenso entsprechend systemcharakteristisch und somit gleichermaßen grundsätzlich variantenabhängig dar.

Als die generellen Zusammenhänge zur rechnerischen Berücksichtigung der maßgebenden Langzeiteffekte in Form des Kriechens der Verbundkomponenten Holz und Beton bzw. der dabei applizierten Schubverbindersysteme, sowie des Schwindens der Verbundkomponente Beton sich auf dieser Basis vollständig beschreiben lassen, können weiterführend folglich ebenso die tatsächlichen quantitativ maßgebenden Details der vergleichenden Betrachtungen detailliert beleuchtet werden. Wie in diesem Sinne bereits einleitend erwähnt, erfolgen die hierzu durchgeführten normativen Vergleichsbetrachtungen demnach auf Basis einer komparativen Gegenüberstellung der analytisch abgeleiteten zeitabhängigen vertikalen Verschiebungen $u_v(t)$ der Versuchsreihen LaTr-BI, LaTr-Ke und LaTr-BI-Ke mit den numerisch ermittelten zeitabhängigen vertikalen Verschiebungen $u_v(t)$ von demgemäß repräsentativen baustatischen Rechenmodellen, wobei in diesem Sinne Stabwerksmodelle nach *Rautenstrauch* [65] (siehe hierzu auch *Kapitel 7.2.1*) als entsprechende Form der Modellbildung gewählt werden.

Die für den Langzeiteffekt in Form des Kriechens in diesem Sinne hierbei maßgebenden Berechnungsgrößen beziehen sich dabei weiterführend, wie äquivalent bereits auch aus *Kapitel 7.1.2* zu entnehmen, im Detail auf Entitäten der Nutzungsklasse 2, als sich einerseits die klimatischen Randbedingungen innerhalb der Untersuchungen gemäß *Kapitel 6* durch eine relative Luftfeuchtigkeit RH von maximal 80% definieren (relative Luftfeuchtigkeit RH gemäß Nutzungsklasse 2 $\leq 85\%$) und andererseits die in den Proben daraus resultierende Holzfeuchte u 15% nicht überschreitet (Holzfeuchte u gemäß Nutzungsklasse 2 $\leq 20\%$). Auf Basis dieser Annahmen ergeben sich gemäß Tab. 7.1 folgende normativen Zahlenwerte für die repräsentativen Kriechentitäten bzw. deren Koeffizienten zur weiteren Berechnung der aus dem Langzeiteffekt in Form des Kriechens resultierenden zeitabhängigen vertikalen Verschiebungen $u_v(t)$ für die gegebenen maßgebenden Zeitpunkte $t = 3$ bis 7 a bzw. $t = 50$ a.

Tab. 7.1: Zahlenwerte der repräsentativen Kriechentitäten bzw. der Koeffizienten | Langzeiteffekt Kriechen

$\varphi_{\text{Beton}} = 2.6$	$k_{\text{def}} = 0.8$	$k_{\text{def}}' = 1.6$
$\Psi_{\text{Beton}}(t = 3 \text{ bis } 7 \text{ a}) = 1.7 - 0.5 \cdot \gamma^{1.1}$	$\Psi_{\text{Beton}}(t = 50 \text{ a}) = 1.8 - 0.3 \cdot \gamma^{2.5}$	
$\Psi_{\text{Holz}}(t = 3 \text{ bis } 7 \text{ a}) = 0.5$	$\Psi_{\text{Holz}}(t = 50 \text{ a}) = 1.0$	
$\Psi_{VM}(t = 3 \text{ bis } 7 \text{ a}) = 1.24 (0.65)$	$\Psi_{VM}(t = 50 \text{ a}) = 1.9 (1.0)$	

Wie aus Tab. 7.1 ersichtlich, ergeben sich für den Zeitpunkt $t = 3$ bis 7 a grundsätzlich entsprechend geringere Entitäten wie für den Zeitpunkt $t = 50$ a, als für diesen Zeitpunkt folglich auch geringere zeitabhängige vertikale Verschiebungen $u_v(t)$ zu erwarten sind. Darüber hinaus stellt sich der zeitabhängige Koeffizient für die Berücksichtigung der Auswirkung der Verbundwirkungen auf die Kriechzahl des Betons $\Psi_{\text{Beton}}(t)$ nicht wie die übrigen Koeffizienten als entsprechende Einzahlgröße dar, sondern zeigt sich dieser demgegenüber als gewisses Spektrum definiert. Dies ist weiterführend dadurch zu begründen, als dass sich diese Entität hierbei nicht nur in Abhängigkeit des jeweiligen Zeitpunkts darstellt, sondern sich konträr dazu zusätzlich auch noch über die vorliegende Verbundwirkung des applizierten Schubverbindersystems auf Basis des repräsentativen Abminderungsfaktors γ gemäß normativ verankertem γ -Verfahren (siehe hierzu auch *Kapitel 7.2.1*) charakterisiert. Da der gegebene Abminderungsfaktor γ grundsätzlich nur in einem Bereich $0 \leq \gamma \leq 1$ liegen kann, ergeben sich demgemäß folglich Spektren zwischen 1.2 und 1.7 für den Zeitpunkt $t = 3$ bis 7 a bzw. zwischen 1.5 und 1.8 für den Zeitpunkt $t = 50$ a, wobei der jeweils kleinere Zahlenwert dabei den Grenzwert einer starren Schubverbindung repräsentiert ($\gamma = 1$), und der jeweils größere Zahlenwert demgegenüber eine konzeptionell entsprechend lose Schubverbindung abbildet ($\gamma = 0$). Für die vorliegenden Versuchsreihen LaTr-Bl, LaTr-Ke und LaTr-Bl-Ke ergeben sich in diesem Zusammenhang hierbei Zahlenwerte in einem Bereich zwischen 1.34 und 1.58 für $\Psi_{\text{Beton}}(t = 3 \text{ bis } 7 \text{ a})$, sowie ebensolche in einem Spektrum zwischen 1.65 und 1.79 für $\Psi_{\text{Beton}}(t = 50 \text{ a})$. Des Weiteren sind bei detaillierter Betrachtung überdies auch für den zeitabhängigen Koeffizienten des Verformungsbeiwerts der Schubverbindung $\Psi_{VM}(t)$ jeweils zwei Zahlenwerte gemäß Tab. 7.1 angeführt. Die jeweilig größeren Werte (nicht eingeklammert) entsprechen hierbei jeweils den in den Vergleichsbetrachtungen angewendeten, und im Weiteren auch aus den eigenen Untersuchungen gemäß *Kapitel 7.1.2* abgeleiteten, Zahlenwerten, während die jeweils kleineren Werte (eingeklammert) demgegenüber die eigentliche normative Grundlage abbilden. Die vorliegenden Vergleichsbetrachtungen beruhen hierbei somit weiterführend grundsätzlich auf den aus den eigenen Untersuchungen generierten Kennwerten, und somit auf einem im Vergleich zur normativen Berechnungsgrundlage realitätsnäheren Ansatz, wobei in diesem Sinne das normativ definierte Verhältnis zwischen $\Psi_{VM}(t = 3 \text{ bis } 7 \text{ a})$ und $\Psi_{VM}(t = 50 \text{ a})$ aber überdies in äquivalenter Form erhalten bleiben soll.

Mit darüber hinaus vorliegendem Bezug auf die aus dem Langzeiteffekt in Form des Schwindens resultierenden maßgebenden Berechnungsgrößen können zur weiteren Ableitung der aus dem genannten Effekt resultierenden zeitabhängigen vertikalen Verschiebungen $u_v(t)$ für die maßgebenden Zeitpunkte $t = 3$ bis 7 a bzw. $t = 50$ a auch ebendiese weiterführend dementsprechend beschrieben werden. In diesem Sinne definiert sich die hierfür wesentliche Schwinddehnung $\varepsilon_{s,\text{Beton}}$ folglich grundsätzlich in Abhängigkeit der vorliegenden materialcharakteristischen Eigenschaften der entsprechenden Verbundkomponente Beton. Betrachtet man in diesem Zusammenhang weiterführend demnach ebendiese Eigenschaften des explizit in den maßgebenden Untersuchungen gemäß *Kapitel 6* zur Anwendung gekommen Betons, lässt sich dieser, wie ebenso bereits einleitend in *Kapitel 2.2.2* angemerkt, im Allgemeinen als demgemäßer Normalbeton mit aber überdies vorhandenen stark reduzierten Schwindeigenschaften (C 30/37 B2 F45 GK32 42.5N RRS gemäß *ÖNORM EN 206* [6] und *ÖNORM B 4710-1* [7]) beschreiben. Auf Basis dieser Informationen kann diese spezielle Charakteristik schlussfolgernd als grundsätzlich gegeben betrachtet werden, als

sich diese Eigenschaft auf Basis von *ÖNORM B4710-1* [7] überdies aber lediglich anhand des Gesamtwassergehalts der Betonagecharge (und nicht auf Grundlage einer tatsächlich experimentell gestützten Ermittlung einer resultierenden Schwinddehnung $\varepsilon_{s,Beton}$) definiert, bedarf es in diesem Zusammenhang folglich überdies einer ingenieurmäßigen Abschätzung dieser Größe, wobei unter der Berücksichtigung der vorliegenden Gegebenheiten hierbei schlussfolgernd ein Wert von $\varepsilon_{s,Beton} = 0.25\%$ für die genannte Entität festgelegt werden kann. Basierend auf dieser Definition und unter der Berücksichtigung der variantenspezifischen zeitabhängigen Lastkoeffizienten $C_p(t)$ können weiterführend abschließend die zeitabhängigen fiktiven Ersatzlasten $p_{s,Beton}(t)$ der einzelnen maßgeblichen Versuchstypologien bestimmt werden, wobei diese letztlich kumulativ zusammengefasst schlussfolgernd in einem Spektrum zwischen 1.05 und 1.15 kN/m^2 für den Zeitpunkt $t = 3$ bis 7 a, sowie in einem Bereich zwischen 0.90 und 0.93 kN/m^2 für den Zeitpunkt $t = 50$ a angesiedelt sind.

Unter der weiterführenden Berücksichtigung dieser konzeptionellen Eigenschaften können die genannten maßgebenden Vergleichsbetrachtungen mit Bezug auf die zeitabhängigen vertikalen Verschiebungen $u_v(t)$ für die Zeitpunkte $t = 3$ bis 7 a und $t = 50$ a folglich durchgeführt und deren komparativen Ergebnisse gemäß nachfolgender Abb. 7.9 dargestellt werden. Hierbei sei zusätzlich angemerkt, dass die vorhandenen analytisch abgeleiteten zeitabhängigen vertikalen Verschiebungen $u_v(t)$ für den, normativ im eigentlichen Sinne als Zeitraum angegebenen, Zeitpunkt $t = 3$ bis 7 a als auf der vergleichsweise wertgesteigertsten Seite liegend (höchste zeitabhängige vertikale Verschiebung $u_v(t)$ des Betrachtungszeitraums) für den definierten Zeitpunkt $t = 7$ a dargebracht werden.

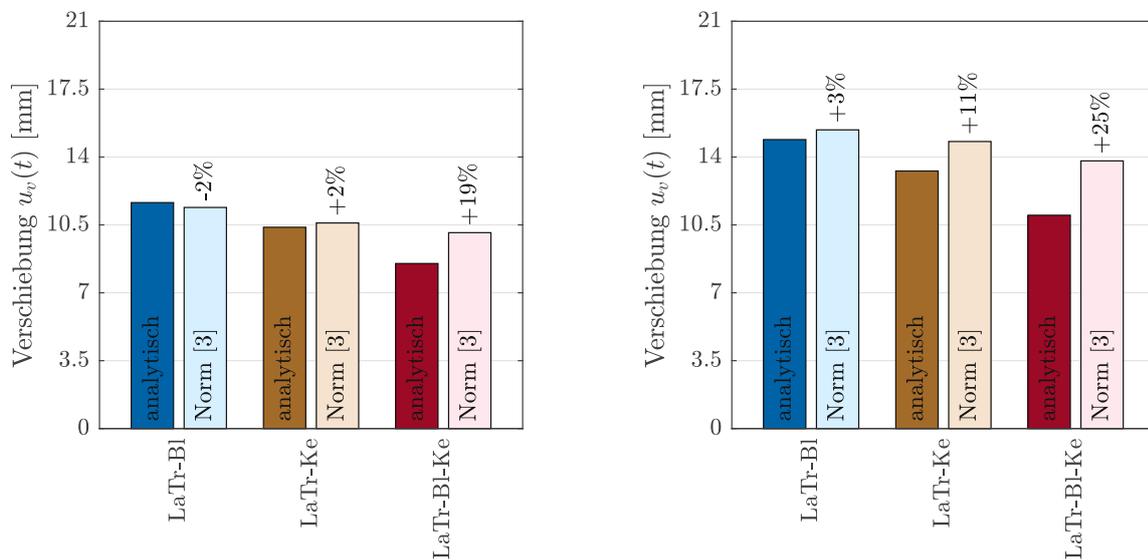


Abb. 7.9: Vergleich der maßgebenden mechanischen Entitäten der experimentellen Dauerlastversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern unter Langzeitbeanspruchung im Kontext normativer Vergleichsbetrachtungen | Analytisch und normativ generierte zeitabhängige vertikale Verschiebungen $u_v(t)$ der Versuchsreihen LaTr-BI, LaTr-Ke und LaTr-BI-Ke | Zeitpunkt $t = 7$ a (links), Zeitpunkt $t = 50$ a (rechts)

Wie aus den vorliegenden Vergleichsbetrachtungen gemäß Abb. 7.9 ersichtlich wird, stellen sich die resultierenden zeitabhängigen vertikalen Verschiebungen $u_v(t)$ mit Hinblick auf ein normativ entsprechend abgesichertes Berechnungsprozedere als annähernd vollständig auf der konservativen Seite liegend dar. Lediglich die rein blechbasierte Versuchsreihe LaTr-BI weist in ihrer normativen Berechnung eine geringfügige Unterschreitung der experimentell ermittelten vertikalen Verschiebung $u_v(t)$ zum Zeitpunkt $t = 7$ a (-2%) auf, ansonsten zeichnen sich die normativ bestimmten vertikalen Verschiebungen $u_v(t)$ im Vergleich zu ihren experimentellen Pendanten durch im Allgemeinen vollumfänglich gegebene Sicherheitsreserven aus, wobei ebendiese sich im näheren Detail in Abhängigkeit der jeweiligen Versuchstypologie in einem Spektrum zwischen 2 und 25% bewegen. Das normativ gegebene Berechnungsprozedere zur Ableitung der demgemäß aus Langzeiteffekten resultierenden zeitabhängigen vertikalen Verschiebungen $u_v(t)$ kann zusammengefasst als schlussfolgernd entsprechend valide und im weiteren Sinne als für die vorliegenden verbundbasierten Versuchstypologien generell geeignet beschrieben werden.

So darf in diesem Sinne demnach sowohl den hierbei gegebenen analytischen Zusammenhängen als auch den damit in konkretem Zusammenhang stehenden Entitäten eine entsprechende Zweckmäßigkeit zugeschrieben werden, die definierte Applikation der explizit vorliegenden kontextuellen Berechnungsgrößen stellt sich folglich als gleichermaßen generell sinnvoll dar. Im demgemäß vorliegenden Zusammenhang sei hierbei überdies allerdings ausdrücklich zu erwähnen, dass der für die Berücksichtigung des Kriechens der applizierten Schubverbindersysteme wesentliche Koeffizient der repräsentativen Kriechentität $\Psi_{VM}(t)$ in den vorliegenden Berechnungen definiert versuchsgestützte, in komparativer Betrachtung zur normativen Berechnungsgrundlage erhöhte, tatsächliche Zahlenwerte einnimmt, weshalb auf Basis des explizit normgestützten Berechnungsprozederes für den vorliegenden Fall quantitativ grundsätzlich geringere ausgeprägte Ergebnisgrößen resultieren, welche weiterführend im Allgemeinen ebenso auf der unsicheren Bemessungsseite liegen können. Um ein, wie eingangs bereits erwähnt, normativ dementsprechend vollständig abgesichertes Berechnungsprozedere schlussfolgernd zu gewährleisten, wird die demgemäße Anwendung der experimentell generierten Ergebnisgrößen für $\Psi_{VM}(t)$ aus Sicht des Autors abschließend zusammengefasst demnach ausdrücklich empfohlen.

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

Betrachtet man aktuelle Forschungs- und Entwicklungsansätze des modernen Ingenieurholzbaus im näheren Detail, lässt sich hierbei ein grundsätzlicher Trend hin zu möglichst struktur- und materialoptimierten Tragkonstruktionen erkennen, wozu speziell die Applikation von verbundbasierten Werkstoffen und Strukturen einen wesentlichen Beitrag leisten kann. Einen maßgeblichen Teilbereich dieser Entwicklungen nimmt hierbei der Einsatz von demgemäßen Holz-Beton-Verbundkonstruktionen ein, welchem sich diese Arbeit in weiterer Folge auch vollumfänglich widmet. In diesem Sinne wird hierbei ein neuartiges, patentiertes Verbunddeckensystem mit kombinierten Schubverbindern vorgestellt und mit Hinblick auf sein repräsentatives Trag- und Verformungsverhalten untersucht und weiterführend analysiert.

Um dieser gegebenen Forschungsaufgabe in möglichst strukturierter Form zu begegnen, gliedert sich die vorliegende Arbeit hierbei im Allgemeinen in aufeinander aufbauende, teilweise gleichermaßen chronologisch verknüpfte Hauptkapitel, welche demgemäß nachfolgend vorgestellt werden können. In diesem Sinne stellen sich die ersten einleitend gegebenen Kapitel *Kapitel 1* bis *Kapitel 3* demnach als allgemeine, konzeptionell und strukturell erklärende Grundlage für den weiters darauf gründenden expliziten Forschungsgegenstand dar, und zeigt sich ebendieser demgemäß schlussfolgernd auf Basis der entsprechenden Nachfolgekapiel *Kapitel 4* bis *Kapitel 7* bestimmt. Mit weiterführend detailliertem Bezug auf die expliziten maßgebenden Inhalte dieser einzelnen Hauptkapitel beschreibt *Kapitel 1* hierbei die allgemeine Zielsetzung der vorliegenden Forschungsaufgabe, sowie die für ein Erreichen ebendieser notwendigen methodischen Konzepte. Darauf aufbauend gibt *Kapitel 2* einen entsprechenden Einblick in die generelle Konzeptidee hinter dem untersuchungsrelevanten Verbunddeckensystem und stellt dieses die dabei vorhandenen konzeptionellen Besonderheiten und die daraus resultierenden Eigenschaften weitergehend im Detail vor. *Kapitel 3* gewährt überdies einen entsprechenden Einblick in die gegebenen Eigenschaften kontextuell relevanter bzw. ebenso artverwandter Schubverbindersysteme, wobei der Fokus dieser Betrachtungen hierbei im Speziellen auf das charakteristisch resultierende Trag- und Verformungsverhalten von ebendiesen gerichtet sein soll. Hierzu werden zu Beginn mathematische Grundlagen zur näheren Beschreibung des besagten Trag- und Verformungsverhaltens definiert und wird ebendieses überdies auf Basis von literarischen Vergleichsquellen weiterführend analysiert und bewertet, wobei auf Grundlage dieser Untersuchungen hierbei sowohl eine allgemeine Identifikation wesentlicher struktureller Eigenschaften kontextuell repräsentativer Schubverbindersysteme erfolgen kann, als darüber

hinaus ebenso auch eine explizite Ableitung entsprechend projektrelevanter Systemcharakteristiken möglich wird. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse dienen demnach nicht nur einer generellen Beschreibung allgemein resultierender Struktureigenschaften der jeweils betrachteten Konstruktionstypologien, sondern stellen im Speziellen auch eine demgemäße Grundlage für alle weiterführenden am maßgebenden Verbunddeckensystem durchgeführten Untersuchungen dar. Neben entsprechenden Voruntersuchungen zur konzeptionellen Anwendung der systemcharakteristischen ballistischen Vernagelung der applizierten Puzzle Strip Schubbleche gemäß *Kapitel 4*, können auf Basis der geschaffenen Grundlagen gemäß *Kapitel 3* demnach gleichermaßen die maßgebenden Hauptuntersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten des repräsentativen neuartigen Verbunddeckensystems gemäß *Kapitel 5* (Kurzzeittragverhalten) und *Kapitel 6* (Langzeittragverhalten) beschrieben werden, wobei sich ebendiese, neben allgemeinen experimentellen materialkundlichen Untersuchungen an den Verbundkomponenten Holz und Beton, hierbei im Besonderen durch entsprechende experimentelle, sowie analytische und numerische Untersuchungen zum expliziten Verbundverhalten der maßgeblichen Tragstruktur auf demgemäß zeitlich, als darüber hinweg auch maßstäblich multiplen Skalenebenen kennzeichnen.

Als das vorliegend betrachtete Verbunddeckensystem überdies eine explizit systemindividuelle Strukturcharakteristik auf Basis einer kombiniert ausgeführten Schubverbinderapplikation in Form von linienförmigen ballistisch vernagelten Puzzle Strip Schubblechen und punktuellen ausgerundeten Kerven ohne zusätzliche Verbindungsmittel zur Abhebesicherung aufweist, definiert sich das allgemeine Untersuchungsspektrum, neben den kontextuell bereits genannten Randbedingungen, darüber hinaus hierbei ebenso auf Grundlage einer vollumfassenden Berücksichtigung dieser Charakteristik, als in diesem Sinne dabei jeweils sowohl alleinstehende rein blech- und rein kervenbasierten Versuchstypologien (Versuchstypologie Blech bzw. Versuchstypologie Kerve) Beachtung finden, als überdies hinweg auch ein demgemäß kombiniert ausgeführtes, blech- und kervenbasiertes Strukturkonzept (Versuchstypologie Blech-Kerve) miteinbezogen wird. Interpretiert man in diesem Sinne die Untersuchungsergebnisse zum Kurzzeittragverhalten der Verbundstruktur gemäß *Kapitel 5* weiterführend im näheren Detail, können diese unter der Berücksichtigung der jeweils vorliegenden Versuchstypologie im Allgemeinen als grundsätzlich demgemäß systemindividuell, jeweils entsprechend ihrer jeweilig gegebenen Schubverbinderkonzeption, beschrieben werden, wobei dieses systemische Verhalten hierbei generell in Unabhängigkeit der jeweilig betrachteten maßstäblichen Skalenebene (Untersuchungen an klein- bzw. großmaßstäblichen Verbundprobekörpern) beobachtet werden kann.

In diesem Sinne definieren sich die rein blechbasierten Versuchsreihen durch ein grundsätzliches Trag- und Verformungsverhalten entsprechend hochduktiler Charakteristik, und zeigen sich die rein kervenbasierten Versuchsreihen demgegenüber durch ein demgemäß konträres, generell sprödes Systemverhalten bestimmt. Betrachtet man überdies die entsprechenden Untersuchungsergebnisse der kombiniert ausgeführten, blech- und kervenbasierten Versuchsreihen, stellen sich diese darüber hinaus im Allgemeinen auf Basis interagierender Eigenschaften der bereits beschriebenen alleinstehenden rein blech- und rein kervenbasierten Versuchsreihen dar. Ein demgemäßer Interaktionsmechanismus zwischen den einzelnen applizierten Schubverbindersystemen kann schlussfolgernd grundsätzlich vollumfassend abgeleitet werden, im Speziellen seien in diesem Kontext hierbei überdies hinweg allerdings die Untersuchungen an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern hervorgehoben, als

bei ebendiesen der genannte Interaktionsmechanismus in besonders deutlicher Form in Erscheinung tritt. In diesem Sinne zeigt sich das resultierende Trag- und Verformungsverhalten des neuartigen Verbunddeckensystems folglich wesentlich durch die Wahl der jeweilig applizierten Schubverbindersysteme beeinflusst, das vollständige Potential der untersuchten Tragstruktur kann demgemäß ausschließlich auf Basis eines kombinierten Einsatzes der beiden divergenten Schubverbindersysteme in Form von linienförmigen ballistisch vernagelten Puzzle Strip Schublechen und punktuellen ausgerundeten Kerven ohne zusätzliche Verbindungsmittel zur Abhebesicherung ausgeschöpft werden.

Unter der darüber hinaus weiterführend gegebenen Betrachtung der Untersuchungsergebnisse zum Langzeittragverhalten der Verbundstruktur gemäß *Kapitel 6*, können diese hierbei grundsätzlich in Abhängigkeit der jeweils explizit ausgeführten experimentellen Untersuchungen beschrieben werden. So definiert sich das in diesem Kontext vorliegende allgemeine Untersuchungsspektrum im Vergleich zu den Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung gemäß *Kapitel 5* nicht nur durch entsprechende Bruchversuche zur Beschreibung des (zeitabhängig) vorhandenen Trag- und Verformungsverhaltens der unterschiedlichen Versuchstypologien, sondern zeigt sich dieses überdies hinweg gleichermaßen durch damit in Verbindung stehende, zeitlich davor durchgeführte, Dauerlastversuche zur gegebenen Detektion des zeitabhängigen Verformungs- bzw. Kriechverhaltens der maßgeblichen Versuchsreihen bestimmt. Mit konkretem Bezug auf diese genannten Dauerlastversuche können unter der Berücksichtigung der für diese Untersuchungen speziell definierten klimatischen äußeren Randbedingungen (konstante Temperatur T , konstante bzw. zyklisch variierende Luftfeuchtigkeit RH) jeweils systemindividuelle Kriechzahlen φ sowohl für den experimentellen Betrachtungszeitraum ($t = 365$ d) festgehalten, als auf Basis von analytischen Überlegungen weiterführend auch für den gesamten Lebenszyklus ($t = 50$ a) abgeleitet werden, wobei dies aufgrund der generellen Betrachtung von multiplen maßstäblichen Skalenebenen kontextuell gleichfalls für die einzelnen Schubverbindertypologien (Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern) sowie auch für die vorliegenden unterschiedlichen Typologien von eigentlichen Tragstrukturen (Untersuchungen an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern) möglich wird. Darüber hinaus lässt die genannte Applikation der speziell definierten klimatischen äußeren Randbedingungen überdies eine generelle Aussage zum Einfluss von ebendiesen zu, als auf Basis der gegebenen teilweise konstanten und teilweise zyklisch variierenden Luftfeuchtigkeit RH gleichermaßen die Anteilmäßigkeiten φ_{gr} (Grundkriechzahl unter konstanter relativer Luftfeuchtigkeit RH) und φ_{ms} (mechanosorptive Kriechzahl unter zyklisch variierender relativer Luftfeuchtigkeit RH) der Kriechzahlen φ definiert bestimmt werden können.

Betrachtet man neben den beschriebenen Dauerlastversuchen weiterführend ebenso die daran anschließend durchgeführten Bruchversuche, können diese unter der Berücksichtigung der jeweils vorliegenden Versuchstypologie im Allgemeinen wiederum als grundsätzlich demgemäß systemindividuell, konträr zu den Untersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung gemäß *Kapitel 5* durch ein quantitativ allerdings teilweise wesentlich gesteigertes Trag- und Verformungsverhalten charakterisiert, beschrieben werden, wobei dieser Effekt hierbei grundsätzlich abermalig in Unabhängigkeit der jeweilig betrachteten maßstäblichen Skalenebene (Untersuchungen an klein- bzw. großmaßstäblichen Verbundprobekörpern) beobachtet werden kann. Während die rein blechbasierten Versuchsreihen in diesem Sinne hierbei nur geringfügige zeitliche Entitätsänderungen aufweisen, zeigen sich die kervenba-

sierten Versuchsreihen demgegenüber durch deutlich gesteigerte mechanische Kenngrößen bestimmt. Kontextuell kumulativ zusammengefasst kann das zeitliche Verhalten der betonbasierten Schubverbindertypologie Kerve, sowie im weiteren Sinne ebenso jenes der eigentlichen Verbundkomponente Beton, schlussfolgernd als wesentlichstes kontextuelles Einflusskriterium auf das zeitabhängige Trag- und Verformungsverhalten des untersuchten Verbunddeckensystems bezeichnet werden.

Um diese gemäß *Kapitel 5* und *Kapitel 6* generierten Untersuchungsergebnisse folglich überdies hinweg ebenso in einen betrachtungsrelevanten Kontext zu stellen, können darüber hinaus gleichermaßen entsprechende literarische und normative Vergleichsbetrachtungen mit ebendiesen durchgeführt werden, worauf im näheren Detail weiterführend demgemäß in *Kapitel 7* eingegangen werden soll. So werden in diesem Sinne hierbei einerseits sowohl literarische Untersuchungsergebnisse für eine entsprechende Verifikation der eigenen Forschungsergebnisse vergleichend herangezogen, als andererseits auch demgemäße normative Zusammenhänge komparativ gegenübergestellt, wobei sich diese neben expliziten Zahlenwerten für bestimmte mechanische Entitäten im Speziellen auch durch kontextuell definierte Berechnungskonzepte charakterisieren. Mit demgemäßen Hinblick auf die Forschungsergebnisse der Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern lassen sich diese mit Bezug auf eine komparative literarische Betrachtung als quantitativ vollständig adäquat einordnen, mit Hinblick auf eine normative Vergleichsbetrachtung trifft dieser Umstand weiterführend allerdings nur teilweise zu. In diesem Sinne zeichnen sich die experimentell generierten Ergebnisentitäten der kontextuellen kleinmaßstäblichen Bruchversuche durch normativ betrachtet vollumfängliche Sicherheitsreserven aus, jene der gegebenen kleinmaßstäblichen Dauerlastversuche liegen im Vergleich zur normativen Betrachtungsgrundlage allerdings auf der unsicheren Seite. Ein entsprechend notwendiger Adaptionsvorschlag zur Berichtigung dieser Zusammenhänge wird schlussfolgernd weiterführend demgemäß gegeben.

Mit überdies vorliegendem Hinblick auf die Forschungsergebnisse der Untersuchungen an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern lassen sich mit Hinblick auf eine komparative literarische Betrachtung auch diese als quantitativ vollständig adäquat einordnen, sowie trifft dieser Umstand darüber hinaus gleichermaßen auch mit Bezug auf eine gegebene normative Vergleichsbetrachtung zu, wobei sich ebendiese, wie auch bereits einleitend erwähnt, grundsätzlich auf die Bewertung der kontextuell gegebenen normativen Berechnungskonzepte bezieht. So ist es hierbei möglich zu zeigen, dass sich dabei sowohl das normativ verankerte γ -Verfahren, als überdies hinaus zusätzlich auch die durch den Autor gewählte Modellbildung nach *Rautenstrauch* als für den Versuchsgegenstand geeignete Berechnungsverfahren darstellen. In diesem Sinne können anhand dieser Berechnungsverfahren gleichermaßen die experimentell generierten Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der maßgebenden großmaßstäblichen Versuchstypologien bei bemessungsrelevanten Lastniveaus in adäquater Näherung abgeleitet werden, sowie besteht auf Basis der normativ vorliegenden Gegebenheiten ebenso auch die Möglichkeit das experimentell generierte zeitabhängige Verformungsverhalten von ebendiesen mit entsprechenden Sicherheitsreserven demgemäß abzubilden.

Abschließend zusammengefasst kann das vorliegende forschungsrelevante neuartige Verbunddeckensystem auf Basis der genannten Untersuchungen demnach vollumfänglich beschrieben werden, ein wesentlicher Entwicklungsschritt von der beginnenden Konzep-

tidee hin zur tatsächlichen baupraktischen Applikation der besagten Tragstruktur ist damit gesetzt. Trotz dem Erreichen dieses Meilensteins besteht im gegebenen Kontext aber natürlich auch noch entsprechender Bedarf an weiterführender Forschungs- und Entwicklungsarbeit, als das vorliegende Strukturkonzept zwar als holistisch konsistente Systemlösung betrachtet werden kann, sich in diesem Zusammenhang hierbei aber folglich gleichermaßen entsprechende Optimierungs- und Weiterentwicklungspotentiale erkennen lassen. Diese genannten Potentiale können dabei grundsätzlich als demgemäß vielschichtig bezeichnet werden, Möglichkeiten zur strukturellen Weiterentwicklung bestehen hierbei schlussfolgernd nicht nur auf Komponentenebene, sondern definieren sich im Allgemeinen darüber hinaus ebenso mit Hinblick auf eine generelle baupraktische Applikation. So ist es in diesem Sinne beispielsweise angedacht die generell als entsprechendes Deckensystem konzipierte Tragstruktur überdies hinweg gleichermaßen einem Einsatz als Wandsystem zuzuführen um somit ein demgemäß vollumfassendes Tragwerkskonzept auf Basis von Vollholz-Beton-Verbundelementen zu ermöglichen. Unter der Berücksichtigung dieses Aspekts, sowie auch unter der gegebenen ursprünglichen Betrachtung als horizontales Strukturelement ergibt sich in diesem Kontext natürlich auch noch weiteres Entwicklungspotential mit Hinblick auf die allgemeine konzeptionelle Gestaltung der eigentlichen Tragstruktur, als in diesem Sinne hierbei sowohl weitere Untersuchungen zur gegebenen Geometrieoptimierung der einzelnen Bauteilkomponenten als sinnvoll erscheinen, als darüber hinaus auch die daraus resultierenden funktionellen Verarbeitungsmöglichkeiten in der Herstellung von ebendiesen weitergehend einer demgemäßen Optimierung zugeführt werden können.

Quellenverzeichnis

- [1] J. Schänzlin. „Eurocode 5:2022 - Zur Bemessung von Holz-Beton-Verbunddecken“. In: R. Görlacher und C. Sandhaas. *Karlsruher Tage 2018 - Holzbau - Forschung für die Praxis*. 2018.
- [2] A. Dias et al. *Design of timber-concrete composite structures - A state of the art report by COST Action FP1402/WG4*. 2018.
- [3] Austrian Standards Institute. *ONR CEN/TS 19103 - Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Berechnung von Holz-Beton-Verbundbauteilen - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. 2022.
- [4] K. Engelhart. „Verfahren zur Herstellung von Verbunddecken und Verbunddecke“. WO 2019/157544 A1. 22. Aug. 2019.
- [5] Austrian Standards Institute. *ÖNORM DIN 4074-1 - Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 1: Nadelschnittholz*. 2012.
- [6] Austrian Standards Institute. *ÖNORM EN 206 - Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*. 2021.
- [7] Austrian Standards Institute. *ÖNORM B 4710-1 - Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität - Teil 1: Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206 für Normal- und Schwerbeton*. 2018.
- [8] Austrian Standards Institute. *ÖNORM B 4707 - Bewehrungsstahl - Anforderungen, Klassifizierung und Prüfung*. 2017.
- [9] DIN Deutsches Institut für Normung. *DIN EN 10346 - Kontinuierlich schmelztauchveredelte Flacherzeugnisse aus Stahl zum Kaltumformen - Technische Lieferbedingungen*. 2015.
- [10] DIN Deutsches Institut für Normung. *DIN EN 10143 - Kontinuierlich schmelztauchveredeltes Blech und Band aus Stahl - Grenzmaße und Formtoleranzen*. 2006.
- [11] DIN Deutsches Institut für Normung. *DIN EN 14592 - Holzbauwerke - Stiftförmige Verbindungsmittel - Anforderungen*. 2022.
- [12] Austrian Standards Institute. *ÖNORM B 1995-1-1 - Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. 2019.
- [13] DIN Deutsches Institut für Normung. *DIN EN ISO 2081 - Metallische und andere anorganische Überzüge - Galvanische Zinküberzüge auf Eisenwerkstoffen mit zusätzlicher Behandlung*. 2018.
- [14] A. Ceccotti. „Holz-Beton-Verbundkonstruktionen“. In: *STEP 2 - Bauteile, Konstruktion, Details*. Fachverlag Holz, 1995.

- [15] R. O. Foschi. „Load-slip characteristics of nails“. In: *Wood science* (1974).
- [16] R. M. Richard und B. J. Abbott. „Versatile elastic-plastic stress-strain formula“. In: *Journal of the engineering mechanics* (1975).
- [17] Austrian Standards Institute. *ÖNORM EN 26891 - Holzbauwerke - Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln - Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens*. 1991.
- [18] Austrian Standards Institute. *ÖNORM EN 1990 - Eurocode - Grundlagen der Tragwerksplanung*. 2013.
- [19] A. Dias. „Mechanical behavior of timber-concrete joints“. Diss. Technische Universität Delft, 2005.
- [20] E. Karacabeyli und A. Ceccotti. „Nailed wood-frame shear walls for seismic loads: Test results and design considerations“. In: *Structural engineering world wide* (1999).
- [21] M. Yasumura. „Estimating seismic performance of wood-framed structures“. In: *World conference on timber engineering WCTE* (1998).
- [22] ASTM International. *ASTM E2126-19 - Standard test methods for cyclic (reversed) load test for shear resistance of vertical elements of the lateral force resisting systems for buildings*. 2019.
- [23] Austrian Standards Institute. *ÖNORM EN 12512 - Holzbauwerke - Prüfverfahren - Zyklische Prüfungen von Anschlüssen mit mechanischen Verbindungsmitteln*. 2005.
- [24] K. Johansen. *Theory of timber connections*. 1949.
- [25] J. M. Branco et al. „Experimental analysis of laterally loaded nailed timber-to-concrete connections“. In: *Construction and building materials* (2009).
- [26] N. Khorsandnia et al. „Experimental and analytical investigation of short-term behavior of LVL-concrete composite connections and beams“. In: *Construction and building materials* (2012).
- [27] F. Moshiri. „Structural behavior of timber concrete composite connections and floors utilising screw connectors“. Diss. University of Technology Sydney, 2014.
- [28] D. Djoubissie et al. „Experimental study of the mechanical behavior of timber-concrete shear connections with threaded reinforcing bars“. In: *Engineering structures* (2018).
- [29] D. Djoubissie et al. „Influence of interlayer in timber-concrete composite structures with threaded rebar as shear connector - Experimental study“. In: *American journal of civil engineering and architecture* (2018).
- [30] M. Oudjene et al. „Non-linear finite element modelling of the structural behavior of screwed timber-to-concrete composite connections“. In: *Composite structures* (2013).
- [31] B. Berardinucci et al. „Mechanical behavior of timber-concrete connections with inclined screws“. In: *International journal of computational methods and experimental measurements* (2017).
- [32] P. Rädler. „Ressourceneffiziente Holz-Beton-Verbund-Decken zum Einsatz bei Holz-hochhäusern“. Technische Universität Wien, 2018.

- [33] M. van der Linden. „Timber-concrete composite floor systems“. Diss. Technische Universität Delft, 1999.
- [34] E. Lukaszewska. „Development of prefabricated timber-concrete composite floors“. Diss. Lulea University of Technology, 2009.
- [35] B. Shi et al. „Shear behavior of steel-plate connections for timber-concrete composite beams with prefabricated concrete slabs“. In: *Journal of renewable materials* (2022).
- [36] W. Zhu et al. „Experimental investigation on innovative connections for timber-concrete composite beams“. In: *Construction and building materials* (2019).
- [37] Y. Jiang et al. „Experimental study on notched connectors for glulam-lightweight concrete composite beams“. In: *Bioresources* (2020).
- [38] L. Zhang et al. „Experimental investigations on the shear properties of notched connections in mass timber panel-concrete composite floors“. In: *Construction and building materials* (2020).
- [39] B. Michelfelder. „Trag- und Verformungsverhalten von Kerven bei Brettstapel-Beton-Verbunddecken“. Diss. Universität Stuttgart, 2006.
- [40] M. Grosse. „Zur numerischen Simulation des physikalisch nichtlinearen Kurzzeittragverhaltens von Nadelholz am Beispiel von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen“. Diss. Bauhaus Universität Weimar, 2005.
- [41] A. Simon. „Analyse zum Trag- und Verformungsverhalten von Straßenbrücken in Holz-Beton-Verbundbauweise“. Diss. Bauhaus Universität Weimar, 2008.
- [42] D. Yeoh. „Behavior and design of timber-concrete composite floor system“. Diss. University of Canterbury, 2010.
- [43] B. Shi et al. „Shear performance of hybrid notch-screw connections for timber-concrete composite structures“. In: *BioResources* (2022).
- [44] Austrian Standards Institute. *ÖNORM EN 14358 - Holzbauwerke - Berechnung und Kontrolle charakteristischer Werte*. 2016.
- [45] Austrian Standards Institute. *ÖNORM EN 13183-1 - Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren*. 2004.
- [46] Austrian Standards Institute. *ÖNORM EN 384 - Bauholz für tragende Zwecke - Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte*. 2022.
- [47] Austrian Standards Institute. *ÖNORM B 4710-3 - Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität - Teil 3: Nationale Anwendung der Prüfnormen für Beton und seiner Ausgangsstoffe*.
- [48] Austrian Standards Institute. *ÖNORM EN 12390-1 - Prüfung von Festbeton - Teil 1: Form, Maße und andere Anforderungen für Probekörper und Formen*. 2021.
- [49] Austrian Standards Institute. *ÖNORM EN 12390-2 - Prüfung von Festbeton - Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen*. 2019.
- [50] Austrian Standards Institute. *ÖNORM EN 12390-3 - Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern*. 2019.

- [51] Austrian Standards Institute. *ÖNORM EN 12390-7 - Prüfung von Festbeton - Teil 7: Rohdichte von Festbeton*. 2021.
- [52] Austrian Standards Institute. *ÖNORM EN 1992-1-1 - Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. 2015.
- [53] Austrian Standards Institute. *ÖNORM EN 408 - Holzbauwerke - Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften*. 2012.
- [54] Austrian Standards Institute. *ÖNORM EN 338 - Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen*. 2016.
- [55] A. Dias et al. *A non-linear 3D FEM model to simulate timber concrete joints*. 2006.
- [56] F. Miriano et al. *A method to model wood by using Abaqus finite element software*. 2008.
- [57] R. Hill. *The mathematical theory of plasticity*. 1950.
- [58] D. Kretschmann. „Mechanical properties of wood“. In: *Wood handbook: wood as an engineering material*. 2010.
- [59] MatWeb LLC. *MatWeb Material property data*. 2024. URL: www.matweb.com.
- [60] CAE Assistant. *Concrete Damage Plasticity (CDP) in Abaqus*. 2024. URL: www.caeassistant.com/blog/concrete-damage-plasticity-cdp-abaqus-video/.
- [61] A. Elkady. *ABAQUS CDP Generator: A tool for generating concrete damage parameters for Abaqus*. 2023.
- [62] Austrian Standards Institute. *ÖNORM EN 1991-1-1 - Eurocode 1 - Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen - Wichte von Baustoffen und Lagergütern, Eigengewicht von Bauwerken und Nutzlasten im Hochbau*. 2023.
- [63] Austrian Standards Institute. *ONR CEN/TS 19103/NA - Nationaler Anhang zu Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Berechnung von Holz-Beton-Verbundbauteilen - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. 2025.
- [64] B. Shi et al. „Long-term performance of timber-concrete composite systems with notch-screw connections“. In: *Engineering structures* (2020).
- [65] K. Rautenstrauch et al. „Modellierung von diskontinuierlich verbundenen Holz-Beton-Verbundkonstruktionen - Teil 1: Kurzzeittragverhalten“. In: *Bautechnik* 80(8), p.534-541 (2003).
- [66] H. J. Blaß et al. *Langzeitverhalten von Holz-Beton-Konstruktionen*. 2002.
- [67] J. Schänzlin et al. *Entwurf und Entwicklung von Details bei Holz-Beton-Verbundbauteilen für den Einsatz im Hochbau*. 2020.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Methodischer Aufbau der Untersuchungen an Verbundprobekörpern und der begleitenden Untersuchungen an Materialprobekörpern	22
2.1	Struktureller Aufbau des untersuchten Vollholz-Beton-Verbunddeckensystems (oben) erweiterte Querschnittsnutzung mit künstlich eingeschnittener Baumkante und hexagonaler, flachkanter Querschnittsgeometrie sowie daraus resultierende Schubverbinderapplikationen (unten links) Schubverbindertypologie linienförmige ballistisch vernagelte Puzzle Strip Schubleche (unten mittig) Schubverbindertypologie punktuelle ausgerundete Kerven ohne zusätzliche mechanische Verbindungsmittel zur Abhebesicherung (unten rechts)	26
2.2	Geometrische Details der angewendeten Strukturhölzer	28
2.3	Geometrische Details der angewendeten linienförmigen Puzzle Strip Schubleche sowie der dabei verwendeten ballistischen Vernagelung mit zweireihigem Vernagelungsschema (Zickzack-Muster)	30
2.4	Geometrische Details der angewendeten punktuellen ausgerundeten Kerven ohne zusätzliche mechanische Verbindungsmittel zur Abhebesicherung	30
3.1	Allgemeiner Überblick zu Schubverbindersystemen bei HBV-Konstruktionen (adaptiert nach <i>Ceccotti</i> [14]): I ^{a)} Nägel, I ^{b)} Stabdübel aus Bewehrungsstahl, II ^{a)} und II ^{b)} Schrauben, III ^{a)} Nagelplatte, III ^{b)} Schublech mit geschraubten Verbindungsmitteln, IV ^{a)} rechteckige Kerbe ohne mechanisches Verbindungsmittel, IV ^{b)} rechteckige Kerbe mit mechanischem Verbindungsmittel	35
3.2	Idealisierte Betrachtungsweise einer Schubverbindung auf Basis eines beispielhaften nicht-linearen Federelements Reales System (links), idealisiertes System (rechts)	37
3.3	Tragfähigkeit und Steifigkeit einer Schubverbindung Idealisiertes Verhalten auf Basis eines beispielhaften nicht-linearen Federelements .	38
3.4	Steifigkeit einer Schubverbindung gemäß <i>ONR CEN/TS 19103</i> [3] und <i>ÖNORM EN 26891</i> [17] Anfangsverschiebungsmodul der Gebrauchstauglichkeit K_i (oben links), Verschiebungsmodul der Gebrauchstauglichkeit K_{ser} (rechts), Verschiebungsmodul der Tragfähigkeit K_u (unten links)	39

3.5	Tragfähigkeit und Steifigkeit einer Schubverbindung gemäß <i>ONR CEN/TS 19103</i> [3] und <i>ÖNORM EN 26891</i> [17] Traglastbereich der Schubtragfähigkeit F_{vR} (links), Allgemeines Lastregime zur experimentellen Ermittlung des Trag- und Verformungsverhaltens anhand von Versuchen an Push Out Probekörpern (rechts)	40
3.6	Duktilität einer Schubverbindung Idealisiertes Verhalten auf Basis unterschiedlicher beispielhafter nicht-linearer Federelemente, nicht ausgeprägter Fließübergang (links), ausgeprägter Fließübergang (rechts)	41
3.7	Duktilität einer Schubverbindung gemäß <i>ONR CEN/TS 19103</i> [3] und <i>ÖNORM EN 12512</i> [23] Bestimmung der Fließverschiebung u_y bei zwei eindeutigen linearen Anteilen (links), Bestimmung der Fließverschiebung u_y bei zwei nicht eindeutigen linearen Anteilen (rechts)	42
3.8	Duktilität einer Schubverbindung gemäß <i>ONR CEN/TS 19103</i> [3] und <i>ÖNORM EN 12512</i> [23] Grenzverschiebung u_u bei $F_u > 0.8F_{vR}$ (links), Grenzverschiebungen u_u bei $F_u = 0.8F_{vR}$ bzw. $u_u = 30mm$ (rechts)	43
3.9	Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen bei punktförmigen Verbindungen mit stiftförmigen VM (adaptiert nach <i>Johansen</i> [24]): a) Lochleibung Beton, b) Lochleibung Holz, c) Lochleibung Holz und Beton sowie Rotation VM, d) Lochleibung Beton sowie Fließgelenk im VM, e) Lochleibung Holz sowie Fließgelenk im VM, f) Lochleibung Holz und Beton sowie Fließgelenke im VM	44
3.10	Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen bei linienförmigen Verbindungen mit Schublechen und stiftförmigen VM (adaptiert nach <i>Johansen</i> [24]): a) Lochleibung Holz sowie Rotation VM bei dünnwandigem Schublech, b) Lochleibung Holz sowie Fließgelenk im VM bei dünnwandigem Schublech, c) Lochleibung Holz bei dickwandigem Schublech, d) Lochleibung Holz sowie Fließgelenk im VM bei dickwandigem Schublech, e) Lochleibung Holz sowie Fließgelenke im VM bei dickwandigem Schublech	46
3.11	Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen bei punktförmigen Verbindungen mit Kernen und eventuell vorhandenen stiftförmigen Verbindungsmitteln: a) Schubversagen Beton, b) Druckversagen Beton, c) Schubversagen Holz, d) Druckversagen Holz	48
3.12	Typologie stiftförmige glattschaftige/profilierete VM - 90° Netzdiagramm (oben links und rechts), Last-Verschiebungs-Diagramm (unten links)	51
3.13	Typologie stiftförmige geschraubte VM - 90° Netzdiagramm (oben links und rechts), Last-Verschiebungs-Diagramm (unten links)	53
3.14	Typologie stiftförmige geschraubte VM - 45° Netzdiagramm (oben links und rechts), Last-Verschiebungs-Diagramm (unten links)	55
3.15	Typologie Nagelplatten Netzdiagramm (oben links und rechts), Last-Verschiebungs-Diagramm (unten links)	57

3.16	Typologie Schublech mit geschraubten VM - 90° Netzdiagramm (oben links und rechts), Last-Verschiebungs-Diagramm (unten links)	59
3.17	Typologie Kerven ohne VM spröde Netzdiagramm (oben links und rechts), Last-Verschiebungs-Diagramm (unten links)	61
3.18	Typologie Kerven ohne VM duktil Netzdiagramm (oben links und rechts), Last-Verschiebungs-Diagramm (unten links)	63
3.19	Typologie Kerven mit stiftförmigen geschraubten VM - 90° Netzdiagramm (oben links und rechts), Last-Verschiebungs-Diagramm (unten links)	65
3.20	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse von systemrelevanten Ausführungsvarianten Verschiebungsmoduln K_{ser} (oben), Schubtragfähigkeiten F_{vR} (mittig), Duktilitätsmaße D_s (unten)	68
4.1	Verbindungsmitteltypen innerhalb der Voruntersuchungen: a) Beck 3.3 x 40 mm, b) ITW 2.8 x 50 mm, c) TJEP 4.0 x 50 mm	72
4.2	Übersicht zum Versuchsaufbau der vorauswertenden Slip Block Bruchversuche Schnitt A-A (links), Querschnitt (rechts)	73
4.3	Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der vorauswertenden Slip Block Bruchversuche Versuchsreihe SI-Beck-1r5 (oben links), Versuchsreihe SI-ITW-1r5 (oben rechts), Versuchsreihe SI-TJEP-1r5 (unten)	74
4.4	Verschiebungsmoduln K_{ser} und Schubtragfähigkeiten F_{vR} der vorauswertenden Slip Block Bruchversuche Versuchsreihe SI-Beck-1r5 (links), Versuchsreihe SI-ITW-1r5 (mittig), Versuchsreihe SI-TJEP-1r5 (rechts)	75
4.5	Geometrische Versuchsdetails Slip Block Bruchversuche Versuchsreihe SI-Beck-1r2 (links), Versuchsreihe SI-Beck-2rd2 (mittig), SI-Beck-2rd5 (rechts)	76
4.6	Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der Slip Block Bruchversuche Versuchsreihe SI-Beck-1r2 (links), Versuchsreihe SI-Beck-2rd2 (rechts)	77
4.7	Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der Slip Block Bruchversuche Versuchsreihe SI-Beck-1r5 (links), Versuchsreihe SI-Beck-2rd5 (rechts)	78
4.8	Verschiebungsmoduln K_{ser} und Schubtragfähigkeiten F_{vR} der Slip Block Bruchversuche	78
5.1	Versuchsspektrum der Untersuchungen an Verbundprobekörpern und der begleitenden Untersuchungen an Materialprobekörpern unter Kurzzeitbeanspruchung	82
5.2	Übersicht zum Versuchsaufbau der Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Betonproben Ermittlung der Betondruckfestigkeiten f_c	84
5.3	Versuchsergebnisse der Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Betonproben Histogramm der Betondruckfestigkeiten f_c (links), Histogramm der Rohdichten ρ (rechts)	85
5.4	Übersicht zum Versuchsaufbau der Untersuchungen an großmaßstäblichen Holzproben Ermittlung der lokalen Biege-Elastizitätsmoduln E_0 Grundriss (oben), Ansicht (unten)	86

5.5	Versuchsergebnisse der Untersuchungen an großmaßstäblichen Holzproben Histogramm der lokalen Biege-Elastizitätsmoduln E_0 (links), Histogramm der Rohdichten ρ (rechts)	87
5.6	Übersicht zum Versuchsaufbau der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe KuPu-BI Schnitte A-A, B-B und Querschnitt (oben), Ansichten (unten)	89
5.7	Übersicht zum Versuchsaufbau der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe KuPu-Ke Schnitte A-A, B-B und Querschnitt (oben), Ansichten (unten)	90
5.8	Übersicht zum Versuchsaufbau der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe KuPu-BI-Ke Schnitte A-A, B-B (links), Querschnitt (oben rechts), Ansichten (mittig und unten rechts)	91
5.9	Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe KuPu-BI Darstellung der Einzelkurven (oben), Darstellung der Mittelwertkurve (unten links), Darstellung der analytischen Kurve (unten rechts)	92
5.10	Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe KuPu-Ke Darstellung der Einzelkurven (oben), Darstellung der Mittelwertkurve (unten links), Darstellung der analytischen Kurve (unten rechts)	93
5.11	Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe KuPu-BI-Ke Darstellung der Einzelkurven (oben), Darstellung der Mittelwertkurve (unten links), Darstellung der analytischen Kurve (unten rechts)	94
5.12	Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern Zusammenfassung der Versuchsreihen KuPu-BI, KuPu-Ke und KuPu-BI-Ke	95
5.13	Verschiebungsmoduln K_{ser} und Schubtragfähigkeiten F_{vR} der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe KuPu-BI (links), Versuchsreihe KuPu-Ke (mittig), Versuchsreihe KuPu-BI-Ke (rechts)	97
5.14	Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe KuPu-BI (oben), Versuchsreihe KuPu-Ke (mittig), Versuchsreihe KuPu-BI-Ke (unten)	98
5.15	Übersicht zum Versuchsaufbau der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern Allgemeiner Versuchsaufbau Ansichten (links und rechts)	100
5.16	Übersicht zum Versuchsaufbau der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe KuTr-BI Querschnitt (oben), Schnitt A-A (mittig), Schnitt B-B (unten)	101

5.17	Übersicht zum Versuchsaufbau der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe KuTr-Ke Querschnitt (oben), Schnitt A-A (mittig), Schnitt B-B (unten)	102
5.18	Übersicht zum Versuchsaufbau der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe KuTr-BI-Ke Querschnitt (ganz oben), Schnitt B-B (mittig oben), Schnitt C-C (mittig unten), Schnitt A-A (ganz unten)	104
5.19	Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe KuTr-BI Darstellung der hor. Verschiebungen u_h (links und rechts), Darstellung der vert. Verschiebungen u_v inkl. Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen (mittig)	105
5.20	Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe KuTr-Ke Darstellung der hor. Verschiebungen u_h (links und rechts), Darstellung der vert. Verschiebungen u_v inkl. Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen (mittig)	106
5.21	Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe KuTr-BI-Ke Darstellung der hor. Verschiebungen u_h (links und rechts), Darstellung der vert. Verschiebungen u_v inkl. Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen (mittig)	107
5.22	Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern Zusammenfassung der Versuchsreihen KuTr-BI, KuTr-Ke und KuTr-BI-Ke	108
5.23	Schädigungs-, Versagens und Systemmechanismen der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe KuTr-BI	109
5.24	Schädigungs-, Versagens- und Systemmechanismen der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe KuTr-Ke	110
5.25	Schädigungs-, Versagens- und Systemmechanismen der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe KuTr-BI-Ke	112
5.26	Überblick zur numerischen Modellbildung der kleinmaßstäblichen Verbundprobekörper Versuchsreihen KuPu-BI (links), KuPu-Ke (mittig) und KuPu-BI-Ke (rechts)	114
5.27	Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der numerischen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe KuPu-BI (oben links), Versuchsreihe KuPu-Ke (oben rechts), Versuchsreihe KuPu-BI-Ke (unten)	117

5.28	Vergleich der Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen und numerischen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern Experimentelle Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der Versuchsreihen KuPu-BI, KuPu-Ke und KuPu-BI-Ke (links), Numerische Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der Versuchsreihen KuPu-BI, KuPu-Ke und KuPu-BI-Ke (rechts)	118
5.29	Untersuchungsergebnisse der numerischen Modellbildung der kleinmaßstäblichen Verbundprobekörper Versuchsreihe KuPu-BI Übersicht zur Modellbildung (links), von Mises Vergleichsspannung $\sigma_{v,M}$ und Deformationen der ballistischen Glattschaftnägel bei Erreichen der Streckgrenze f_y ebendieser (mittig), von Mises Vergleichsspannung $\sigma_{v,M}$ und Deformationen der ballistischen Glattschaftnägel bei Erreichen der Zugfestigkeit f_u ebendieser (rechts)	119
5.30	Untersuchungsergebnisse der numerischen Modellbildung der kleinmaßstäblichen Verbundprobekörper Versuchsreihe KuPu-Ke Übersicht zur Modellbildung (links), Schubspannung τ_{23} in der Kerne bzw. im Ansatz der Kervenflanke unmittelbar vor dem Auftreten des Schubversagens des Betons (mittig), Normalspannung σ_{22} im Holz unmittelbar vor dem Auftreten des Schubversagens des Betons (rechts)	120
5.31	Untersuchungsergebnisse der numerischen Modellbildung der kleinmaßstäblichen Verbundprobekörper Versuchsreihe KuPu-BI-Ke Übersicht zur Modellbildung (links), Schubspannung τ_{23} in der Kerne bzw. im Ansatz der Kervenflanke bei geringer Last F (Bildmitte links), von Mises Vergleichsspannung $\sigma_{v,M}$ und Deformationen der ballistischen Glattschaftnägel bei geringer Last F (Bildmitte rechts)	122
5.32	Untersuchungsergebnisse der numerischen Modellbildung der kleinmaßstäblichen Verbundprobekörper Versuchsreihe KuPu-BI-Ke Übersicht zur Modellbildung (links), Schubspannung τ_{23} in der Kerne bzw. im Ansatz der Kervenflanke unmittelbar vor dem Auftreten des Schubversagens des Betons (Bildmitte links), von Mises Vergleichsspannung $\sigma_{v,M}$ und Deformationen der ballistischen Glattschaftnägel unmittelbar vor dem Auftreten des Schubversagens des Betons (Bildmitte rechts) .	123
5.33	Untersuchungsergebnisse der numerischen Modellbildung der kleinmaßstäblichen Verbundprobekörper Versuchsreihe KuPu-BI-Ke Übersicht zur Modellbildung (links), von Mises Vergleichsspannung $\sigma_{v,M}$ und Deformationen der ballistischen Glattschaftnägel nach dem Auftreten des Schubversagens des Betons (Bildmitte rechts)	123
5.34	Überblick zur numerischen Modellbildung der großmaßstäblichen Verbundprobekörper Versuchsreihe KuTr-BI-Ke konzeptionelle Systemdarstellung explosionsartig (oben), konzeptionelle Systemdarstellung assembliert (unten)	127
5.35	Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der numerischen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe KuTr-BI (oben links), Versuchsreihe KuTr-Ke (oben rechts), Versuchsreihe KuTr-BI-Ke (unten)	131

5.36	Untersuchungsergebnisse der numerischen Modellbildung der großmaßstäblichen Verbundprobekörper Versuchsreihe KuTr-BI Normalspannung σ_{11} in den Verbundkomponenten Holz und Beton im Bereich geringer bis mittlerer vertikaler Verschiebungen u_v	132
5.37	Untersuchungsergebnisse der numerischen Modellbildung der großmaßstäblichen Verbundprobekörper Versuchsreihe KuTr-BI plastische Dehnung $\varepsilon_{pl,11}$ in der Verbundkomponente Beton im Bereich hoher bis höchster vertikaler Verschiebungen u_v	132
5.38	Untersuchungsergebnisse der numerischen Modellbildung der großmaßstäblichen Verbundprobekörper Versuchsreihe KuTr-BI von Mises Vergleichsspannung $\sigma_{v,M}$ im Puzzle Strip Schublech nach Überschreiten der Streckgrenze f_y im Bereich hoher bis höchster vertikaler Verschiebungen u_v	133
5.39	Untersuchungsergebnisse der numerischen Modellbildung der großmaßstäblichen Verbundprobekörper Versuchsreihe KuTr-BI von Mises Vergleichsspannung $\sigma_{v,M}$ in der Flächenbewehrung bei Erreichen der Zugfestigkeit f_u im Bereich hoher bis höchster vertikaler Verschiebungen u_v	133
5.40	Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der numerischen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe KuTr-BI (links), Verschiebungszustände der zugehörigen multi-linearen Federelemente (rechts)	136
5.41	Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der numerischen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe KuTr-Ke (links), Verschiebungszustände der zugehörigen multi-linearen Federelemente (rechts)	137
5.42	Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der numerischen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe KuTr-BI-Ke (links), Verschiebungszustände der zugehörigen multi-linearen Federelemente (rechts)	137
6.1	Versuchsspektrum der Untersuchungen an Verbundprobekörpern und der begleitenden Untersuchungen an Materialprobekörpern unter Langzeitbeanspruchung	146
6.2	Versuchsergebnisse der Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Betonproben Zeitliche Entwicklung der Betondruckfestigkeit $f_c(t)$ (links), Histogramm der Rohdichten ρ (rechts)	149
6.3	Übersicht zum Versuchsaufbau der experimentellen Dauerlastversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe LaPu-BI Ansicht (links), Schnitt A-A (rechts)	151
6.4	Übersicht zum Versuchsaufbau der experimentellen Dauerlastversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern Messpunkte der Holzfeuchtemessungen Versuchsreihe LaPu-BI (links), Versuchsreihe LaPu-Ke (mittig), Versuchsreihe LaPu-BI-Ke (rechts)	153

6.5	Verschiebungs-Zeit-Zusammenhänge der experimentellen Dauerlastversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe LaPu-BI Darstellung der zeitabhängigen Verschiebungen u_v (oben), Darstellung der zeitabhängigen Holzfeuchte u (mittig), Darstellung der zeitabhängigen klimatischen Randbedingungen (unten)	154
6.6	Verschiebungs-Zeit-Zusammenhänge der experimentellen Dauerlastversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe LaPu-Ke Darstellung der zeitabhängigen Verschiebungen u_v (oben), Darstellung der zeitabhängigen Holzfeuchte u (mittig), Darstellung der zeitabhängigen klimatischen Randbedingungen (unten)	155
6.7	Verschiebungs-Zeit-Zusammenhänge der experimentellen Dauerlastversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe LaPu-BI-Ke Darstellung der zeitabhängigen Verschiebungen u_v (oben), Darstellung der zeitabhängigen Holzfeuchte u (mittig), Darstellung der zeitabhängigen klimatischen Randbedingungen (unten)	156
6.8	Verschiebungs-Zeit- und Kriechzahl-Zeit-Zusammenhänge der experimentellen Dauerlastversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe LaPu-BI (oben), Versuchsreihe LaPu-Ke (mittig), Versuchsreihe LaPu-BI-Ke (unten)	157
6.9	Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe LaPu-BI Darstellung der Einzelkurven (oben), Darstellung der Mittelwertkurve (unten links), Darstellung der analytischen Kurve (unten rechts)	162
6.10	Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe LaPu-Ke Darstellung der Einzelkurven (oben), Darstellung der Mittelwertkurve (unten links), Darstellung der analytischen Kurve (unten rechts)	163
6.11	Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe LaPu-BI-Ke Darstellung der Einzelkurven (oben), Darstellung der Mittelwertkurve (unten links), Darstellung der analytischen Kurve (unten rechts)	164
6.12	Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern Zusammenfassung der Versuchsreihen LaPu-BI, LaPu-Ke und LaPu-BI-Ke	165
6.13	Verschiebungsmoduln K_{ser} und Schubtragfähigkeiten F_{vR} der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe LaPu-BI (links), Versuchsreihe LaPu-Ke (mittig), Versuchsreihe LaPu-BI-Ke (rechts)	166
6.14	Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern Zusammenfassung der Versuchsreihen KuPu-BI, KuPu-Ke und KuPu-BI-Ke sowie LaPu-BI, LaPu-Ke und LaPu-BI-Ke	169

6.15	Vergleich der maßgebenden mechanischen Entitäten der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern unter Kurz- und Langzeitbeanspruchung mittlerer Verschiebungsmodul $K_{ser,mean}$ (oben links), Mittelwert der Schubtragfähigkeit $F_{vR,mean}$ (oben rechts), charakteristische Schubtragfähigkeit $F_{vR,k}$ (unten links), Mittelwert des Duktilitätsmaßes $D_{s,mean}$ (unten rechts)	170
6.16	Übersicht zum Versuchsaufbau der experimentellen Dauerlastversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern Ansichten (links und rechts)	174
6.17	Übersicht zum Versuchsaufbau der experimentellen Dauerlastversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern Messpunkte der Holzfeuchtemessungen Versuchsreihe LaTr-BI	175
6.18	Verschiebungs-Zeit-Zusammenhänge der experimentellen Dauerlastversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe LaTr-BI Darstellung der zeitabhängigen Verschiebungen u_v (oben), Darstellung der zeitabhängigen Holzfeuchte u (mittig), Darstellung der zeitabhängigen klimatischen Randbedingungen (unten)	177
6.19	Verschiebungs-Zeit-Zusammenhänge der experimentellen Dauerlastversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe LaTr-Ke Darstellung der zeitabhängigen Verschiebungen u_v (oben), Darstellung der zeitabhängigen Holzfeuchte u (mittig), Darstellung der zeitabhängigen klimatischen Randbedingungen (unten)	178
6.20	Verschiebungs-Zeit-Zusammenhänge der experimentellen Dauerlastversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe LaTr-BI-Ke Darstellung der zeitabhängigen Verschiebungen u_v (oben), Darstellung der zeitabhängigen Holzfeuchte u (mittig), Darstellung der zeitabhängigen klimatischen Randbedingungen (unten)	179
6.21	Verschiebungs-Zeit- und Kriechzahl-Zeit-Zusammenhänge der experimentellen Dauerlastversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe LaTr-BI (oben), Versuchsreihe LaTr-Ke (mittig), Versuchsreihe LaTr-BI-Ke (unten)	180
6.22	Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe LaTr-BI Darstellung der hor. Verschiebungen u_h (links und rechts), Darstellung der vert. Verschiebungen u_v inkl. Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen (mittig)	188
6.23	Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe LaTr-Ke Darstellung der hor. Verschiebungen u_h (links und rechts), Darstellung der vert. Verschiebungen u_v inkl. Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen (mittig)	189

6.24	Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern Versuchsreihe LaTr-BI-Ke Darstellung der hor. Verschiebungen u_h (links und rechts), Darstellung der vert. Verschiebungen u_v inkl. Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen (mittig)	190
6.25	Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern Zusammenfassung der Versuchsreihen LaTr-BI, LaTr-Ke und LaTr-BI-Ke	191
6.26	Last-Verschiebungs-Zusammenhänge der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern Zusammenfassung der Versuchsreihen KuTr-BI, KuTr-Ke und KuTr-BI-Ke sowie LaTr-BI, LaTr-Ke und LaTr-BI-Ke	195
6.27	Vergleich der maßgebenden mechanischen Entitäten der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern unter Kurz- und Langzeitbeanspruchung Mittelwert der Höchstlast $F_{max,mean}$ (links), Mittelwert der Steigung k_{mean} (rechts)	196
7.1	Vergleich der maßgebenden mechanischen Entitäten der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern unter Kurz- und Langzeitbeanspruchung im Kontext literarischer und normativer Vergleichsbetrachtungen Versuchsreihen KuPu-BI und LaPu-BI mittlerer Verschiebungsmodul $K_{ser,mean}$ (oben links), charakteristische Schubtragfähigkeit $F_{vR,k}$ (oben rechts), Mittelwert des Duktilitätsmaßes $D_{s,mean}$ (unten)	201
7.2	Vergleich der maßgebenden mechanischen Entitäten der experimentellen Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern unter Kurz- und Langzeitbeanspruchung im Kontext literarischer und normativer Vergleichsbetrachtungen Versuchsreihen KuPu-Ke und LaPu-Ke bzw. KuPu-BI-Ke und LaPu-BI-Ke mittlerer Verschiebungsmodul $K_{ser,mean}$ (oben links), charakteristische Schubtragfähigkeit $F_{vR,k}$ (oben rechts), Mittelwert des Duktilitätsmaßes $D_{s,mean}$ (unten)	204
7.3	Vergleich der maßgebenden mechanischen Entitäten der experimentellen Dauerlastversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern unter Langzeitbeanspruchung im Kontext literarischer und normativer Vergleichsbetrachtungen Versuchsreihen LaPu-BI, LaPu-Ke und LaPu-BI-Ke Kriechzahl φ	208
7.4	Prinzip der baustatischen Modellbildung nach <i>Rautenstrauch</i> [65]	212
7.5	Vergleich der maßgebenden mechanischen Entitäten der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern unter Kurz- und Langzeitbeanspruchung im Kontext normativer Vergleichsbetrachtungen Experimentell und theoretisch nach γ -Verfahren bzw. nach Modellbildung nach <i>Rautenstrauch</i> [65] ermittelte Last-Verschiebungs-Zusammenhänge Versuchsreihen KuTr-BI und LaTr-BI (oben), KuTr-Ke und LaTr-Ke (mittig), KuTr-BI-Ke und LaTr-BI-Ke (unten)	214

7.6	Vergleich der maßgebenden mechanischen Entitäten der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern unter Kurz- und Langzeitbeanspruchung im Kontext normativer Vergleichsbetrachtungen Variantenstudie der theoretisch ermittelten Last-Verschiebungs-Zusammenhänge an den Versuchsreihen KuTr-BI und LaTr-BI Zusammenhänge nach γ -Verfahren (links), Zusammenhänge nach Modellbildung nach <i>Rautenstrauch</i> [65] (rechts)	216
7.7	Vergleich der maßgebenden mechanischen Entitäten der experimentellen Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern unter Kurz- und Langzeitbeanspruchung im Kontext normativer Vergleichsbetrachtungen Variantenstudie der theoretisch ermittelten Last-Verschiebungs-Zusammenhänge an den Versuchsreihen KuTr-BI-Ke und LaTr-BI-Ke Zusammenhänge nach γ -Verfahren	217
7.8	Vergleich der maßgebenden mechanischen Entitäten der experimentellen Dauerlastversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern unter Langzeitbeanspruchung im Kontext literarischer Vergleichsbetrachtungen Versuchsreihen LaTr-BI, LaTr-Ke und LaTr-BI-Ke Kriechzahl φ	220
7.9	Vergleich der maßgebenden mechanischen Entitäten der experimentellen Dauerlastversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern unter Langzeitbeanspruchung im Kontext normativer Vergleichsbetrachtungen Analytisch und normativ generierte zeitabhängige vertikale Verschiebungen $u_v(t)$ der Versuchsreihen LaTr-BI, LaTr-Ke und LaTr-BI-Ke Zeitpunkt $t = 7$ a (links), Zeitpunkt $t = 50$ a (rechts) . .	226

Anmerkung des Autors: Alle gemäß Abbildungsverzeichnis dargebrachten Abbildungen wurden durch den Autor selbst eigenständig erstellt.

Anhang A

Anhang | Stand der Forschung und Entwicklung

Typologie stiftförmige glattschaftige/profilierete VM - 90° | St-gp-90°

Nr.	K_{ser} [kN/mm]	CV K_{ser} [-]	F_{vR} [kN]	CV F_{vR} [-]	D_s [-]	n [-]	$f_{cm,Beton}$ [MPa]	E_{Holz} [MPa]	l_b [mm]	d [mm]	Typ
1	2.95	0.55	2.79	0.09	29.28	5	28.00	11000	35.00	3.40	VH
2	5.75	0.16	6.80	0.05	19.83	21	32.80	9000	80.00	8.00	BSH
3	7.60	0.27	11.30	0.10	16.48	21	37.72	9000	100.00	10.00	BSH
4	8.55	0.18	17.15	0.09	7.56	10	39.36	9000	120.00	10.00	BSH
5	5.58	0.12	15.83	0.05	7.88	10	36.90	9000	120.00	10.00	BSH

Typologie stiftförmige geschraubte VM - 90° | St-g-90°

Nr.	K_{ser} [kN/mm]	CV K_{ser} [-]	F_{vR} [kN]	CV F_{vR} [-]	D_s [-]	n [-]	$f_{cm,Beton}$ [MPa]	E_{Holz} [MPa]	l_b [mm]	d [mm]	Typ
1	14.70	0.67	10.90	0.08	14.83	10	36.60	11300	65.00	5.20	LVL
2	12.30	0.36	10.90	0.08	16.65	9	37.00	13746	65.00	5.20	LVL
3	16.10	0.67	23.80	0.08	13.06	3	25.10	12155	75.00	12.00	VH
4	19.20	0.29	28.60	0.08	25.10	6	30.70	12155	75.00	12.00	VH
5	5.19	0.07	23.90	0.04	5.87	3	25.10	12155	115.00	10.00	VH
6	2.12	0.21	16.60	0.09	11.24	3	30.10	11000	100.00	7.50	VH

Typologie stiftförmige geschraubte VM - 45° | St-g-45°

Nr.	K_{ser} [kN/mm]	CV K_{ser} [-]	F_{vR} [kN]	CV F_{vR} [-]	D_s [-]	n [-]	$f_{cm,Beton}$ [MPa]	E_{Holz} [MPa]	l_b [mm]	d [mm]	Typ
1	15.21	0.36	17.24	0.08	6.86	10	33.00	11500	128.00	8.00	BSH
2	11.21	0.25	11.86	0.12	5.44	10	33.00	11500	79.00	8.00	BSH
3	21.65	0.14	21.40	0.07	10.54	5	38.70	13800	130.00	8.00	LVL

Typologie Nagelplatten | Npl

Nr.	K_{ser} [kN/mm]	CV K_{ser} [-]	F_{vR} [kN]	CV F_{vR} [-]	D_s [-]	n [-]	$f_{cm,Beton}$ [MPa]	E_{Holz} [MPa]	l_b [mm]	d [mm]	Typ
1	18.71	0.26	20.11	0.09	33.76	5	24.60	11500	20.00	2.00	BSH
2	18.34	0.36	18.02	0.14	19.18	46	24.60	11000	20.00	2.00	VH
3	48.56	0.15	14.92	0.05	38.69	4	28.00	12500	8.00	2.00	BSH

Typologie Schubleche mit geschraubten VM - 90° | Bl-g-90°

Nr.	K_{ser} [kN/mm]	CV K_{ser} [-]	F_{vR} [kN]	CV F_{vR} [-]	D_s [-]	n [-]	$f_{cm,Beton}$ [MPa]	E_{Holz} [MPa]	l_b [mm]	d [mm]	Typ
1	16.13	0.32	58.02	0.07	8.46	3	33.46	13000	70.00	6.00	BSH
2	15.19	0.33	37.83	0.06	11.36	3	33.46	13000	70.00	6.00	BSH
3	20.56	0.38	34.74	0.05	12.26	3	33.46	13000	70.00	6.00	BSH
4	11.80	0.47	47.20	0.23	7.25	3	31.41	12200	140.00	6.00	BSH

Typologie Kerben ohne VM spröde | Ke-oVMs

Nr.	K_{ser} [kN/mm]	CV K_{ser} [-]	F_{vR} [kN]	CV F_{vR} [-]	D_s [-]	n [-]	$f_{cm,Beton}$ [MPa]	E_{Holz} [MPa]	l_n [mm]	h_n [mm]	l_v [mm]	Typ
1	239.38	0.29	47.38	0.20	1.54	3	25.10	12155	100.00	40.00	125.00	VH
2	76.54	0.06	53.58	0.05	1.00	3	23.94	10680	150.00	50.00	350.00	BSH
3	113.80	0.22	82.45	0.05	2.14	6	52.00	12000	150.00	25.00	250.00	BST
4	41.03	0.23	47.67	0.14	1.22	3	33.56	8940	200.00	20.00	250.00	BST
5	116.70	0.06	97.65	0.12	1.00	6	52.00	12000	150.00	40.00	250.00	BST
6	115.65	0.18	58.75	0.25	1.02	6	52.00	12000	150.00	25.00	150.00	BST

Typologie Kerven ohne VM duktil | Ke-oVMd

Nr.	K_{ser} [kN/mm]	CV K_{ser} [-]	F_{vR} [kN]	CV F_{vR} [-]	D_s [-]	n [-]	$f_{cm,Beton}$ [MPa]	E_{Holz} [MPa]	l_n [mm]	h_n [mm]	l_v [mm]	Typ
1	66.70	0.19	41.70	0.09	6.60	6	52.00	12000	150.00	10.00	250.00	BST
2	71.89	0.15	56.82	0.07	5.65	5	39.40	14867	175.00	20.00	250.00	BST
3	146.17	0.13	61.32	0.05	17.14	2	39.40	14867	200.00	20.00	250.00	BST
4	169.63	0.29	59.11	0.08	17.06	3	39.40	14867	200.00	20.00	250.00	BST
5	73.72	0.05	58.78	0.05	5.36	4	33.00	12600	200.00	20.00	250.00	BSH

Typologie Kerven mit stiftförmigen geschraubten VM - 90° | Ke-mVM

Nr.	K_{ser} [kN/mm]	CV K_{ser} [-]	F_{vR} [kN]	CV F_{vR} [-]	D_s [-]	n [n]	$f_{cm,Beton}$ [MPa]	E_{Holz} [MPa]	l_n [mm]	h_n [mm]	l_v [mm]	l_b [mm]	d [mm]	Typ
1	247.00	0.11	139.00	0.04	18.35	9	44.99	10700	300.00	60.00	253.00	100.00	16.00	FSH
2	83.13	0.05	73.61	0.09	2.68	3	23.53	10680	150.00	50.00	350.00	90.00	16.00	BSH
3	114.60	0.13	89.40	0.05	2.52	6	52.00	12000	150.00	25.00	250.00	80.00	8.00	BST
4	30.73	0.09	46.07	0.12	1.16	3	33.23	8940	200.00	20.00	250.00	50.00	16.00	BST
5	113.78	0.51	51.96	0.12	1.49	3	35.10	12900	150.00	50.00	150.00	80.00	16.00	BST

Anhang B

Anhang | Voruntersuchungen unter Kurzzeitbeanspruchung

Voruntersuchungen an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern

Probenbez.	F_{est} [kN]	u [-]	ρ [kg/m ³]	K_{ser} [kN/mm]	K_{ser}/VM [kN/mm]	F_{vR} [kN]	F_{vR}/VM [kN]
Beck-1r2-1	12	0.13	392.83	7.42	1.85	10.06	2.51
Beck-1r2-2	12	0.11	388.30	6.78	1.70	9.77	2.44
Beck-1r2-3	12	0.14	386.18	7.08	1.77	8.96	2.24
Beck-1r2-4	12	0.14	383.62	6.19	1.55	8.42	2.10
Beck-1r2-5	12	0.11	388.61	6.91	1.73	8.38	2.09
Beck-2rd2-1	12	0.14	398.68	9.78	2.45	9.52	2.38
Beck-2rd2-2	12	0.13	384.99	12.31	3.08	10.82	2.71
Beck-2rd2-3	12	0.14	391.19	11.89	2.97	8.33	2.08
Beck-2rd2-4	12	0.14	398.09	9.69	2.42	10.28	2.57
Beck-2rd2-5	12	0.14	393.25	8.85	2.21	8.47	2.12
Beck-2rd5-1	35	0.14	429.06	21.28	2.13	24.20	2.42
Beck-2rd5-2	35	0.13	407.86	23.92	2.39	25.07	2.51
Beck-2rd5-3	35	0.13	441.02	27.68	2.77	23.65	2.36
Beck-2rd5-4	35	0.14	443.66	19.94	1.99	21.75	2.17
Beck-2rd5-5	35	0.15	447.87	33.20	3.32	25.19	2.52
Beck-2rd5-6	35	0.13	519.45	25.69	2.57	24.83	2.48
Beck-2rd5-7	35	0.13	454.08	23.95	2.40	24.51	2.45
Beck-2rd5-8	30	0.14	397.73	18.28	1.83	23.22	2.32
Beck-2rd5-9	30	0.15	386.21	19.75	1.97	21.80	2.18
Beck-2rd5-10	30	0.14	423.25	18.79	1.88	20.84	2.08
Beck-2rd5-11	30	0.13	397.62	18.71	1.87	24.45	2.44
Beck-2rd5-12	30	0.15	385.94	24.13	2.41	25.09	2.51
Beck-1r5-1	25	0.14	396.19	16.31	1.63	21.47	2.15
Beck-1r5-2	25	0.14	401.78	16.67	1.67	22.07	2.21
Beck-1r5-3	25	0.14	404.90	16.92	1.69	22.71	2.27
Beck-1r5-4	30	0.13	391.40	23.39	2.34	26.33	2.63
Beck-1r5-5	30	0.14	422.95	23.09	2.31	24.95	2.49
ITW-1r5-1	25	0.12	411.85	34.14	3.41	25.92	2.59
ITW-1r5-2	25	0.13	442.69	28.63	2.86	23.73	2.37
ITW-1r5-3	5	0.12	420.73	36.81	3.68	23.04	2.30
ITW-1r5-4	25	0.13	405.69	23.62	2.36	23.68	2.37
ITW-1r5-5	25	0.13	495.61	26.16	2.62	25.44	2.54
TJEP-1r5-1	30	0.13	560.12	38.43	3.84	39.48	3.95
TJEP-1r5-2	40	0.13	496.50	20.63	2.06	34.29	3.43
TJEP-1r5-3	40	0.15	425.46	26.03	2.60	32.60	3.26
TJEP-1r5-4	40	0.15	418.06	21.25	2.13	31.38	3.14
TJEP-1r5-5	40	0.14	421.17	25.95	2.59	34.30	3.43

Anhang C

Anhang | Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten unter Kurzzeitbeanspruchung

Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Betonproben

Probenbez.	f_c [MPa]	ρ [g/cm ³]	f_{cm} [MPa]	Krit. 1	Krit. 1 erfüllt	Krit. 2	Krit. 2 erfüllt
Ch1-KuMa-Be-1	34.84	2.35					
Ch1-KuMa-Be-2	35.35	2.33	35.36	$f_{cm} \geq f_{ck} + 1$	Ja	$f_{ci} \geq f_{ck} - 4$	Ja
Ch1-KuMa-Be-3	35.90	2.33					
Ch2-KuMa-Be-1	37.34	2.42					
Ch2-KuMa-Be-2	37.21	2.42					
Ch2-KuMa-Be-3	34.51	2.39	37.05	$f_{cm} \geq f_{ck} + 2$	Ja	$f_{ci} \geq f_{ck} - 4$	Ja
Ch2-KuMa-Be-4	37.96	2.38					
Ch2-KuMa-Be-5	38.69	2.38					
Ch2-KuMa-Be-6	36.59	2.41					
Ch3-KuMa-Be-1	39.56	2.45					
Ch3-KuMa-Be-2	34.91	2.42					
Ch3-KuMa-Be-3	37.42	2.47	37.71	$f_{cm} \geq f_{ck} + 2$	Ja	$f_{ci} \geq f_{ck} - 4$	Ja
Ch3-KuMa-Be-4	38.34	2.42					
Ch3-KuMa-Be-5	37.65	2.44					
Ch3-KuMa-Be-6	38.36	2.37					
Ch4-KuMa-Be-1	40.03	2.40					
Ch4-KuMa-Be-2	36.81	2.40	37.94	$f_{cm} \geq f_{ck} + 1$	Ja	$f_{ci} \geq f_{ck} - 4$	Ja
Ch4-KuMa-Be-3	36.99	2.41					

Untersuchungen an großmaßstäblichen Holzproben

Probenbez.	E_0 [MPa]	ρ [kg/m ³]	u [-]
KuMa-Ho-1	12341	454	0.11
KuMa-Ho-2	11811	385	0.11
KuMa-Ho-3	10287	406	0.11
KuMa-Ho-4	8800	497	0.10
KuMa-Ho-5	8913	472	0.11
KuMa-Ho-6	13243	455	0.10
KuMa-Ho-7	12665	361	0.11
KuMa-Ho-8	11963	500	0.11
KuMa-Ho-9	10730	438	0.11
KuMa-Ho-10	10493	512	0.10
KuMa-Ho-11	13122	486	0.11
KuMa-Ho-12	10496	452	0.11
KuMa-Ho-13	12005	443	0.10
KuMa-Ho-14	12497	416	0.11
KuMa-Ho-15	10637	445	0.10
KuMa-Ho-16	12015	429	0.11
KuMa-Ho-17	11535	432	0.11
KuMa-Ho-18	11476	413	0.10

KuMa-Ho-19	10916	400	0.10
KuMa-Ho-20	10745	444	0.11
KuMa-Ho-21	10648	443	0.11
KuMa-Ho-22	10580	513	0.10
KuMa-Ho-23	15417	457	0.10
KuMa-Ho-24	8841	423	0.10
KuMa-Ho-25	11451	408	0.11
KuMa-Ho-26	8967	386	0.10
KuMa-Ho-27	9134	334	0.10
KuMa-Ho-28	12410	498	0.10
KuMa-Ho-29	9963	394	0.10
KuMa-Ho-30	10477	462	0.10
KuMa-Ho-31	10332	421	0.10
KuMa-Ho-32	9843	417	0.10
KuMa-Ho-33	10027	411	0.10
KuMa-Ho-34	11154	428	0.11
KuMa-Ho-35	10955	392	0.11
KuMa-Ho-36	10525	434	0.10
KuMa-Ho-37	12215	384	0.10
KuMa-Ho-38	12294	374	0.11
KuMa-Ho-39	13828	481	0.11
KuMa-Ho-40	10886	426	0.10
KuMa-Ho-41	10822	474	0.11
KuMa-Ho-42	14353	541	0.10
KuMa-Ho-43	9419	408	0.11
KuMa-Ho-44	13193	426	0.11
KuMa-Ho-45	11035	435	0.11
KuMa-Ho-46	10897	427	0.11
KuMa-Ho-47	11730	409	0.10
KuMa-Ho-48	10007	424	0.10
KuMa-Ho-49	7303	356	0.11
KuMa-Ho-50	11715	450	0.10
KuMa-Ho-51	12357	503	0.11
KuMa-Ho-52	13594	478	0.11
KuMa-Ho-53	8721	348	0.11
KuMa-Ho-54	12283	433	0.11
KuMa-Ho-55	10777	476	0.11
KuMa-Ho-56	8788	337	0.11
KuMa-Ho-57	8331	409	0.10
KuMa-Ho-58	10785	408	0.11
KuMa-Ho-59	11028	449	0.11
KuMa-Ho-60	10588	411	0.10
KuMa-Ho-61	12403	440	0.10
KuMa-Ho-62	12119	390	0.18
KuMa-Ho-63	14678	504	0.17
KuMa-Ho-64	13387	453	0.14
KuMa-Ho-65	14180	457	0.15
KuMa-Ho-66	16033	516	0.16

KuMa-Ho-67	13909	439	0.16
KuMa-Ho-68	11165	371	0.15
KuMa-Ho-69	9019	427	0.16
KuMa-Ho-70	11280	407	0.15

Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern

Probenbez.	F_{est} [kN]	u [-]	K_{ser} [kN/mm]	F_{vR} [kN]	Schädigungs- bzw. Versagensmechanismus
KuPu-BI-1	55	0.15	50.14	43.65	LH+PN beidseitig
KuPu-BI-2	100	0.13	70.35	45.30	LH+PN beidseitig
KuPu-BI-3	55	0.13	31.19	36.90	LH+PN beidseitig
KuPu-BI-4	55	0.12	40.62	42.46	LH+PN beidseitig
KuPu-BI-5	55	0.14	54.37	39.10	LH+PN beidseitig
KuPu-BI-6	55	0.13	54.90	43.74	LH+PN beidseitig
KuPu-BI-7	70	0.13	44.28	45.90	LH+PN beidseitig
KuPu-BI-8	100	0.15	56.01	43.70	LH+PN beidseitig
KuPu-BI-9	55	0.15	59.23	40.65	LH+PN beidseitig
KuPu-BI-10	55	0.08	39.68	48.38	LH+PN beidseitig
KuPu-BI-11	55	0.09	33.84	46.30	LH+PN beidseitig
KuPu-BI-12	55	0.09	33.20	45.91	LH+PN beidseitig
KuPu-Ke-1	200	0.11	215.32	235.40	SBK beidseitig
KuPu-Ke-2	200	0.11	228.37	247.90	SBK beidseitig
KuPu-Ke-3	200	0.11	245.17	240.90	SBK einseitig
KuPu-Ke-4	200	0.11	223.44	222.90	SBK einseitig
KuPu-Ke-5	120	0.13	312.91	183.10	SBK beidseitig
KuPu-Ke-6	200	0.12	449.11	188.30	SBK beidseitig
KuPu-Ke-7	120	0.13	417.00	187.40	SBK beidseitig
KuPu-Ke-8	120	0.16	339.66	214.60	SBK einseitig
KuPu-Ke-9	120	0.13	282.67	212.80	SBK einseitig
KuPu-Ke-10	120	0.14	432.64	173.40	SBK einseitig
KuPu-Ke-11	120	0.13	419.39	191.80	SBK einseitig
KuPu-Ke-12	120	0.13	473.28	197.50	SBK einseitig
KuPu-BI-Ke-1	250	0.15	252.48	249.80	LH+PN+SBK einseitig
KuPu-BI-Ke-2	250	0.13	267.41	300.90	LH+PN+SBK einseitig
KuPu-BI-Ke-3	250	0.15	314.55	302.20	LH+PN+SBK beidseitig
KuPu-BI-Ke-4	250	0.14	255.71	307.90	LH+PN+SBK beidseitig
KuPu-BI-Ke-5	250	0.15	423.73	259.80	LH+PN+SBK beidseitig
KuPu-BI-Ke-6	250	0.14	661.91	253.90	LH+PN+SBK einseitig
KuPu-BI-Ke-7	120	0.13	274.83	286.10	LH+PN+SBK einseitig
KuPu-BI-Ke-8	120	0.12	269.74	273.00	LH+PN+SBK beidseitig
KuPu-BI-Ke-9	120	0.12	602.01	255.50	LH+PN+SBK beidseitig
KuPu-BI-Ke-10	120	0.13	298.59	223.70	LH+PN+SBK beidseitig
KuPu-BI-Ke-11	120	0.13	442.68	235.10	LH+PN+SBK einseitig
KuPu-BI-Ke-12	120	0.14	256.89	247.40	LH+PN+SBK einseitig

Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern

Probenbez.	F_{est} [kN]	u [-]	F_{max} [kN]	$u_{v,l/2mi}(F_{max})$ [mm]	$u_{v,l/3li}(F_{max})$ [mm]	$u_{v,l/3re}(F_{max})$ [mm]
KuTr-BI-1	25	0.09	39.50	123.00	114.31	113.17
KuTr-BI-2	35	0.10	46.60	147.03	137.20	136.36
KuTr-BI-3	35	0.09	41.40	142.39	129.80	132.66
KuTr-Ke-1	25	0.10	23.00	31.46	27.37	26.64
KuTr-Ke-2	25	0.10	22.00	36.41	31.73	30.60
KuTr-Ke-3	25	0.10	20.40	43.43	37.03	37.61
KuTr-BI-Ke-1	55	0.10	41.80	116.69	100.14	118.81
KuTr-BI-Ke-2	40	0.14	44.60	54.10	51.07	48.15
KuTr-BI-Ke-3	40	0.10	51.20	108.22	103.31	90.31

Numerische Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern -

- Reibungskoeffizienten in den Kontaktbereichen

Kontaktbereich	μ [-]
Holz-Beton	0.57
Holz-Puzzle Strip Schublech	0.40
Holz-ballistische Glattschaftnägel	1.30

Numerische Untersuchungen an klein- und großmaßstäblichen Verbundprobekörpern -

- Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften des Holzes

Festigkeitseigenschaft	Wert [MPa]	Steifigkeitseigenschaft	Wert [MPa] bzw. [-]
$f_{m,k}$	24.00	E_L	11300
$f_{t,0,k}$	14.50	E_R	881.40
$f_{t,90,k}$	1.59	E_T	485.90
$f_{c,0,k}$	21.00	G_{LR}	723.20
$f_{c,90,k}$	2.50	G_{LT}	689.30
$f_{v,k}$	5.38	G_{RT}	33.90
$f_{R,k}$	1.20	ν_{LR}	0.372
		ν_{LT}	0.467
		ν_{RT}	0.435

Numerische Untersuchungen an klein- und großmaßstäblichen Verbundprobekörpern -

- Parameter der Abaqus FEA Funktion `Plastic - Potential` des Holzes

Parameter	Wert [-]	Parameter	Wert [-]
R_{11}	1.00	R_{12}	0.33
R_{22}	0.12	R_{13}	0.33
R_{33}	0.12	R_{23}	0.33

Numerische Untersuchungen an klein- und großmaßstäblichen Verbundprobekörpern -

- Steifigkeitseigenschaften des Betons

Steifigkeitseigenschaft	Wert [MPa] bzw. [-]
E_{Beton}	$32611 \left(= 22 \cdot \frac{f_{cm}}{10}^{0.3} \cdot 10^3 \right)$
ν_{Beton}	0.20

Numerische Untersuchungen an klein- und großmaßstäblichen Verbundprobekörpern -

- Parameter der Abaqus FEA Funktion `Concrete Damaged Plasticity` des Betons

Parameter	Wert [°] bzw. [-]	Parameter	Wert [-]
ψ	31.00	K	0.67
ε	0.10	ν	0.001
f	1.16		

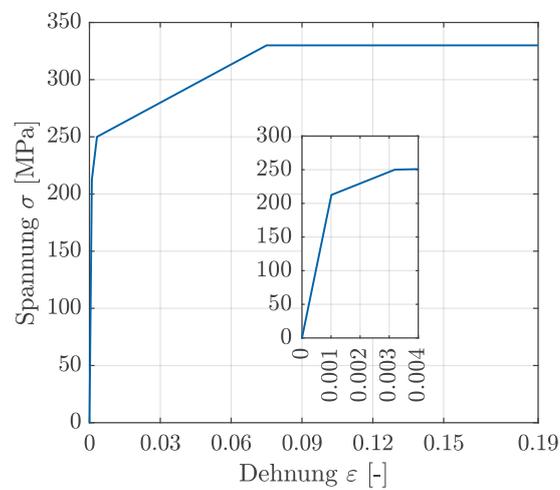
Numerische Untersuchungen an klein- und großmaßstäblichen Verbundprobekörpern -

- Steifigkeitseigenschaften des Puzzle Strip Schublechs

Steifigkeitseigenschaft	Wert [MPa] bzw. [-]
E_{PSS}	210000
ν_{PSS}	0.30

Numerische Untersuchungen an klein- und großmaßstäblichen Verbundprobekörpern -

- Multi-linearer Spannungs-Dehnungs-Zusammenhang des Puzzle Strip Schublechs



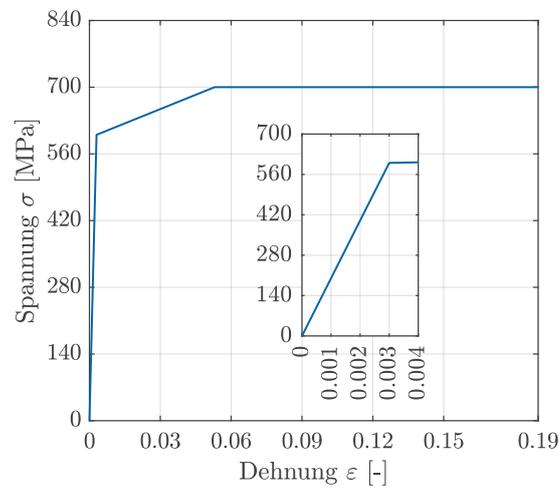
Numerische Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern -

- Steifigkeitseigenschaften der ballistischen Glattschaftnägel

Steifigkeitseigenschaft	Wert [MPa] bzw. [-]
E_{VM}	200000
ν_{VM}	0.30

Numerische Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern -

- Multi-linearer Spannungs-Dehnungs-Zusammenhang der ballistischen Glattschaftnägel



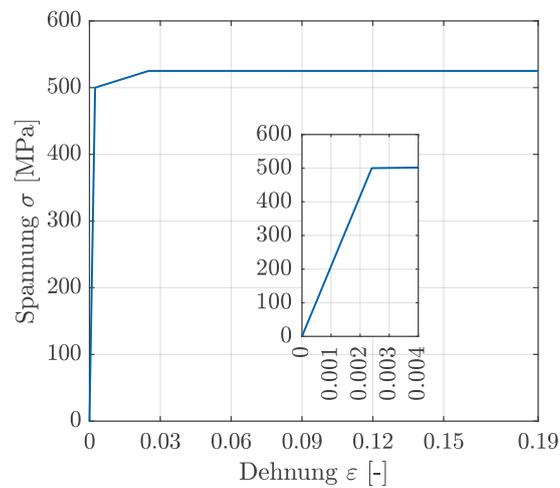
Numerische Untersuchungen an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern -

- Steifigkeitseigenschaften der Flächenbewehrung

Steifigkeitseigenschaft	Wert [MPa] bzw. [-]
$E_{Bewehrung}$	210000
$\nu_{Bewehrung}$	0.30

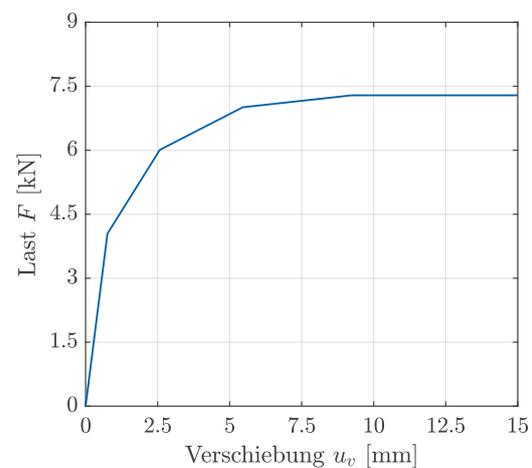
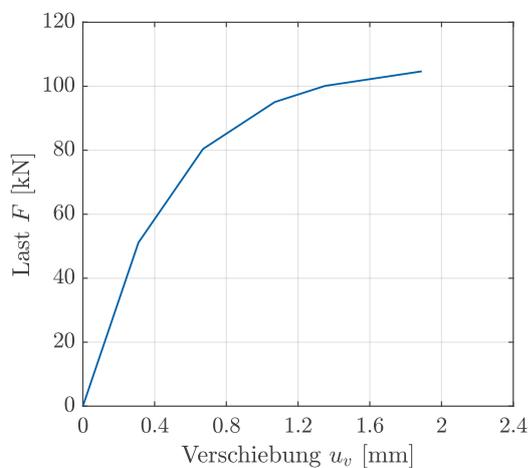
Numerische Untersuchungen an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern -

- Multi-linearer Spannungs-Dehnungs-Zusammenhang der Flächenbewehrung



Numerische Untersuchungen an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern -

- Multi-linearer Last-Verschiebungs-Zusammenhang eines Schubverbinders in Form einer einzelnen Kerne (links)
- Multi-linearer Last-Verschiebungs-Zusammenhang eines Schubverbinders in Form der ballistischen Glattschaftnägeln für einen Einflussbereich von 10 cm (rechts)



Anhang D

Anhang | Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten unter Langzeitbeanspruchung

Untersuchungen an kleinmaßstäblichen Betonproben

Probenbez.	t [d]	$f_c(t)$ [MPa]	ρ [g/cm ³]	$f_{cm}(t)$ [MPa]
Ch2-LaMa-Be-1	67	37.89	2.42	42.34
Ch2-LaMa-Be-2	67	41.84	2.39	
Ch2-LaMa-Be-3	67	40.06	2.40	
Ch2-LaMa-Be-4	67	44.24	2.40	
Ch2-LaMa-Be-5	67	44.59	2.40	
Ch2-LaMa-Be-6	67	45.43	2.39	
Ch2-LaMa-Be-7	167	45.21	2.38	44.16
Ch2-LaMa-Be-8	167	41.59	2.38	
Ch2-LaMa-Be-9	167	42.14	2.41	
Ch2-LaMa-Be-10	167	44.14	2.40	
Ch2-LaMa-Be-11	167	46.54	2.42	
Ch2-LaMa-Be-12	167	45.33	2.37	
Ch2-LaMa-Be-13	331	46.39	2.39	45.12
Ch2-LaMa-Be-14	331	45.99	2.40	
Ch2-LaMa-Be-15	331	44.56	2.40	
Ch2-LaMa-Be-16	331	43.12	2.43	
Ch2-LaMa-Be-17	331	44.98	2.37	
Ch2-LaMa-Be-18	331	45.70	2.37	
Ch2-LaMa-Be-19	455	45.19	2.41	45.76
Ch2-LaMa-Be-20	455	42.88	2.41	
Ch2-LaMa-Be-21	455	43.06	2.43	
Ch2-LaMa-Be-22	455	50.65	2.38	
Ch2-LaMa-Be-23	455	47.79	2.43	
Ch2-LaMa-Be-24	455	45.01	2.40	

Dauerlastversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern - Spannkraftverlauf der Versuchsreihe LaPu-BI

t [d]		LaPu-BI-1 [kN]		LaPu-BI-2 [kN]		LaPu-BI-3 [kN]		LaPu-BI-4 [kN]	
0	Vorgespannt auf	13.20		13.06		13.28		13.08	
18	Spannkraftänderung auf	12.35	-6.45%	12.21	-6.48%	12.50	-5.87%	12.31	-5.92%
18	Vorgespannt auf	13.11		13.05		13.20		13.01	
39	Spannkraftänderung auf	12.31	-6.14%	12.40	-4.98%	12.59	-4.66%	12.19	-6.28%
39	Vorgespannt auf	13.34		13.11		13.15		13.34	
68	Spannkraftänderung auf	12.56	-5.84%	12.50	-4.66%	12.61	-4.05%	12.53	-6.05%
68	Vorgespannt auf	13.06		13.01		13.02		13.00	
97	Spannkraftänderung auf	12.58	-3.65%	12.60	-3.19%	12.66	-2.80%	12.51	-3.75%
97	Vorgespannt auf	13.06		13.01		13.11		13.14	
118	Spannkraftänderung auf	12.76	-2.27%	12.79	-1.68%	12.86	-1.92%	12.79	-2.64%
118	Vorgespannt auf	13.10		13.02		13.18		13.03	
132	Spannkraftänderung auf	12.88	-1.64%	12.89	-1.03%	12.82	-2.76%	12.62	-3.18%
132	Vorgespannt auf	13.04		13.03		13.17		13.04	
176	Spannkraftänderung auf	12.92	-0.95%	12.97	-0.52%	12.88	-2.21%	12.85	-1.49%
176	Vorgespannt auf	13.08		13.00		13.04		12.98	
197	Spannkraftänderung auf	12.18	-6.86%	12.13	-6.72%	12.18	-6.62%	12.18	-6.13%
197	Vorgespannt auf	13.13		13.02		13.04		13.05	
230	Spannkraftänderung auf	12.24	-6.79%	12.23	-6.11%	12.28	-5.80%	12.19	-6.57%
230	Vorgespannt auf	13.02		13.03		13.04		13.10	
267	Spannkraftänderung auf	13.71	+5.29%	13.77	+5.67%	13.59	+4.25%	13.62	+3.98%
267	Vorgespannt auf	12.95		12.98		12.92		12.99	
280	Spannkraftänderung auf	13.28	+2.55%	13.36	+2.93%	13.21	+2.30%	13.37	+2.93%
280	Vorgespannt auf	12.97		12.96		13.05		12.95	
308	Spannkraftänderung auf	12.19	-6.00%	12.32	-4.97%	12.18	-6.66%	12.27	-5.24%
308	Vorgespannt auf	12.97		13.05		12.99		13.12	
336	Spannkraftänderung auf	13.87	+6.95%	13.98	+7.08%	13.84	+6.56%	13.91	+6.02%
336	Vorgespannt auf	13.87		13.98		13.84		13.91	
365	Spannkraftänderung auf	13.30	-4.09%	13.35	-4.52%	13.46	-2.75%	13.29	-4.45%

Dauerlastversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern - Spannkraftverlauf der Versuchsreihe LaPu-Ke

t [d]		LaPu-Ke-1 [kN]		LaPu-Ke-2 [kN]		LaPu-Ke-3 [kN]		LaPu-Ke-4 [kN]	
0	Vorgespannt auf	62.43		62.32		62.23		62.29	
18	Spannkraftänderung auf	60.63	-2.88%	60.74	-2.53%	60.56	-2.68%	60.29	-3.21%
18	Vorgespannt auf	62.22		62.39		62.41		62.11	
39	Spannkraftänderung auf	60.59	-2.61%	60.71	-2.70%	60.36	-3.28%	60.54	-2.53%
39	Vorgespannt auf	62.06		62.06		62.34		62.43	
68	Spannkraftänderung auf	60.77	-2.08%	60.77	-2.08%	60.79	-2.49%	60.88	-2.48%
68	Vorgespannt auf	62.26		62.17		62.17		62.43	
97	Spannkraftänderung auf	61.34	-1.48%	61.31	-1.39%	61.17	-1.62%	61.17	-2.02%
97	Vorgespannt auf	62.40		62.03		62.06		62.00	
118	Spannkraftänderung auf	61.89	-0.83%	61.57	-0.74%	61.40	-1.06%	61.45	-0.88%
118	Vorgespannt auf	62.00		62.11		62.23		62.06	
132	Spannkraftänderung auf	64.24	+3.61%	63.35	+1.99%	63.89	+2.68%	63.89	+2.96%
132	Vorgespannt auf	62.03		62.14		62.00		62.03	
176	Spannkraftänderung auf	62.17	+0.23%	61.17	-1.57%	61.86	-0.23%	62.49	+0.74%
176	Vorgespannt auf	62.17		62.14		62.00		62.00	
197	Spannkraftänderung auf	58.79	-5.45%	58.96	-5.13%	57.87	-6.67%	58.38	-5.83%
197	Vorgespannt auf	62.00		62.20		62.29		62.26	
230	Spannkraftänderung auf	59.33	-4.31%	59.93	-3.65%	59.27	-4.84%	59.65	-4.20%
230	Vorgespannt auf	62.43		62.03		62.09		62.14	
267	Spannkraftänderung auf	65.10	+4.28%	64.33	+3.70%	64.96	+4.62%	64.58	+3.93%
267	Vorgespannt auf	61.43		61.94		61.97		61.86	
280	Spannkraftänderung auf	62.43	+1.64%	62.52	+0.93%	62.92	+1.53%	62.80	+1.53%
280	Vorgespannt auf	61.86		61.91		61.97		61.97	
308	Spannkraftänderung auf	57.38	-7.24%	58.04	-6.26%	57.24	-7.64%	57.81	-6.72%
308	Vorgespannt auf	61.86		62.11		61.97		62.09	
336	Spannkraftänderung auf	65.59	+6.03%	65.07	+4.76%	65.88	+6.30%	65.53	+5.55%
336	Vorgespannt auf	65.59		65.07		65.88		65.53	
365	Spannkraftänderung auf	62.06	-5.38%	62.09	-4.59%	62.09	-5.75%	62.40	-4.77%

Dauerlastversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern - Spannkraftverlauf der Versuchsreihe LaPu-BI-Ke

t [d]		LaPu-BI-Ke-1 [kN]		LaPu-BI-Ke-2 [kN]		LaPu-BI-Ke-3 [kN]		LaPu-BI-Ke-4 [kN]	
0	Vorgespannt auf	80.41		80.68		80.55		80.68	
18	Spannkraftänderung auf	78.12	-2.85%	77.99	-3.34%	78.28	-2.81%	77.85	-3.51%
18	Vorgespannt auf	80.14		80.27		80.05		80.36	
39	Spannkraftänderung auf	77.86	-2.84%	78.64	-2.04%	78.41	-2.05%	79.14	-1.52%
39	Vorgespannt auf	80.23		80.05		80.41		80.27	
68	Spannkraftänderung auf	78.36	-2.32%	78.41	-2.04%	78.73	-2.09%	79.05	-1.53%
68	Vorgespannt auf	80.14		80.00		80.27		80.14	
97	Spannkraftänderung auf	79.09	-1.30%	78.95	-1.31%	79.27	-1.25%	79.41	-0.91%
97	Vorgespannt auf	80.00		80.00		80.14		80.05	
118	Spannkraftänderung auf	79.32	-0.85%	79.32	-0.85%	79.50	-0.79%	79.50	-0.68%
118	Vorgespannt auf	80.00		80.00		80.27		80.09	
132	Spannkraftänderung auf	81.68	+2.10%	82.09	+2.61%	82.18	+2.38%	81.73	+2.04%
132	Vorgespannt auf	80.00		80.09		79.91		80.05	
176	Spannkraftänderung auf	80.55	+0.68%	81.82	+2.16%	81.55	+2.05%	80.68	+0.80%
176	Vorgespannt auf	79.91		79.73		79.95		79.91	
197	Spannkraftänderung auf	74.95	-6.20%	75.91	-4.79%	76.18	-4.72%	76.14	-4.72%
197	Vorgespannt auf	80.27		80.18		80.23		80.36	
230	Spannkraftänderung auf	76.27	-4.98%	76.50	-4.59%	76.91	-4.14%	77.09	-4.07%
230	Vorgespannt auf	80.23		80.27		80.14		80.27	
267	Spannkraftänderung auf	83.09	+3.57%	83.36	+3.85%	82.73	+3.23%	83.18	+3.62%
267	Vorgespannt auf	79.86		79.73		79.91		79.82	
280	Spannkraftänderung auf	80.91	+1.31%	80.68	+1.20%	81.09	+1.48%	80.68	+1.08%
280	Vorgespannt auf	79.86		80.00		79.77		79.82	
308	Spannkraftänderung auf	73.91	-7.46%	74.73	-6.59%	74.95	-6.04%	74.91	-6.15%
308	Vorgespannt auf	80.05		79.91		80.05		80.14	
336	Spannkraftänderung auf	84.68	+5.79%	84.32	+5.52%	84.09	+5.05%	84.27	+5.16%
336	Vorgespannt auf	84.68		84.32		84.09		84.27	
365	Spannkraftänderung auf	80.18	-5.31%	80.45	-4.58%	80.36	-4.43%	80.41	-4.58%

Bruchversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern

Probenbez.	F_{est} [kN]	u [-]	K_{ser} [kN/mm]	F_{vR} [kN]	Schädigungs- bzw. Versagensmechanismus
LaPu-BI-1	33	0.09	34.85	44.50	LH+PN beidseitig
LaPu-BI-2	33	0.10	44.77	45.00	LH+PN beidseitig
LaPu-BI-3	33	0.10	57.54	46.30	LH+PN beidseitig
LaPu-BI-4	33	0.10	31.17	42.90	LH+PN beidseitig
LaPu-Ke-1	120	0.09	349.11	276.40	SBK beidseitig
LaPu-Ke-2	120	0.10	367.82	229.30	SBK einseitig
LaPu-Ke-3	120	0.10	420.96	318.50	SBK beidseitig
LaPu-Ke-4	120	0.10	350.96	233.00	SBK einseitig
LaPu-BI-Ke-1	120	0.10	251.18	272.90	LH+PN+SBK einseitig
LaPu-BI-Ke-2	120	0.10	399.06	359.20	LH+PN+SBK einseitig
LaPu-BI-Ke-3	120	0.09	687.79	339.40	LH+PN+SBK beidseitig
LaPu-BI-Ke-4	120	0.10	365.24	361.20	LH+PN+SBK einseitig

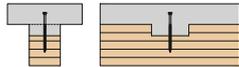
Bruchversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern

Probenbez.	F_{est} [kN]	u [-]	F_{max} [kN]	$u_{v,l/2mi}(F_{max})$ [mm]	$u_{v,l/3li}(F_{max})$ [mm]	$u_{v,l/3re}(F_{max})$ [mm]
LaTr-BI-1	35	0.10	47.35	147.60	136.52	136.50
LaTr-BI-2	35	0.10	43.06	144.19	133.63	132.84
LaTr-BI-3	35	0.10	38.08	127.42	114.07	119.19
LaTr-BI-4	35	0.10	48.57	144.51	134.79	134.86
LaTr-Ke-1	25	0.11	30.40	35.79	32.00	29.54
LaTr-Ke-2	25	0.10	24.30	28.50	24.77	23.83
LaTr-Ke-3	25	0.11	28.20	29.75	25.88	25.89
LaTr-Ke-4	25	0.11	27.90	39.45	35.54	34.18
LaTr-BI-Ke-1	25	0.10	52.80	115.62	94.43	112.84
LaTr-BI-Ke-2	25	0.10	58.00	124.99	118.41	102.54
LaTr-BI-Ke-3	25	0.10	63.20	61.42	53.83	53.22
LaTr-BI-Ke-4	25	0.09	61.80	78.83	73.07	65.34

Anhang E

Anhang | Versuchsergebnisse im Kontext literarischer und normativer Vergleichsbetrachtungen

Dauerlastversuche an kleinmaßstäblichen Verbundprobekörpern

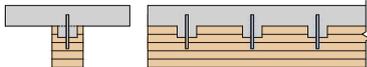
Bezeichnung	Quellenbez. bzw. Quelle	Prinzipiskizze
Ke-mVM-6	Notch-screw connection [64]	

$f_{cm,Beton}$ [MPa]	E_{Holz} [MPa]	l_n [mm]	h_n [mm]	l_v [mm]	Typ	φ [-]
42.80	12863	150.00	50.00	150.00	BSH	2.97

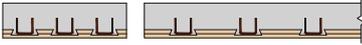
Dauerlastversuche an großmaßstäblichen Verbundprobekörpern

Bezeichnung	Quellenbez. bzw. Quelle	Prinzipiskizze
Npl-4	NAG [66]	

l [m]	$f_{cm,Beton}$ [MPa]	E_{Holz} [MPa]	l_v [mm]	l_s [mm]	Typ	φ [-]
5.40	28.50	12300	17.00	274.00	BSH	2.61

Bezeichnung	Quellenbez. bzw. Quelle	Prinzipiskizze
Ke-mVM-7	N+S [66]	

l [m]	$f_{cm,Beton}$ [MPa]	E_{Holz} [MPa]	d_n [mm]	h_n [mm]	l_v [mm]	l_s [mm]	l_b [mm]	d [mm]	Typ	φ [-]
5.40	28.50	10650	70.00	30.00	115.00	230.00	80.00	20.00	BSH	2.84

Bezeichnung	Quellenbez. bzw. Quelle	Prinzipiskizze
Ke-oVM-Bew-1	NPL [66]	

l [m]	$f_{cm,Beton}$ [MPa]	E_{Holz} [MPa]	d_n [mm]	h_n [mm]	l_v [mm]	l_s [mm]	Typ	φ [-]
4.50	28.50	10900	115.00/125.00	15.00	92.50	135.00	FSH	2.13
