



Bundesinstitut  
für Bau-, Stadt- und  
Raumforschung

im Bundesamt für Bauwesen  
und Raumordnung



BBSR-  
Online-Publikation  
34/2024

# Holzkeildolle als Reparaturverbindung. Teil 1: Forschungsbericht

von

Dr. Elena Perria  
Prof. Dr. Mike Sieder  
Svenja Siegert  
Cordula Reulecke

# **Holzkeildolle als Reparaturverbindung.**

## **Teil 1: Forschungsbericht**

**Einsatz der Holzkeildolle als Möglichkeit neuer Reparaturverbindungen für die Denkmalschutzanforderungen des schonenden Substanzumgangs und der Materialgerechtigkeit**

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wohnen, Stadtentwicklung  
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**ZUKUNFT BAU**  
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-18.16

Projektlaufzeit: 01.2019 bis 03.2021

## IMPRESSUM

### **Herausgeber**

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)  
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)  
Deichmanns Aue 31–37  
53179 Bonn

### **Fachbetreuer**

Dr.-Ing. Michael Brüggemann, Brüggemann Kisseler Ingenieure  
im Auftrag des BBSR, Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“  
zb@bbr.bund.de

### **Autorinnen und Autoren**

Technische Universität Braunschweig  
IBHolz – Institut für Baukonstruktion und Holzbau  
Dr.-Ing. Elena Perria (Projektleitung und -bearbeitung)  
e.perria@tu-braunschweig.de

Prof. Dr.-Ing. Mike Sieder (Projektleitung)  
m.sieder@tu-braunschweig.de

IGP Gockel PartGmbH – Ingenieure und Architektin  
Dipl.-Ing. Svenja Siegert  
siegert.svenja@gockel-ingenieure.de

Niedersächsisches Landesamt für Denkmalpflege  
Regionalreferat Braunschweig  
Dipl.-Ing. Cordula Reulecke

Weitere Mitwirkende siehe S. 221

### **Redaktion**

Dr.-Ing. Elena Perria

### **Stand**

Juni 2025

### **Gestaltung**

Dr.-Ing. Elena Perria

### **Bildnachweis**

Titelbild: Dr.-Ing. Elena Perria  
Alle weiteren Foto- und Bildnachweise siehe Abbildungsverzeichnis, S. 213.

### **Vervielfältigung**

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

### **Zitierweise**

Perria, E.; Sieder, M.; Siegert, S.; Reulecke, C., 2024: Holzkeildolle als Reparaturverbindung. Teil 1: Forschungsbericht: Einsatz der Holzkeildolle als Möglichkeit neuer Reparaturverbindungen für die Denkmalschutzanforderungen des schonenden Substanzumgangs und der Materialgerechtigkeit. BBSR-Online-Publikation 34/2024, Bonn. <https://doi.org/10.58007/wma9-6y68>

DOI 10.58007/wma9-6y68

ISSN 1868-0097

Bonn 2025

# Inhaltsverzeichnis

## Teil 1: Forschungsbericht

Inhaltsverzeichnis	4
Kurzfassung	7
Abstract	9
Danksagung	11
Vorwort	12
1        Einleitung	13
1.1    Reparatur im Bauwesen	13
1.2    Reparaturmethoden in der praktischen Denkmalpflege	15
1.3    Ziele des Leitfadens	18
1.4    Methodik und Gliederung	23
2        Stand der Technik	25
2.1    Einleitung	25
2.2    Stiftförmige Verbindungsmitte	25
2.3    Modelle für die Tragfähigkeit stiftförmiger Verbindungsmitte	26
2.4    Übertragbarkeit der existierenden Modelle	30
2.5    Existierende Reparaturen durch Holzkeildolle (HKD)	32
2.5.1    Einleitung	32
2.5.2    Anlass für die Untersuchung	32
2.5.3    Objektliste	33
2.6    Vorläufige grundlegende Parameter ( <i>Erfahrungswerte</i> )	95
2.7    Fazit	99
3        Voranalyse und Anforderungen an die HKD	100
3.1    Einleitung und Hintergründe der Voruntersuchungen	100
3.2    Ziele der Voranalyse	101
3.3    Methodik	101
3.4    Tastversuche TV1: Rissbildung Holzkeildolle	102
3.4.1    Ziele	102
3.4.2    Materialien	102
3.4.3    Geometrie der Prüfkörper	102
3.4.4    Methoden	104
3.4.5    Prüfergebnisse	106

3.4.6	Schlussfolgerung	113
3.5	Tastversuche TV2: Zugtragfähigkeit Holzkeildolle	113
3.5.1	Ziele	113
3.5.2	Materialien	114
3.5.3	Geometrie der Prüfkörper	114
3.5.4	Methoden	118
3.5.5	Prüfergebnisse	119
3.5.6	Schlussfolgerung	129
3.6	FE-Simulationen	131
3.6.1	Ziele	131
3.6.2	Frühere Simulationen	131
3.6.3	Update der Simulationen	135
3.7	Tastversuche TV3: Zugtragfähigkeit nicht gekeilte Holzdolle	140
3.7.1	Ziele	140
3.7.2	Materialien	140
3.7.3	Geometrie der Prüfkörper	141
3.7.4	Methoden	142
3.7.5	Prüfergebnisse	144
3.7.6	Schlussfolgerung	145
3.8	Zusammenfassung	146
4	Experimentelle Charakterisierung der HKD	147
4.1	Festgelegte endgültige Parameter und geometrische Randbedingungen	147
4.2	Experimentelle Charakterisierung der Holzkeildolle bei Zugbeanspruchung	149
4.2.1	Ziele	149
4.2.2	Materialien	149
4.2.3	Geometrie der Prüfkörper	157
4.2.4	Methode	157
4.2.5	Prüfergebnisse	158
4.2.6	Schlussfolgerung	172
4.3	Experimentelle Charakterisierung der HD und der HKD bei Abscherbeanspruchung	175
4.3.1	Ziele	175
4.3.2	Materialien	175
4.3.3	Geometrie der Prüfkörper	175
4.3.4	Methode	180
4.3.5	Prüfergebnisse	181

4.3.6	Schlussfolgerung	192
5	Analytische Charakterisierung der HKD	194
5.1	Modellansatz/Nachweis für die Holzkeildolle bei Zugbeanspruchung	194
5.1.1	Hintergründe für den Modellansatz der Holzkeildolle unter Zugbeanspruchung	199
5.1.2	Auswertung der Ergebnisse	202
5.2	Numerische Einschätzung der Tragfähigkeit/Nachweis für die Holzkeildolle bei Abscherbeanspruchung	204
6	Outlooks	206
6.1	Fazit: Die Zukunft von Reparaturmethoden in der Denkmalpflege	206
6.2	Überprüfung der Forschungshypothese	206
Literaturverzeichnis		210
Abbildungsverzeichnis		213
Tabellenverzeichnis		216
Diagrammverzeichnis		218
Symbole		219
Mitwirkende		221
Kurzbiographien Autoren		222

### Teil 2: Leitfaden

Das Dokument ist als BBSR-Online-Publikation 114/2024 veröffentlicht (Perria Elena, Sieder Mike, Siegert Svenja, Reulecke Cordula: *Holzkeildolle als Reparaturverbindung. Teil 2: Leitfaden. Einsatz der Holzkeildolle als Möglichkeit neuer Reparaturverbindungen für die Denkmalschutzanforderungen des schonenden Substanzumgangs und der Materialgerechtigkeit*. BBSR-Online-Publikation 114/2024, Bonn, Januar 2024 [1]).

## Kurzfassung

**Ziel** dieses Forschungsprojektes war die Erarbeitung neuer technischer Erkenntnisse für den Einsatz von Reparaturtechnologien bei historischen Holzstrukturen im Sinne der Denkmalschutzanforderungen. Spezifisches Ziel war die Erarbeitung der Grundlagen für den statisch-konstruktiven Einsatz von Holz-Holz-Reparaturverbindungen mit Holzkeildollen. Das Forschungsprojekt brachte Vertreterinnen und Vertreter der Denkmalpflege, der universitäre Forschung, der Erarbeitung der Grundlagen für den statisch-konstruktiven Einsatz von Holz-Holz-Reparaturverbindungen mit Holzkeildollen Tragwerksplanung sowie denkmalerfahrene Zimmerleute zusammen, mit dem Ziel, die Einsatzmöglichkeit der gekeilten Holzdolle als anerkannte Reparaturverbindung bei historischen Holzkonstruktionen mittels tragwerksplanerischem Nachweiskonzept zu definieren und somit fundierte Grundlagen unter Berücksichtigung der speziellen denkmalschutzbezogenen Rahmendaten zu generieren.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden verschiedene Aspekte der Reparaturtechnologie mit Holzkeildolle – konstruktive, statische, fertigungs- und montagetechnische Aspekte – betrachtet. Diese Aspekte wurden in einem Leitfaden [1] anhand anwendungsspezifischer Sanierungsbeispiele, die unter Einbeziehung der Projektbeteiligten – Denkmalpflege, Planer, Ausführende – aufbereitet wurden, beleuchtet. Dies erfolgte mit dem Ziel, diese Technologie als „Best Practice“-Möglichkeit in der Denkmalpflege verankern zu können.

**Kontext.** In Südniedersachsen wird bei Denkmalobjekten seit gut zwei Jahrzehnten versucht, den Einsatz von metallischen Verbindungsmitteln bei der Instandsetzung von Holzstrukturen sukzessive zu reduzieren. Im Bereich der Auswechslung von geschädigten Teilbereichen wird sehr häufig auf Metallverbindungsmittel in nicht denkmalkonformen Ausführungen zurückgegriffen, insbesondere wenn die Verbindungsmittel für planmäßige Zugbeanspruchung ausgelegt werden müssen oder eine Klemmwirkung erforderlich ist. Prädestinierte Lösungen für Ertüchtigungsmaßnahmen basieren nicht nur auf der Verwendung von Nägeln, Schrauben und Bolzen, vorwiegend bei scher- und zugbeanspruchten Holzverbindungen, sondern auch auf Stahl- oder Kunststoff-Stäben, die mittels Kunstharzverguss die Verbindung realisieren, z.B. das sogenannte BETA-Verfahren [2]. Diese Verbindungstechniken sind jedoch aus denkmalpflegerischer Sicht nicht zu favorisieren [3–5], da die materialkonforme bzw. -gerechte Sanierung und Ertüchtigung zukünftig noch mehr als Maßgabe definiert werden wird. Langfristige Schäden mit eklatanten Auswirkungen können bei der Nutzung der nicht-materialkonformen Reparaturtechniken entstehen [2; 6–8]. Als wichtigste Schadenseinflüsse gelten chemische Einwirkungen (z.B. Korrosion) bei den metallischen Verbindungsmitteln [8] sowie Kondensatbelastungen im Kontaktbereich zwischen Kunststoff bzw. Stahl und dem umgebenden Holz [6]. Eine umfassende Herausforderung in der Denkmalpflege ist zunehmend die Aufarbeitung der in den vergangenen Jahrzehnten unsachgemäß durchgeführten Sanierungen. Dies stellt einen erheblichen wirtschaftlichen Faktor dar, der die Aufwendungen für die Pflege und den Erhalt unseres baukulturellen Erbes stark erhöht [5; 6] und in vielen Fällen sogar zu einer Vernichtung historisch wertvoller Bausubstanz führt. In der Charta von Mexiko [3; 4] wurde als Übereinkunft der weltweiten Kompetenzen in der Denkmalpflege ausdrücklich die Priorisierung von traditionellen Holz-Holz-Verbindungen verankert, da sich die nicht-materialkonformen Techniken in der Praxis nicht bewährt haben und deren langfristigen Auswirkungen auf die historischen Holzkonstruktionen nicht hinreichend bekannt sind. Der baurechtliche Nachweis für viele Techniken lässt sich von den Tragwerksplanern nicht erbringen, da Berechnungsgrundlagen fehlen.

In diesem Projekt sollten folgende **Forschungsfragen** beantwortet werden:

Welche praktische Anwendung findet die Holzkeildolle in der Erhaltung historisch wertvoller Denkmale?

Welches Tragverhalten und welche Tragfähigkeit weist die Holzkeildolle auf?

Welche Möglichkeiten des ingenieurtechnischen Nachweises bestehen für eine korrekte Anwendung?

Die angewandte **Methodik**, diese Fragen zu beantworten, ist die wissenschaftliche Methode. Sie besteht aus Messungen, Beobachtungen und der Entwicklung systematischer Labortests mit Inbezugnahme bestehender Theorien und Forschungsergebnisse, die zur Entwicklung neuer Theorien führen.

Um die Forschungsfragen zu beantworten und das Forschungsziel zu verfolgen, wurde ein **Arbeitsplan** entwickelt. In dem Forschungsprojekt wurde die ursprüngliche Hypothese über die Anwendbarkeit der Holzkeildolle in den Lastfällen Abscher- und axialer Zugbeanspruchung experimentell, numerisch und analytisch verfolgt. In Bezugnahme auf bestehende Theorien und Nachweismethoden über stiftförmige hölzernen Verbindungsmittel und *Erfahrungswerte* wurden in einem ersten Schritt systematische Tastversuche entwickelt mit dem Ziel, Fragestellungen über geometrisch-konstruktive Eigenschaften (Rissbildung, Randabstände, Eindringtiefe) zu beantworten. Die untersuchten geometrisch-konstruktiven Eigenschaften wurden in einem zweiten Schritt nach deren Einfluss auf das mechanische Verhalten klassifiziert, um die geometrisch-konstruktiven Rahmenbedingungen für einen konstruktiven Nachweis der Holzkeildolle in axialer Zugbeanspruchung zu definieren. Die ursprünglich angenommenen Hypothesen über Geometrie und Verhalten der Holzkeildolle (HKD) wurden an die neuen Erkenntnisse angepasst sowie die unterschiedlichen Parameter, die einen Einfluss auf das Trag- und Verformungsverhalten der HKD haben, identifiziert. Die bisher generierten Ergebnisse wurden numerisch, basierend auf der Finite-Elemente-Methode, bestätigt. Zuletzt wurden die Holzkeildollen unter axialer Zug- und Abscherbeanspruchung getestet und die charakteristischen Werte der Tragfähigkeit für einen Nachweis definiert. Als Ergebnis wurde ein Nachweiskonzept für die Holzkeildolle unter Zug- und Abscherbeanspruchung erarbeitet.

**Output** des Forschungsprojektes ist ein Endbericht, der aus zwei Teilen besteht: Teil 1 – „Forschungsbericht“ [9] und Teil 2 – „Leitfaden“ [1]. Die wissenschaftlichen Hintergründe des Forschungsprojektes sind in Teil 1 dieses Berichtes beinhaltet. Teil 2 [1] ist ein Dokument für die praktische Anwendung der Forschungsergebnisse. Der Leitfaden wird den verschiedenen, an Baudenkmälern beteiligten Akteuren helfen, die Ausführungsart fachlich und auch im baurechtlichen Einvernehmen vertreten zu können. Dieser enthält die grundlegenden Fertigungstechniken, die Einbauparameter und maßgeblichen Nachweisbeispiele für die Berechnung von Reparaturverbindungen mittels Holzkeildolle unter Abscherbeanspruchung und axialer Zugbeanspruchung.

**Anwendungsmöglichkeiten.** Die entwickelten Nachweise der Tragfähigkeit der gekeilten Holzdolle für diese beide Lastfälle eröffnen für Ingenieure die Möglichkeit, die Holzkeildolle in relevanten Beanspruchungsfällen als stiftförmige Verbindungsmittel für Holz-Holz-Verbindungen anzuwenden. Die bildliche und schematische Darstellung der zu berücksichtigenden Parameter und Einbauspekte zielt auf die akzeptierte Anwendung eines solchen Dokumentes in der handwerklichen Ausführung ab.

Das Forschungsprojekt ist als langfristiges Projekt zum Wiedererlernen und Verstehen historischer Techniken zimmermannsmäßiger Verbindungen konzipiert, um „Best Practice“ unter statisch-konstruktiven, wirtschaftlichen und kulturell orientierten Aspekten in der Denkmalpflege zu fördern.

## Abstract

The **aim** of this research project is to develop new technical knowledge in the field of repair techniques for historic timber structures with respect to monument protection requirements. Specific objective is to develop the basics for the static-constructive application of wood-wood (carpentry) repair joints with the novels "wooden wedged dowels". The research project brought together proponents of historic buildings and monument preservation office, university research, structural planning and carpenters experienced in monument preservation, with the aim of defining the frame of use of the mechanical fastener "wooden wedged dowel" and its application in repair connections for historic timber structures with respect to monument protection requirements.

The aim is pursued by the definition of the working principles of the fastener, practical application rules and the development of engineering knowledge about the fastener. More specific, a mechanical model and a verification concept for the wooden fastener were developed. Furthermore, its load-carrying capacity as well as fashioning and installation rules were defined.

These aspects are presented in a guideline [1] with case-study applications, which were prepared with the involvement of the project participants: Niedersächsisches Landesamt für Denkmalpflege (monument preservation office of Lower Saxony), Technische Universität Braunschweig, Institute of Building Construction and Timber Structures (university), IGP Gockel (planners in historical buildings), Quedlinburger Werkstätte für Denkmalpflege (contractors in historical buildings). Aim of these case-study applications is to present this technique as a "best practice" option for the preservation of historical monuments and anchor this novel wooden mechanical fastener in the state-of-the-art of repair technologies for historic timber buildings.

**Context.** In southern Lower Saxony, since two decades attempts have been made to successively reduce the use of metal fasteners in the repair of historic timber structures, above all when they are exposed to moisture. In the area of replacing damaged timber sections, metal fasteners are very often used for connections subjected to shear load, tensile load or if a clamping effect is required. Common fasteners for retrofitting measures are not only metal nails, screws and bolts, but also steel or plastic rods that realise the connection by means of synthetic resin grouting, e.g. the so-called BETA method [2]. However, these connection techniques are not always to be favoured from the point of view of monument preservation [3–5]. In fact, long-term damages with effects on load-carrying capacity of the wooden structure can occur when non-material-compliant repair techniques are used [2; 6–8]. The most important influences on damage are considered to be chemical effects e.g. corrosion on metallic fasteners [8], as well as water condensation in the contact area between plastic or steel rods and the surrounding timber [6]. There is an increasing number of cases of remediation of improperly carried out retrofitting measures carried out in the last few decades which poses a challenge to the current and future conservation of timber buildings. In fact, this will have a major impact on the costs of retrofitting and preservation of our architectural heritage [5; 6]. This significant economic factor will in many cases even lead to the decadence and loss of historically valuable building heritage. The Charter of Mexico [3; 4], agreement of the worldwide competences in heritage timber conservation, explicitly favourites the use of traditional wood-wood (carpentry) connections, since the material-conforming techniques have been proven in practice since many centuries and have no long-term effects on the historic timber constructions.

Another important aspect in current timber engineering is the lack of calculation bases for many carpentry connections; therefore, structural engineers are unable to provide proof for many traditional techniques and these are not put into practice when necessary.

In this project, following **research questions** are answered: What are the practical applications for the wooden wedged dowels in the conservation of historically valuable monuments? What is the load-bearing behaviour and load-bearing capacity of the wooden wedged dowels? Which possibilities are there for structural engineers to provide evidence of wooden wedged dowels? Which load-cases can the wooden wedged dowel be used in?

The **methodology** used to answer these questions is the scientific method. It consists of measurements, observations and the development of systematic laboratory tests that bring new research results and lead to the development of new theories.

In order to answer the research questions and pursue the research objective, a **working plan** was developed. The first hypothesis about the use of the wooden wedged dowels under shear and axial tensile load was pursued experimentally, numerically and analytically. With reference to existing theories and verification methods for similar wooden fasteners e.g. wooden nails or dowels and empirical values, preliminary experimental tests were developed. In a first step the tests were developed with the aim of answering questions about geometric-constructive properties under loading conditions, among others, crack formation in the fastener and in the building components, edge distances as well as penetration depth of the wedge. In a second step, the tests were developed with the aim to give a classification of the previous investigated geometric-constructive properties according to their influence on the mechanical behaviour, in order to define the geometric-constructive boundary conditions for a constructive evidence of the wooden wedged dowel in shear and axial tensile loading. The different parameters that have an influence on the load-bearing and deformation behaviour of the wooden wedged dowel were identified. The results generated so far were confirmed numerically, based on the finite element method. In a next step, the wooden wedged dowels were tested under the defined boundary conditions in axial tensile loading and double shear loading. The characteristic values of load-bearing capacity for the two load cases were calculated from the test results and were used as a basis for the development of a mechanical model for the fastener. Finally, verification concepts for the wooden wedged dowels under tensile load and shear load were developed.

The **outputs** of the research project are resumed in this final report consisting of two parts: Part 1: "Forschungsbericht" [9] (Research Report) and Part 2: "Leitfaden" [1] (Guideline). The scientific backgrounds of the research project are included in Part 1 of this report. Part 2 [1] is a document for the practical application of the research results. The guideline will help the various actors involved in retrofitting of historical wooden structures to be able to plan, calculate, and build a repair connection with wooden wedged dowels. The guideline contains the basic manufacturing and fashioning rules, installation parameters and verification examples for the design of repair joints using wooden wedged dowels in shear stress and axial tensile load cases.

**Possible applications.** On one side, the knowledge about how to provide the evidence for the wooden wedged dowel in repair connections for these two load cases opens up the possibility for engineers to apply the fastener in relevant load cases for timber-wood connections. On the other side, the pictorial and schematic representation of the parameters and installation rules in the document is intended to make the developed knowledge about the novel wooden wedged dowel accessible also to carpenters and craftsmen.

The research project is conceived as a long-term project to re-learn and understand the historical techniques of carpentry joints in order to promote the "best practice" in heritage conservation from a static, constructive, economic and cultural point of view.

## Danksagung

Prof. Dr.-Ing. Mike Sieder

Leiter Institut für Baukonstruktion und Holzbau (iBHolz), Technische Universität Braunschweig

Der vorliegende Forschungsbericht als komprimierte Zusammenfassung des methodischen Erkenntnisgewinns gründet sich auf der eingehenden Analyse gebauter Beispiele, dem Verständnis und Durchdringen handwerklicher Methoden unter Einbeziehung ingenieurtechnischer Grundlagen und Erfordernisse sowie umfangreichen experimentellen und numerischen Untersuchungen, zwingend eingebettet in denkmalpflegerische Grundsätze und Prinzipien. All dies gelang nur mittels der uneingeschränkten Bereitschaft und des hohen Engagements aller Projektbeteiligten.

Ein ganz spezieller Dank gilt der Unterstützung durch das Niedersächsische Landesamt für Denkmalpflege – der Präsidentin Frau Dr. -Ing. Christina Krafczyk für die ideelle und monetäre Unterstützung und insbesondere der Leiterin des Regionalreferats Braunschweig (B3) Bau- und Kunstdenkmalpflege Frau Dipl. -Ing. Cordula Reulecke für die inhaltliche Projektbearbeitung, dem Ingenieurbüro IGP Gockel PartGmbB Frau Dipl. -Ing. Svenja Siegert für Herrn Dipl. -Bauing. Bernhard Gockel als Initiator der Konstruktionsidee und Frau Dipl.-Ing. M.Sc. Architektin Tanja Gockel, den Werkstätten für Denkmalpflege GmbH für die wertvollen praktischen Hinweise und Anregungen und deren Unterstützung bei der Fertigung der Versuchskörper für die experimentellen Untersuchungen sowie der Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH für die Durchführung der experimentellen Untersuchungen.

Danken möchten wir ganz grundlegend dem Fördergeber, dem Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, der Forschungsinitiative Zukunft Bau, dem Referat II 3, Deichmanns Aue 31-37, 53179 Bonn (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), der die Relevanz der gegenständlichen Thematik wertschätzend aufgenommen und monetär unterstützt hat und damit die Durchführung der Forschungsarbeit erst ermöglicht hat, sowie dem Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur für die gespendeten Mittel, welche die Herstellung des Dokuments ermöglicht haben.

Herzlichen Dank an alle Forschungspartner für die wertvolle Zeit und deren stets bemühter Bereitschaft zur Förderung der Forschungsarbeit. Sie alle haben signifikant zum Gewinn wertvoller Erkenntnisse beigetragen.

## Vorwort

Dr.-Ing. Christina Krafczyk

Präsidentin Niedersächsisches Landesamt für Denkmalpflege

Während der vierzig Jahre, in denen das Niedersächsische Denkmalschutzgesetz besteht, hat sich der Schwerpunkt der gesamten Bautätigkeiten auf das ‹Bauen im Bestand› verlagert. Denkmalpflegerische Arbeit steht heute auch durch das wachsende Bewusstsein, dass Ressourcenschonung Pflicht ist, in einem neuen Kontext werterhaltenden Denkens. In der Bauwerkserhaltung wie im Bereich der Erhaltung des hochwertigen, geschützten Kulturerbes gleichermaßen waren und sind neue interdisziplinäre Forschungen notwendig, um die erforderlichen Kompetenzen im Umgang mit den heterogenen Baubeständen und Baudenkmälern aufzubauen. Dafür müssen spezialisierte Verfahren der Erfassung, Bewertung, Instandsetzung und Erhaltung vorgehalten und weiterentwickelt werden. Anknüpfend an den erfolgreichen Sonderforschungsbereich ‹Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke› (DFG SFB 315) in den 1980er Jahren hat sich international ein eigenständiges Forschungs- wie Lehrgebiet an der Schnittstelle von Denkmalpflege und Ingenieurwissenschaften etabliert, in welches das Projekt „Holz-Holz-Reparaturverbindungen mit Holzkeildollen“ gut zu verankern ist.

Ich freue mich deshalb sehr, dass mit der vorliegenden Arbeit ein wichtiger neuer Baustein zur ingenieurtechnischen Bewertung und denkmalgerechten Reparatur von historischen Holzverbindungen, hier die gekeilte Holzdolle als Reparaturmethode im Fachwerkbau, in interdisziplinärer Zusammenarbeit zwischen Denkmalpflege und Bauingenieurwesen entstanden ist.

Denkmalpflegerische Ziele, wie größtmögliche Erhaltung der Originalsubstanz, können nur erreicht werden, wenn die historischen Bautechniken ausreichend verstanden, ihr Material- und Konstruktionsverhalten beschrieben und wie in diesem Projekt entsprechende adäquate Reparaturtechniken entwickelt werden können. Traditionelle historische Handwerkstechniken werden derzeit weder in den Curricula der Handwerksausbildungen ausreichend gelehrt, noch werden sie in der Breite im Betrieb vorgehalten. Erfahrene Handwerker im Denkmalbereich sind oftmals nur überregional verfügbar. Vor dem Hintergrund der aktuellen Debatten um Ressourcenschonung und Regionalität könnte auf Grundlage der Kompetenzen in der Denkmalpflege eine Trendwende hin zum regionaltypischen Bauen sowie zum denkmalgerechten Umgang mit den hochkarätigen geschützten Bauwerken eingeleitet werden.

Das Niedersächsische Landesamt für Denkmalpflege sieht seine Aufgaben im Wesentlichen in der Erfassung und Erforschung der vielfältigen, hochkarätigen Denkmallandschaft und Landesgeschichte in Niedersachsen sowie in der Beratung zur Erhaltung und zum Schutz der Denkmale. Unser Leitbild, möglichst substanzerhaltend zu konservieren, stellt uns immer wieder aufs Neue im Einzelfall vor Herausforderungen. Die Denkmalbestände sind oftmals bereits überformt, „modern“ instandgesetzt und fordern eine vertiefte Kenntnis regionaltypischer Bau- und materialgerechter Reparaturtechniken. In einem solchen Einzelfall in Süd-Ost Niedersachsen ist die Idee zu einer materialgerechten Reparaturtechnik im Fachwerkbau entstanden und konnte nun durch die schöne Initiative von Frau Cordula Reulecke als Leiterin des Regionalreferats Braunschweig und Prof. Mike Sieder vom Institut für Holzbau der TU Braunschweig in Bezug auf ihre Wirksamkeit und Anwendbarkeit untersucht und ein entsprechender Leitfaden zum Einsatz der Holzkeildolle entwickelt werden. Ich bin sicher, dass der Leitfaden auf großes Interesse stößt, eine gute Verbreitung und Anwendung in der praktischen Denkmalpflege finden und damit einen wichtigen Beitrag zu einer langangelegten Werterhaltung unserer hochkarätigen Kulturdenkmale leisten wird.

# 1 Einleitung

## 1.1 Reparatur im Bauwesen

Prof. Dr.-Ing. Mike Sieder

Leiter Institut für Baukonstruktion und Holzbau (iBHolz), Technische Universität Braunschweig

In unserer schnelllebigen und konsumorientierten Welt spielt der Begriff der Reparatur in den meisten technischen Sparten des Alltags eine stark untergeordnete Rolle – hier gilt zumeist wegwerfen anstatt reparieren. Aufgrund des vergleichsweise oft kurzweiligen Gebrauchs technischer Produkte ist die Verantwortung von Ingenieur\*innen dadurch auch zeitlich eingeschränkt. Speziell im Bauwesen haben wir es in der Regel mit Projekten und erschaffenen Werken zu tun, für welche Ingenieur\*innen langfristig Verantwortung tragen müssen. Die Produktionslinie eines Mobiltelefons oder eines Autos lässt sich relativ leicht abändern und anpassen. Eine bauliche Quartiersstruktur, das Verkehrsnetz einer Stadt oder Region, die Trasse einer Bahnlinie sind dagegen nicht einfach reversibel. Langzeitverantwortung baut prinzipiell auf einer Folgenabschätzung auf. Zukunft ist jedoch schwer bestimmbar und auch Technik unterliegt einer doppelten Kontingenz. Das heißt, unsere Handlungen haben Einfluss auf die Zukunft und ändern deren Möglichkeiten und insbesondere in einer pluralistischen Gesellschaft ist die Vielfalt der Wertevorstellungen inhaltlich und zeitlich stark veränderlich. Diese Prinzipien, Einflüsse und Abhängigkeiten spielen im Umgang mit der gebauten Umwelt eine fundamentale Rolle und drücken sich in einem breiten Spektrum an präsentierten Ideen, Möglichkeiten und Lösungen aus.

In der Norm DIN 31051 – Grundlagen der Instandhaltung – werden die baulichen Grundmaßnahmen Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Verbesserung definiert und deren Zusammenhänge aufgezeigt. Im Bauwesen wird überwiegend die Taxonomie Wartung, Renovierung, Reparatur, Sanierung und Modernisierung verwendet. Die Instandhaltung von Gebäuden und baulichen Anlagen ist inhärent erforderlich, um die baurechtlich geschuldete oder allgemein vorausgesetzte Lebensdauer einer Konstruktion bzw. einzelner Bauteile erzielen zu können. Der Mehrheit der Bauherren oder Mieter wird üblicherweise bewusst sein, dass auch bei Gebäuden im zeitlichen Nutzungsverlauf mit einem „Ausfall“ oder einer Einschränkung bestimmter Funktionen gerechnet werden muss. Das Reinigen nach Verschmutzung bzw. bei Verstopfung, das Austauschen eines defekten Leuchtmittels, die materialbezogene Pflege sowie das Reparieren von baulichen Defiziten sind akzeptierte Gewöhnlichkeiten. Treten Reparaturen in Umfang und Tiefe vermehrt auf, so wird unter Umständen eine umfängliche Sanierung oder auch Modernisierung erforderlich. Reparaturen im Bauwesen als Teil der Instandsetzung bzw. Instandhaltung erfolgen nach Ausfall von Bauteilen/-elementen bzw. signifikanter Schädigung. Mittels Reparatur wird das defizitäre Konstruktionsdetail in den funktionablen Zustand vor der aufgetretener Schädigung zurückversetzt. Hierbei werden die aufgetretenen Bauschäden und in diesem Zusammenhang ggf. auch technische, statisch-konstruktive, bauphysikalische, materialbezogene und nutzungsbedingte Mängel behoben.

Die Bautechnik allgemein sowie jede materialspezifische Bauweise haben in ihrer evolutionären Geschichte eine Vielzahl von Konstruktionen hervorgebracht. Für die jeweilige entwicklungsgeschichtliche Epoche kamen typische Konstruktionen und Bauweisen zur Anwendung, wodurch sich – aus heutiger Sicht – typische Mängel, Schadenpotentiale und Schwachpunkte definieren lassen, die mit entsprechender Fachkenntnis gezielt untersucht und bewertet werden können und bei Notwendigkeit eine substanzenorientierte und nachhaltig orientierte Reparatur bzw. Sanierung von Bauteilen/-elementen ermöglichen.

Rückblickend lässt sich konstatieren, dass der Umgang mit historischer Bausubstanz immer von den intellektuellen, kulturellen, gesellschaftspolitischen und technischen Randbedingungen der jeweiligen Zeit geprägt war und wie erwähnt, einem stetigen Wandel unterliegt. Durch die Epoche der Aufklärung gegen

Ende des 18. Jahrhunderts wurde die Denkmalpflege mit dem Bewusstsein der Erhaltung und Weiterführung bestehender Bausubstanz in einen erweiterten Zusammenhang gebracht. Die Grundlage denkmalpflegerischen Agierens in der Neuzeit stellt die Charta von Venedig aus dem Jahre 1964 dar, die als international anerkannte Leitlinie denkmalpflegerischer Aspekte in Bezug auf Konservierung und Restaurierung von Denkmälern definiert. Die Leitlinien umfassen den gesamten Bereich der Denkmalpflege und sprechen die unterschiedlichen beteiligten Akteure konkret an.

Für den planenden Bauingenieur lassen sichfordernde Aspekte wie Erhaltung und Bewahrung, Reparatur und Sanierung unter Respektierung des überlieferten Bestandes, vorrangiger Einsatz traditioneller und substanzschonender Techniken sowie Erkennbarkeit neu hinzugefügter Bauteile und baulicher Veränderungen ableiten. Der Grundsatz der ingenieurtechnischen Arbeit bei der Instandhaltung und Instandsetzung denkmalgeschützter aber auch üblicher zeitgenössischer und moderner Bauwerke ohne kategorisierten Schutzstatus sollte auf der Achtsamkeit liegen, substanzelle Eingriffe für einzelne Bauteile/-elemente sowie für das Gesamtbauwerk verträglich vorzunehmen. Dies inkludiert wie erwähnt den Einsatz traditionell bewährter epochenbezogener und substanzschonender Techniken und materialgerechte Umsetzungsmethoden. Die Forderung nach der Reversibilität von konstruktionseingreifenden Maßnahmen wird seit längerer Zeit gestellt und wird zukünftig sicher noch stärker die technische Maßnahmenumsetzung dirigieren. Im oftmals als Teil der Instandhaltung etwas stiefmütterlich behandelten Bereich der Wartung gibt es ständig repetitive Maßnahmen, die damit bis zu einem gewissen Grad als reversibel bezeichnet werden können. Auch bei Instandsetzungsmaßnahmen wie Reparaturen kann von einem gewissen Grad an Reversibilität ausgegangen werden, wenn die erwähnten Grundsatzaspekte des achtsamen Umgangs und der Anwendung traditioneller Techniken und Materialien zur Anwendung kommen. Der Umstand, dass heute getroffene Entscheidungen und umgesetzte Maßnahmen teils reversible, teils aber auch nicht reversibel sind und die erwähnte Fehlbarkeit im Hinblick auf den Anspruch einer anhaltenden und umfassenden Gültigkeit haben können, wie einerseits die baugeschichtliche Retrospektive bestätigt und andererseits auch unsere heutigen Maßnahmen ggf. aufzeigen werden, ist der Anspruch an eine Reversibilität der baulichen Eingriffe letztendlich auch als eine Risikovorsorge in Bezug auf vielschichtige prozessbeinhaltete Unzulänglichkeiten zu verstehen. Jede substanzeingreifende Maßnahme sollte so minimalinvasiv wie möglich erfolgen, um damit die aus aktueller Sicht nicht vorhersehbaren, jedoch ggf. zukünftig auftretenden Mängel und Schäden, wenn nicht umfassend verhindern, dann doch zumindest begrenzen zu können.

Das Verständnis und die Betrachtungsweise von Reparatur und Sanierung war in den zurückliegenden jüngeren Zeitepochen unterschiedlich und wechselte regelmäßig. Betrachtet man historische Baukonstruktionen aufmerksam, lassen vorhandene Reparatursspuren auf charakteristische Problematiken der Gebäude und ggf. auf eine zeitliche Abfolge der Schädigungen schließen. Ein Ausdruck der weit gefestigten Vorstellung von Sanierung und der Weiterführung der historischen Entwicklung der Erhaltung zeigt sich z.B. bei Mauerwerksbauten, wenn die Reparatur durch Erneuerung zerstörter Steine und Mörtel mit Materialien vollzogen wird, die auch in der Entstehungszeit des Bauwerks existierten. Die durchgeführten Reparatur-/Sanierungsmaßnahmen sollten nach heutigem Verständnis grundsätzlich identifizierbar, wobei der Grad der Erkennbarkeit je nach Objekt und Methodik variieren kann, und reversibel sein. Viele der auch heute eingesetzten Reparatur-/Sanierungsmethoden werden dieser Forderung nicht oder nur unzureichend gerecht. Oft wurden Problematiken und Schäden, die bei historischen Konstruktionen auftraten, einer grundlegend fehlerhaften oder fehleranfälligen Bauweise zugeschrieben und in der Folge mit schwerwiegenden Eingriffen ist die Struktur saniert, was zu teilweise massiven Konstruktionsveränderungen und -verhalten führte. Die Reparatur/Sanierung der vorangegangenen, teils irreparablen Sanierungsmaßnahme ist dann oft nur mittels Kompletaustausch betroffener Bauteile/-elemente in erheblichem substanzschädigendem Umfang möglich. Derartige Umstände sollten konsequent mittels planerischer und ausführungstechnischer Sachkompetenz und Weitsicht vermieden werden.

## 1.2 Reparaturmethoden in der praktischen Denkmalpflege

Dipl.-Ing. Cordula Reulecke

Referatsleiterin Bau und Kunstdenkmalpflege Regionalreferat Braunschweig,  
Niedersächsisches Landesamt für Denkmalpflege

Kulturdenkmale sind authentische, gebaute Archivquellen, an deren Wesens-, Sinn- und Werterhaltung ein öffentliches Interesse besteht. Als Archivquelle ist hierbei nicht nur die gebaute Gesamtleistung zu verstehen. Auch die einzelnen Materialkomponenten in ihren Ausführungstechniken tragen das Werden und Wissen der Vergangenheit in sich, welche nachfolgenden Generationen zu bewahren sind.

Bestandspflege eines Baudenkmals umfasst im wörtlichen Sinne kontinuierliche Wartung sowie substanzschonende Reparatur erst bei nachgewiesener Abgängigkeit. Sie erfordert Kenntnisse der historisch-materiellen Zeugniswerte und wie sie zu erhalten sind. Anpassungen an geltende Normen zählen nicht zur intendierten Grundlagenarbeit der Denkmalfachbehörden, obgleich diese im Alltagsgeschäft zum Regelwerk bei Argumentationen gehören. Diesen muss Fachwissen aus dem Bestand heraus entgegengehalten werden können. Deshalb muss ein Schwerpunkt bei Bestandsanamnesen auch in der Dokumentation von handwerklichen und baustofflichen Ausführungen liegen und auch Umbauphasen und/oder Instandsetzungen umfassen. Und für diese sind ebenfalls Denkmalwerte zu bejahen oder zu verneinen.

In der denkmalpflegerischen Bearbeitung ist die Objektgenese mit ganz unterschiedlichen Aussagen und Inhalten zu befüllen. Sie liegen im Zeitgeschehen neben- oder übereinander und bilden wie verlinkte Layer den aktuell bekannten Denkmal-Status.

Zusätzlich zu den wissenschaftlichen Tatbestandsmerkmalen konstituierender Denkmalwerte ist der prüfende Blick darauf zu richten, ob Reparaturtechniken - bereits erfolgte und erkannte oder zukünftig beabsichtigte - als schadensträchtig oder -befördernd einzustufen sind.

Dies vor dem Hintergrund, dass einige der durchgeführten Reparaturmethoden, die sich nicht am Bestand orientierten, sondern als vermeintlich innovative oder Drittanliegen geschuldeten Parametern entsprangen, in den letzten Jahrzehnten zu nicht unerheblichem, neuem Grundinstandsetzungsaufwand geführt haben.

Die zwischenzeitlich gängige Vorgehensweise ist Begrifflichkeiten aus der Medizin entlehnt: Anamnese – Diagnose –Therapie – Prophylaxe.

Nach dem zweiten Baustein hat sich die Einführung des Begriffs der „Prognose“ als sinnvolle Ergänzung herausgestellt, um langfristig-nachhaltige Therapievorschläge zu entwickeln.

Im Fokus der hier bearbeiteten Forschungsaufgabe liegt die Betrachtung einer speziellen Reparaturmethode, die seit 20 Jahren bei Instandsetzungen von einigen, durchaus auch namhaften Fachwerkgebäuden in Südniedersachsen eingesetzt wird.

Was war der Ausgangspunkt?

Resümiert wird aus der Sicht der aktiv beteiligten Zeitzeugin.

Der Südosten stellt die an Fachwerkbauten reichste Kulturlandschaft von Niedersachsen dar. Über Jahrhunderte war Holz nicht nur dort der wichtigste Baustoff, bei Fachwerkhäusern in Kombination mit Lehm als Geflecht, später mit kleinformativen, weichen Vollziegelsteinen, selten Natursteinen, für die Ausfachung oder auch ganz in Holz verzimmert und verkleidet. Wetterseiten wurden schon bald mit Schlagregen abweisenden Materialien, die der Region entstammten, behängt.

Nicht nur Fachwerkdörfer prägen die von Heide bis Mittelgebirge gestaltete Landschaft, die vielfältige Baukultur hervorbrachte. Viele historische Altstädte, fast alle davon wichtige mittelalterliche Handels-, zumeist auch Hanse-Orte, sind Fachwerkstädte und insgesamt oder in großen Teilen als Stadtgruppen ausgewiesene Kulturdenkmale. Sämtliche Architekturgattungen und bauliche Ausprägungen und Nutzungsformen sind in dieser Region auch in Fachwerkbauweise vertreten: von herrschaftlicher Repräsentation über sakrale Kontemplation bis zu bürgerlichem und bäuerlichem Geltungsanspruch; handwerklich und hauskundlich dem Zeitgeschmack entsprechend von schlichter Verzimmerung bis zu prachtvoll-geschnitzten Ausschmückungen und komplexen Knotenpunkten, die dem „steinreichen“ Massivbau in nichts nachstehen. Eine davon, die Altstadt von Goslar, ist sogar UNESCO-Weltkulturerbe-Bestandteil.

Zahlreiche denkmalgeschützte Fachwerkgebäude wurden in den letzten 30 Jahren grundlegenden Instandsetzungen unterzogen. Einige davon nach oder aufgrund bereits erfolgter Sanierung in nur kurzer Zeit davor. In diesem Zusammenhang wurden ebenfalls bauhistorische und baustoffkundliche Quellenstudien an der Bausubstanz durchgeführt.

Es konnte festgestellt werden, dass die ganzheitlichen Kenntnisse aus dem statisch-konstruktiv-materiellen Gesamtzusammenhang des Fachwerkbaus heraus keine zwingende Grundlage für damalige Reparaturen und Materialeinsätze darstellten. „Moderne“ Produkte und Methoden wurden, nicht nur in dieser Zeitspanne, als wirtschaftlicher und zugleich denkmalverträglich angepriesen und als allzeitbewährt deklariert, obgleich erst neu eingeführt. Das Vertrauen in bewährte Ausführungen geriet in den Hintergrund und zunehmend in Vergessenheit oder sie waren bereits aus dem Baumarktgeschehen verschwunden, wie z.B. Lehmbauprodukte durch Abschaffung der Lehmbau-DIN im Jahr 1971. Auch Ausbildungsinhalte verlagerten sich – im Handwerk und an den Hochschulen.

Das alles geschah sicherlich nicht in wissenschaftlicher Absicht, Kulturgut zu schädigen. Diese Grundhaltung führte jedoch zu planerischen Denkansätzen und handwerklichen Umsetzungen, die nunmehr Holz schlimmstenfalls als nicht wiederverwendbaren Sondermüll klassifizierten, der in Deponien abtransportiert werden musste.

Insbesondere der falsch verstandene Einsatz von Zweikomponentenharz zum flächigen Verschließen von Fugen aller Art im Fachwerkholz und an Holzverbindungen bis hin zum Hinterfüllen und vollflächigen Aufspachteln über die gesamte Holzoberfläche (mit Holzimitation durch den Einsatz von Kämmen, wie Ausführende berichteten) führte aufgrund zügig beginnender Verrottung an den Kontaktstellen durch nicht vermeidbare Rissbildung und Hinterläufigkeit zu massiven Folgeschäden.

Das Rathaus von Duderstadt stand zur Jahrtausendwende als ein medienwirksames, aber nicht einsames Beispiel im Blick der Öffentlichkeit.

Anstelle eines beabsichtigten Auffrischungsanstriches wurden schwerwiegende Schadensbilder bis zu akuten Gefahrenzuständen infolge unsachgemäßer Fachwerkinstandsetzungen gutachterlich festgestellt. Die aus den 1980'iger Jahren stammende, letzte „Instandsetzung“ mit unterschiedlichsten Ausführungsvarianten, bei denen auch Zweikomponentenharz zum Einsatz kam, war ursächlich verantwortlich.

Diese Erkenntnisse, auch zu anderen Fragestellungen, waren Basis der auf das konkrete Objekt bezogenen Vorgehensweise.

Die neue Planungsaufgabe bestand darin, Lösungen zu entwickeln, die mit der hohen Anzahl an erforderlichen Pass- und Reparaturstücken (auch innerhalb der großen Holzquerschnitte wie z.B. der Ständer) keine gleich hohe Anzahl von damals gängigen Leim- oder Metallverbindung mit bereits bekannten Gefährdungspotentialen verursachen sollten.

Aus dem engagierten Zusammenwirken zwischen ingenieurtechnischem, und hier ist insbesondere der verstorbene vereidigte Sachverständige für Altbausanierung, Herr Dipl. -Bauing. Bernhard Gockel zu benennen, handwerklichem und denkmafachlichem Sachverstand entstand die Konzeptidee, das jahrhundertelang bewährte Prinzip der Holz-in-Holz-Reparatur neu zu interpretieren. Während die historische Holzverbindung am historischen Gefügeknoten mit einem historischen Holznagel gesichert wurde, kamen für die zahlreich erforderlichen Passstücke Holzdollenverbindungen zum Einsatz, zum Teil kreuzweise versetzt

eingebaut, die im weiteren Entwicklungsverlauf und unter spezifischen Annahmen zum Einsatz des Keiles an den Enden der Holzdolle führten. Im Leistungsverzeichnis des Büros Brenker und Gockel, Baunatal, vom März 2001 für das historische Rathaus von Duderstadt tauchte deshalb als „Detail 0“ zum ersten Mal der „Holzkeildübel“ als Variante für eine Reparaturverbindung bei Fachwerkinstandsetzungen auf.

Parallel zu dieser Therapie-Idee erfolgte das Wiedereinführen von reversiblen Lehm-Leinölmischungen, versetzt mit Tierhaaren oder Hanf, zum Hinterfüllen von kleineren Hohlräumen oder bündigem Schließen anstelle des Ausspanens; auch dies eine altbewährte Reparaturform.

### 1.3 Ziele des Leitfadens

Prof. Dr.-Ing. Mike Sieder

Leiter Institut für Baukonstruktion und Holzbau (iBHolz), Technische Universität Braunschweig

Dr.-Ing. Elena Perria

Wissenschaftliche Mitarbeiterin Institut für Baukonstruktion und Holzbau (iBHolz), Technische Universität Braunschweig

Das geförderte Verbundprojekt hat Vertreter\*innen der Denkmalpflege (Niedersächsische Landesamt für Denkmalpflege), der Forschung (Technische Universität Braunschweig, MFPa Leipzig), der Tragwerksplanung (Ingenieurbüro IGP), sowie denkmalerfahrenen Zimmerleute (Werkstätten für Denkmalpflege Quedlinburg) zusammengebracht, mit dem Ziel, die Einsatzmöglichkeit der gekeilten Holzdolle als anerkannte Reparaturverbindung bei historischen Holzkonstruktionen mittels tragwerksplanerischem Nachweiskonzept zu definieren und somit fundierte Grundlagen unter Berücksichtigung der speziellen denkmalschutzbezogenen Rahmendaten zu generieren und zu manifestieren.

Eine schwerwiegende Herausforderung beim Umbau und bei der Sanierung historisch bedeutsamer Gebäude in Fachwerkbauweise ist in erster Linie die Ungewissheit über die Berechnung historischer zimmermannsmäßiger Verbindungen und hölzerner stiftförmiger Verbindungsmittel.

Holznägel kommen in historischen zimmermannsmäßigen Verbindungen vor. Bei der Reparatur werden die beschädigten ursprünglichen Verbindungen inklusive deren ursprünglichen Verbindungsmitteln nachgebildet. Aber was ist bei zu reparierenden Bauteilen zu tun? Zu unterscheiden ist zwischen einer nachgebildeten originalen Verbindung und einer Reparaturverbindung. In dem ersten Fall kommen nach denkmalpflegerischer Sicht zimmermannsmäßige Verbindungen zum Einsatz, die nach dem ursprünglichen Erscheinungsbild mit historischen stiftförmigen Verbindungsmittel zusammengefügt sein dürfen. Im zweiten Fall muss die Reparaturverbindung unterscheidbar sein; hier dürfen zimmermannsmäßige Verbindungen in Verbindung mit modernen stiftförmigen Verbindungsmittel zum Einsatz kommen. Folglich werden aufgrund mehrerer Unsicherheiten die mechanischen Eigenschaften der Reparaturverbindungen, wie Tragfähigkeit und Steifigkeit, oft falsch eingeschätzt. Die Folge ist häufig der Einsatz – „zur Sicherheit“ – normativ berechenbarer metallischer Verbindungsmittel. Für unter Abscheren und Zug beanspruchte Verbindungen kommen z.B. Gewindestange, Bolzen oder Schrauben zum Einsatz. Die vermeintliche Sicherheit der Berechnung ist eine Erleichterung für den Tragwerksplaner.

Die im Laufe dieses Forschungsvorhabens gesammelten Kenntnisse über die Eigenschaften der Reparaturverbindung mittels Holzkeildolle geben dieser eine belastbare Perspektive für den immer häufigeren Einsatz. Die Reparaturverbindung mittels Holzkeildolle eröffnet die Möglichkeit, metallische Verbindungsmittel durch hölzerne Verbindungsmittel ersetzen, zu können.

Spezifisches Ziel des Projektes ist die Erarbeitung einer Dokumentation in dem die konstruktiven und mechanischen Eigenschaften und Grenzen der Reparaturverbindung mit Holzkeildollen wissenschaftlich aufgearbeitet und erläutert sind, und eines Leitfadens als praktisches, zusammenfassendes Dokument für den statisch-konstruktiven Einsatz. Gleichzeitig soll somit die Verbreitung der Holz-Holz-Reparaturverbindung mit Holzkeildollen in den interessierten Fachkreisen erfolgen.

Dipl.-Ing. Cordula Reulecke

Referatsleiterin Bau und Kunstdenkmalpflege Regionalreferat Braunschweig,  
Niedersächsisches Landesamt für Denkmalpflege

Denkmalpflege am materiellen Denkmalbestand war und ist in ihrem praxisbezogenen, methodischen Vorgehen eng verbunden mit demjenigen Partnerfeld, das diese Vorgaben baulich plant und auch demjenigen, dass es am Objekt umsetzt. Was gedacht wird, muss entwickelt werden; was entwickelt wurde, muss baulich umsetzbar sein.

Theoretische Denkmalkunde und praktisches Handwerks- und Bauwissen gehören deshalb in gegenseitiger Wertschätzung zusammengefügt.

Aus Sicht der Landesdenkmalpflege stellt die Holzkeildolle als zusätzliche Holz-in-Holz- Reparaturmethode nicht nur eine vorbildliche Lösung aus dem tradierten Kontext der Fachwerkbauweise heraus dar. Sie verringert zugleich auch den Einsatz von in Einzelfällen sicherlich nicht zu vermeidenden Fremdmaterial-Verbindungen wie zum Beispiel aus Metall um ein weiteres Maß.

Es gibt auch ein aktuelles, zukunftsträchtiges Ansinnen:

- Die Bundesregierung plant bis 2030 den CO2- Ausstoß maßgeblich zu verringern.
- Jeder auch noch so kleine Baustein sollte in diese Zielsetzung mit einbezogen werden, auch eine Reparaturverbindung.

Reparieren ist per se ressourcenschonend und Holz ist ein nachhaltiger Baustoff. Das zum Erhalt verpflichtete, ältere Fachwerk-Baudenkmal aus regionalen Baustoffen ist somit auch aus der ganzheitlichen Nachhaltigkeitsbetrachtung (Graue Energie) heraus nicht zu unterbieten.

Denkmalschutz ist Umweltschutz, ist Klimaschutz!

Ein bis hin zum einzelnen Werk-Stück reparierfähiges Baudenkmal ist aber auch gelebte (oder wieder zu gewinnende?) Handwerksehre. Und das Gesamtwerk ist substanzschonende Denkmal- und Umweltpflege.

In dem mit Bundesmitteln geförderten Forschungsansatz konnten erfolgreich erste Nachweise erbracht werden für die Einsatzmöglichkeiten der Holzkeildolle. Das gesetzte denkmalfachlich erste Ziel wurde somit erfolgreich erreicht.

Das nächste und nicht minder wichtige Ziel ist die Verbreitung dieser Erkenntnisse in die breitere Ebene der Denkmal- und Baupraxis hinein.

Die Zusammenstellung in einem Leitfaden dient diesem Zweck.

Das denkmalfachliche Leitziel liegt weiterhin in der Begleitung des Einsatzes auch dieses kleinen, aber nicht unwichtigen Bausteins im praxisbezogenen Gesamtgefüge auf Fachwerk-Holz-Baustellen.

Dipl.-Ing. Svenja Siegert und Dipl.-Ing. M.Sc. Architektin Tanja Gockel  
Geschäftsführung IGP Gockel PartGmbH - Ingenieure und Architektin.

Das „Geburtsjahr“ der Holzkeildolle lässt sich relativ sicher auf die Jahre 2000/ 2001 bestimmen, in denen sich ein kleiner Fachkreis kritisch mit damals gängigen Reparaturmethoden an historischer Bausubstanz beschäftigte. Unser 2016 verstorbene Partner Bernhard Gockel war zu dieser Zeit im Ingenieurbüro für das Bauwesen Brenker Gockel am Rathaus Duderstadt tätig. Technisch „moderne“ Antragungsmaterialien wie Epoxidharzsysteme, die bei der erst wenige Jahre zuvor durchgeföhrten Fassadensanierung als Holzersatzmittel angewendet wurden, hatten innerhalb einer kurzen Zeit bereits zu massiven Schäden geführt. Schadensursache war maßgeblich die Dichtheit des Materials, so dass hinterliegende Feuchtigkeit, z. B. von außen eindringend über Fugen oder von innen anfallend infolge Diffusion, aufgestaut wurde und zu Fäulnisprozessen im angrenzenden Holz gefördert hat. Gemeinsam mit Frau Dipl.-Ing. Cordula Reulecke, heute Referatsleiterin des Regionalreferats Bau- und Kunstdenkmalflege in Braunschweig des Niedersächsischen Landesamts für Denkmalpflege (NLD), damals Dezernentin der Oberen Denkmalschutzbehörde in der Bezirksregierung Braunschweig, und mit der für die neuerliche Sanierung beauftragten Zimmererfirma wurde das Ziel definiert, Sanierungsdetails zu entwickeln, in denen weder die Diffusion noch die Kapillarität des Bauteilaufbaus wesentlich verändert wird. Holz sollte durch Holz ohne Verwendung von Leimen, Kunstharzen, Mörteln oder metallischen Verbindungsmitteln ersetzt werden.

In einem Vortrag von Herrn Dipl.-Bauing. Bernhard Gockel, ö.b.u.v. Sachverständiger für Altbausanierung, vom 27.11.2001 referierte er neben weiteren schadensverursachenden Reparaturmethoden der vergangenen Jahrzehnte über ungeeignete Antragsmaterialien/ Holzersatzmaterialien. Im letzten Teil seines Vortrags stellte er für uns heute immer noch als „fachtechnisch richtig“ geltende Reparaturmethoden vor - unter ihnen die Holz-in-Holz-Reparaturdetails unter Verwendung der Holzkeildolle.

Die Holzkeildolle war ab dem Jahr 2001 in den Leistungsverzeichnissen der Zimmer- und Holzbauarbeiten unter dem Titel „Holzoberflächen instandsetzen“ im Büro Brenker und Gockel und in den Folgebüros von Herrn Gockel, zuletzt in unserem gemeinsamen Ingenieurbüro IGP Gockel PartGmbH, stetig vorhanden.

20 Jahre lang wurden die damals entwickelten Details vor allem im Großraum Südniedersachsen und der Region Braunschweig bei zahlreichen Sanierungen, vorwiegend von Fachwerkfassaden, ausgeführt. Die Verbindungen hatten zumeist nichtkonstruktiven Charakter, d. h. ein statischer Nachweis war i.d.R. nicht erforderlich. So wurden Passstücke mit Holzkeildollen befestigt, die entweder Teil in der Fläche eines Bauteils waren oder die ein Fachwerkbauteil im Anschlussbereich zu einem weiteren saniert haben (Teilaustausch). Bei den wenigen Anwendungsfällen an statisch bedeutsameren Einzelbauteilen wie z. B. Sparrenfußpunkten wurden die Holzkeildollen als Holzdollen nachgewiesen, da die Annahme galt, dass die Holzkeildolle in der Scherzone wie eine Holzdolle funktioniere.

Bei allen Sanierungen wurde minimalinvasiv gearbeitet, d.h. es wurde nur so viel historische Holzsubstanz entfernt, wie unbedingt notwendig war. Dieser Sanierungsansatz ist seit dieser Zeit Leitgedanke unserer Arbeit. Seine Umsetzung erfordert die Zustimmung und Unterstützung aller am Projekt Beteiligten und eine große Sensibilität der Ausführenden.

Auch heute noch gibt es leider im Bereich der Sanierung von Baudenkmälern Planungen und Ausführungen, die aus Erfahrung als technisch ungenügend eingestuft werden können. Dies betrifft neben den Holzersatzmaterialien wie die Epoxidharzsysteme auch die metallischen Verbindungsmittel. Demgegenüber hat sich die Holzkeildolle auf Grund ihrer Materialgerechtigkeit bei allen Projekten bewährt, bei denen sie in den vergangenen 20 Jahren zum Einsatz gekommen ist. Und dennoch ist sie ausschließlich einem kleinen Fachkreis bekannt.

Bisher fehlt der Holzkeildolle die wissenschaftliche Grundlage. Sowohl geometrische als auch herstellungs- und anwendungstechnische Annahmen, die bisher nicht starr geregelt waren, sollen im Rahmen dieser

Forschungsarbeit erstmals analysiert, überprüft und bewertet werden. Zudem soll eine Grundlage für weitere Forschungsprojekte in Zusammenhang mit der Holzkeildolle geschaffen werden.

Wir erhoffen uns mit den Forschungsergebnissen Aufmerksamkeit auf die Holzkeildolle zu lenken, den am Bau Beteiligten Möglichkeiten zum Umdenken aufzuzeigen und den Personenkreis der Interessierten und Anwender zu erweitern.

Zimmermeister und Restaurator im Zimmerhandwerk Michael Knop  
Quedlinburger Werkstätten für Denkmalpflege.

Die Werkstätten für Denkmalpflege befassen sich seit 1978 als Unternehmen mit der Restaurierung historischer Bausubstanzen an unterschiedlichsten Objekten.

Diese Leistungen werden in den Gewerken Zimmerer-Maurer-Dachdecker-Schlosser-Steinmetzen und Tischler erbracht und erstrecken sich auf das gesamte Bundesgebiet, mit dem Schwerpunkt Nord- und Mitteldeutschland.

Immer wieder stehen wir vor der Aufgabe besonders sensibel mit dem vorhandenen Gebäudebestand umzugehen und es ist uns ein besonderes Anliegen das Werk unserer Handwerker-Vorfahren zu schätzen und zu achten.

Eine grundlegende Forderung des Denkmalschutzes ist dabei der substanzschonende, reversible und materialgetreue Einsatz von Verbindungsmitteln bei der Reparatur von Holzkonstruktionen.

Die Holzkeildolle ist eine Möglichkeit, dieser Forderung gerecht zu werden.

Im nichtkonstruktiven Bereich wurde diese Art der Verbindung schon seit mehreren Jahren erfolgreich eingesetzt. Jetzt ist es durch die Untersuchung der Leistungsfähigkeit der Holzkeildolle im Rahmen des Forschungsprojektes möglich, diese auch im konstruktiven Bereich einzusetzen.

Damit die Verbindungen auch die gewünschten statischen Parameter erreichen, ist durch den Handwerker eine exakte Ausführung, nach den in dem anliegenden Leitfaden aufgezeigten Einsatzbedingungen, unabdingbar.

## 1.4 Methodik und Gliederung

Die angewandte Methodik ist die wissenschaftliche Methode. Sie besteht aus Messungen, Beobachtungen und der Entwicklung systematischer Labortests mit Inbezugnahme bestehender Theorien und Forschungsergebnisse, die zur Entwicklung neuer Theorien führen.

Der Endbericht des Forschungsprojektes „Holzkeildolle als Reparaturverbindung“ besteht aus zwei Teilen: Teil 1 – „Forschungsbericht“ und Teil 2 – „Leitfaden“.

Teil 1.

Der Forschungsbericht beschreibt die Prozesse zum Gewinn neuer Erkenntnisse über die Reparaturverbindung mit der Holzkeildolle mit dem Ziel der wissenschaftlichen Verbreitung der Forschungsergebnisse. In diesem Teil sind u.a. die Prozesse für die Entwicklung der allgemeinen geometrischen und mechanischen Grundlagen, der Finite-Elemente-Modellierung, die experimentellen Ergebnisse zur Darstellung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens der Reparaturverbindung mittels Holzkeildolle (HKD) und die statische Modellierung gezielt zur Entwicklung des Modellnachweises beschrieben.

Im Forschungsbericht wird die ursprüngliche Hypothese experimentell – numerisch – analytisch nachgewiesen. In Bezugnahme von bestehenden Theorien und Nachweismethoden über stiftförmige hölzerne Verbindungsmittel (vgl. 2.3) und *Erfahrungswerte* (vgl. 2.6) wurden in einem ersten Schritt systematische Tastversuche entwickelt (Tastversuche TV1) mit dem Ziel, Fragestellungen über geometrisch-konstruktive Eigenschaften (Rissbildung, Randabstände, Eindringtiefe) zu beantworten (vgl. 3.4). Die im TV1 untersuchten geometrisch-konstruktiven Eigenschaften wurden in einem zweiten Schritt (Tastversuche TV2) nach deren Einfluss bezogen auf das mechanische Verhalten klassifiziert, um die geometrisch-konstruktiven Rahmenbedingungen für einen konstruktiven Nachweis Holzkeildolle in axialer Zugbeanspruchung zu definieren (vgl. 3.5). Die ursprünglich angenommenen Hypothesen über Geometrie und Verhalten der HKD wurden an die neuen Erkenntnisse angepasst sowie die unterschiedlichen Parameter, die einen Einfluss auf das Trag- und Verformungsverhalten der HKD haben, identifiziert (vgl. 3.8). Die Ergebnisse der TV1 und TV2 wurden numerisch bestätigt, basierend auf der Finite-Elemente-Methode. Diese zwei Phasen (vgl. 3.6.2. und 3.6.3) lieferten schrittweise realitätsnahe Ergebnisse zu einigen Parametern. In einer dritten Laborkampagne (Tastversuche TV3) wurden neue Versuche für den Vergleich der Holzkeildolle mit dem Verhalten herkömmlicher zugbeanspruchter stiftförmiger Verbindungsmittel aus Holz (Holzdolle, abgekürzt HD) entwickelt (vgl. 3.6.3). Im Kapitel 4 wurde die Holzkeildolle mit den definierten geometrisch-konstruktiven Rahmenbedingungen erneut getestet. In dieser Laborkampagne (V1 und V1a) wurden die Holzkeildollen auf ihr Verhalten unter axialer Zugbeanspruchung (vgl. 4.1) und Abscherbeanspruchung (vgl. 4.3) getestet und die Ergebnisse wissenschaftlich analysiert, um ein mechanisches Modell und eine Nachweismethode für die beiden Beanspruchungsfälle zu entwickeln. Im Ergebnis wurde ein Nachweiskonzept für die Holzkeildolle unter Zugbeanspruchung (vgl. 0) und für die Holzkeildolle unter Schubbeanspruchung (vgl. 5.2) erarbeitet.

Teil 2.

Der Leitfaden ist ein Dokument, in dem der Praxistransfer der Forschungsergebnisse erläutert ist. Hier sind zusammenfassend die fachlichen und baurechtlich einvernehmenden, korrekten Ausführungsparameter und Nachweismethoden für die praktische Anwendung der Reparaturverbindung mit der Holzkeildolle bei axialer Zug- und Abscherbeanspruchung beschrieben. Dieses Dokument ist redigiert worden, mit dem Ziel ein praktisches Handbuch im Werk, auf der Baustelle, sowie im Tragwerkplanungsbüro darzustellen.

Das Dokument enthält zuerst allgemeine Informationen über die Anforderungen an Reparaturen in der Denkmalpflege (vgl. 2.) und Besonderheiten an dem Aufbau der Holzkeildolle im Bestand (vgl. 3.). Die allgemeinen Grundlagen der Reparaturverbindung wie z.B. Lagerung, Materialauswahl, Fertigungs- und Montagetechniken, Vorarbeiten und Einbau für reguläre statisch-relevante Reparaturverbindungen sind im Abschnitt 5 erläutert. Spezielle Anwendungsfälle wie z.B. die Reparatur von Bauteilen, dessen

Reparaturverbindung nur von einer Seite sichtbar bzw. einbaufähig ist – die statisch-relevante „blinde“ Reparaturverbindung – oder Reparaturen, bei denen die Holzkeildolle nichtkonstruktiv als Lagesicherung dient – die sogenannte „kosmetische Reparatur“ sind jeweils im Abschnitt 6 und 7 beschrieben und die Abweichungen zur Grundlagenregel erklärt. Nachweisbeispiele der Holzkeildolle im Bestand für „reguläre statisch-relevante Reparaturverbindungen“ und „kosmetische Reparaturverbindungen“ mit statischer Beanspruchung sind jeweils im Abschnitt 8 und 9 erläutert.

Für einen anschaulichen Praxistransfer wird der Einbau einer Reparaturverbindung mit Holzdolle und Holzkeildolle als „best practice“-Beispiel mit Fotos und detaillierter Beschreibung der einzelnen Prozessschritte verständlich dargestellt.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Einleitung

Die Analyse vom „Stand der Technik“ von hölzernen, stiftförmigen Verbindungsmittern beginnt mit einer Analyse der Verwendung dieser Verbindungsmitte in traditionellen und historischen Holzkonstruktionen. Es folgt eine Literaturrecherche zu Modellansätzen zur ingenieurmäßigen Berechnung von stiftförmigen Verbindungsmittern und den Möglichkeiten des Wissenstransfers der Holzkeildolle. Die Untersuchung endet mit einer Analyse von bestehenden Konstruktionen, in denen die Holzkeildollen eingebaut wurden.

Für die Analyse und Bewertung der Holzkeildollen, die im Bestand vorzufinden sind, wurden in einem ersten Schritt erfahrene Fachleute, die seit Jahrzehnten diese Reparaturtechnik anwenden, nach *Erfahrungswerten* zu Eigenschaften und Parametern für die Fertigung und den Aufbau befragt (vgl. 2.6). In einem zweiten Schritt wurden verschiedenartige Beispielobjekte, bei denen sich die Holzkeildollen in Bestand befinden, ausgewählt und in einem Katalog zusammengefügt (vgl. 2.5). In den Katalogzetteln wurden Informationen in Bezug auf Gebäudetypologie und Anwendung der Holzkeildolle mit Angaben über Geometrie und Abstände, sowie Einbaumaterial erfasst.

### 2.2 Stiftförmige Verbindungsmitte

Klassische stiftförmige Verbindungsmitte im historischen Holzbau sind meist Holznägel. Die ersten historischen stiftförmigen Verbindungsmitte waren gemäß [10] Keile, Fugennägel, Kopfnägel, Holznägel, welche in Fugen eingeschlagen, zur Sicherung von Holz-Holz-Verbindungen dienten. Die Entwicklung von stiftförmigen Verbindungsmitte fing im 10. Jh. an und entwickelte sich bis zum 19. Jh. [11]. Die Querschnitte der historischen Holznägel sind üblicherweise grob polygonal mit einem viereckigen bis achtseitigen Querschnitt (mit oder ohne Nagelkopf) mit einem Durchmesser von ca. 24 bis 30 mm [11]. In Längsrichtung sind sie leicht spitz zulaufend, um das Einbringen in das vorgebohrte Loch zu vereinfachen. Den letzten Entwicklungsschritt der stiftförmigen Verbindungsmitte stellen Dollen und Dübel dar. Neben den historischen Stiften besitzen diese modernen Varianten einen kreisförmigen Querschnitt und eine zylindrische longitudinale Entwicklung; ebenso verbreitet sind geriffelte Eichennägel und -dübel, mit kreisförmigem, geriffeltem Querschnitt und zylindrischer longitudinaler Entwicklung.

Im historischen Holzbau wurden zimmermannsmäßige Holzverbindungen mit Holznägeln aus Eiche-, Esche-, Kiefern- und Nadelholz gesichert [12].

Die sowohl historische aber auch moderne häufigste Holzkombination von Bauteil und Holznagel ist ein Holznagel aus Laubholz in einem Bauteil aus Nadel- oder Laubholz. In der Regel wurde immer eine Holzkombination gewählt, in der das Verbindungsmitte eine höhere Rohdichte als das Bauteil hat. Meistens wird für die Nägel Eichenholz wegen der höheren Festigkeit gewählt. Die Bauteile sind meist aus Fichte, Kiefer, Tanne oder Eiche.

Im Bauen im Bestand wird zwischen zwei Kategorien stiftförmiger Verbindungsmitte unterschieden: „Holznägel“ - Verbindungsmitte mit achtseitigem Querschnitt, leicht spitz zulaufend, für die Erhaltung historischer zimmermannsmäßiger Verbindungen und „Holzdübel“ oder „Holzdollen“ mit kreisförmigem, zylindrischem Querschnitt für den modernen Holzbau.

Die „Holznägel“ sind als Verbindungsmitte im historischen Holzbau zu finden und werden für die Instandsetzung von Holzkonstruktionen eingesetzt. Die „Holznägel“ fanden häufig Anwendung im historischen Fachwerk- und Dachkonstruktionen, meist als Verbindungsmitte vorhandener

zimmermannsmäßiger Holzverbindungen. Sie werden auch als Verbindungsmittel für zimmermannsmäßige Ersatzverbindungen angewendet. Die Funktionen der Holznägel waren und sind vielseitig:

- Die Bauteile bestanden überwiegend aus frisch geschlagenem Holz. Sie erfüllten primär die Funktion der Lagesicherung von zwei oder mehreren sich berührenden Bauteile. Sie dienten dazu, die Verbindung zwischen den Bauteilen während des Schwinden und Quellens des Holzes in Position zu halten.
- Zunächst dienten die Holznägel als Montagehilfe, um die Verbindung in ihrer gewünschten Position zu halten, bevor die fertige Konstruktion planmäßig beansprucht wurde.
- Die Holznägel erledigen weiterhin die Funktion, ein- oder zweischnittige Knotenpunkte zu verbinden. Sie sichern das Auseinanderfallen/Verschieben der Bauteile bei unplanmäßigen Beanspruchungen.
- Des Weiteren erfüllen die Holznägel die sekundäre Funktion der Aufnahme von kleinen Zugkräften senkrecht zur Achse der Verbindungsmittel.

Die hölzernen „Dübel“ und „Dollen“ werden als Verbindungsmittel sowohl im historischen Holzbau als auch seltener im modernen Holzbau eingesetzt. Sie werden in historischen Holzkonstruktionen ausschließlich als Verbindungsmittel für Reparaturverbindungen angewendet. Die stiftförmigen Verbindungsmittel sind in industriell gefertigter Form in verschiedenen Durchmessern verfügbar. Es existieren auch für den Belastungsfall Abscheren anerkannte normative Berechnungsvorgaben (vgl. 2.3). Nichtsdestotrotz werden im modernen Holzbau hölzerne Verbindungsmittel kaum verwendet. In Verbindungen, in denen stiftförmige Verbindungsmittel auf Abscheren belastet werden, kommen vorwiegend metallische Verbindungsmittel (u.a. Bolzen, Stabdübel) zum Einsatz. In Verbindungen, in denen die Verbindungsmittel planmäßig Zugkräfte aufnehmen müssen oder auch der Lagesicherung dienen, werden ausschließlich metallische Verbindungsmittel verwendet u.a. Schrauben, Klemmern, Bolzen.

## 2.3 Modelle für die Tragfähigkeit stiftförmiger Verbindungsmittel

Für die Ermittlung der Grundlagen der mechanischen Eigenschaften der Reparaturverbindung mit einer Holzkeildolle wurden in erster Linie existierende mechanische Modellansätze für Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmittel aus Holz analysiert.

Der Großteil der veröffentlichten mechanischen Modellansätze [11; 13–17] basiert auf der Analyse von auf Abscheren beanspruchten historischen Holznägel. Es wurde somit die Tragfähigkeit der Verbindungen eingeschätzt. Die in den Veröffentlichungen am meisten analysierten zimmermannsmäßigen Verbindungen sind Blatt- und Zapfenverbindungen. Sie sind repräsentativ für jeweils ein- und zweischnittige Verbindungen. Ausgewählte Ergebnisse der existierenden Literatur über „Holznägel“ und „Dübel“ sind in der Tabelle 2-1 und Tabelle 2-2 zusammengefasst. Hier sind die vorgefundenen Parameter und Bemessungsvorschläge für scherbeanspruchte Holznägel in ein- und zweischnittigen Verbindungen nach Autoren sortiert aufgelistet. Müller fasst in seinem Forschungsbericht [12] die Ergebnisse von Ehlbeck, Hättich, Kessel, Augustin, Görlacher, Blaß, Ernst, Werner zusammen und gibt seine eigene Interpretation der Forschungsergebnisse. Die europäische Norm DIN EN 1995-1-1/NA 2013-08 [18] und die Schweizer Norm SIA 269/5:2011 [19] geben mit verschiedenen Hintergründen Bemessungsregeln vor. Die DIN EN 1995 gilt für die Bemessung und Konstruktion von Hochbauten und Ingenieurbauwerken aus Holz, die SIA 269/5 gilt (für die Schweiz) für die Erhaltung von Tragwerken aus Holz als Bestandteil von bestehenden Bauwerken, die unter bestimmten geometrischen Voraussetzungen gelten. Die Bemessungsvorschläge für stiftförmige Verbindungsmittel in diesen analysierten Modellen gelten nur für festgelegte Rahmenbedingungen u.a. Holzarten / Holzfestigkeiten, Durchmesser, Mindestabstände, Mindestdicken, etc. (vgl. Tabelle 2-1).

Weitere analysierte Literatur behandelt die Berechnung der Tragfähigkeiten von Verbindungen mit metallischen stiftförmigen Verbindungsmittel.

Der große Teil der analysierten Literatur basiert auf der Analyse der Tragfähigkeit ein- oder zweischnittiger Verbindungen, spezifisch basierend auf der Johannsen-Theorie [20]. Diese Theorie setzt voraus, dass sich in

dem metallischen Verbindungsmittel ein Fließgelenk bildet, welches bei hölzernen Verbindungsmitteln nicht auftritt. Stattdessen versagen die Holzstifte durch einen spröden Biegebruch. Ein anderer Aspekt, der nur teilweise mit der Johansen-Theorie übereinstimmt, ist die Lochleibung in der Verbindung. Da die historischen Holznägel wegen der Passgenauigkeit beim Eintreiben allseitig anliegen, liegt eher eine elastische Bettung als nur Lochleibung an einer Lochseite vor [11]. Demzufolge muss die Betrachtung der Versuchsergebnisse mit der Form der Johansen-Theorie für die Einschätzung des Verhaltens hölzernen stiftförmigen Verbindungsmitteln kritisch betrachtet werden [14].

Weiterhin wurden von Sjödin et al. [21] das Verhältnis zwischen Lochleibungsfestigkeit im Holzbauteil und der Oberflächenbeschaffenheit der Verbindungsmitteln aus Metall untersucht. Er konkludiert, dass die Oberflächenbeschaffenheit eines Verbindungsmittels, die Art der Holzstauchung sowie die seitliche Verdrängung des Holzes bei einer Beanspruchung in Faserrichtung beeinflusst. Es gilt, je größer die Reibung, desto größer ist die eingedrückte Breite in Faserrichtung. Neben höheren Lochleibungsfestigkeiten zeigten die Ergebnisse aus dieser Studie Unterschiede bei den Bruchbildern. Bei glatten Oberflächen bildete sich nur ein Riss in Faserrichtung aus, während sich bei höherer Rauigkeit der Verbindungsmitteloberfläche zwei parallele Risse ausbildeten. Diese Beobachtung – ursprünglich für Holzverbindungen mit metallischen Verbindungsmitteln festgelegt – wird für die Schlussfolgerungen in dem Abschnitt 3.4 relevant.

**Tabelle 2-1 Zusammenfassung der Material- und Einbauparameter für die Bemessung von ein- und zweischnittigen Verbindungen mit scherbeanspruchten Holznägeln (die Nomenklatur entspricht der der jeweiligen Literaturquelle)**

<b>Bauteil (Holzart)</b>	
Eichenholz $\rho_k \geq 750 \text{ Kg/m}^3$ und Nadelholz $\rho_k \geq 400 \div 500 \text{ Kg/m}^3$	Görlacher, 1989 [16]
Mindestens FK II [22]. (Nach aktueller [23] Norm: C24)	LIGNUM, 1990 [24]
Eichenholz und Fichtenholz	Kessel, Augustin, 1992 [25]
Nadelholz	Blaß et al., 1999 [14]
Holz $\rho_k \geq 380 \text{ Kg/m}^3$	Blaß et al., 2005 [13]
Holz $\rho_k \geq 350 \text{ Kg/m}^3$	DIN EN 1995-1-1: NA 2013-08 [18]
Mindestens C24 (nach aktueller Norm [23]) und rissfrei	SIA 269/5:2011 [19]
Nadelholz	Holzer, 2015 [11]
<b>Holznagel (Holzart)</b>	
Eichenholz (alt und neu) $\rho_k \geq 550 \div 880 \text{ Kg/m}^3$	Görlacher, 1989 [16]
Buche, Eiche, Robinie, Bongossi $\rho_k \geq 650 \text{ Kg/m}^3$	LIGNUM, 1990 [24]
Eichenholz, $\rho_k \geq 570 \text{ Kg/m}^3$ mittlere gute nach DIN 1052 [26]; Fichtenholz min. S10 [27] (1)	Kessel, Augustin, 1992 [25]
Eiche, Buche, Robinie, Bongossi und Esche	Blaß et al., 1999 [14]
Eichenholz	Blaß et al., 2005 [13]
Eiche oder Buche	DIN EN 1995-1-1: NA 2013-08 [18]
Buche oder Eiche riss- und astfrei min. D30 [23]	SIA 269/5:2011 [19]
Eichenholz	Holzer, 2015 [11]
<b>Durchmesser Verbindungsmitte</b>	
20 mm $\leq d \leq 30 \text{ mm}$ ; konstanter Querschnitt, achteckig	Görlacher, 1989 [16]
6 mm $\leq d_D \leq 20 \text{ mm}$ ; konstanter Querschnitt, rund	LIGNUM, 1990 [24]
24 mm $\leq d \leq 40 \text{ mm}$ ; konstanter Querschnitt, achteckig	Kessel, Augustin, 1992 [25]
12 mm $\leq d \leq 30 \text{ mm}$ ; konstanter Querschnitt, rund	Blaß et al., 1999 [14]
20 mm $\leq d \leq 30 \text{ mm}$ ; konstanter Querschnitt, rund oder achteckig	Blaß et al., 2005 [13]
20 mm $\leq d_D \leq 30 \text{ mm}$ ; konstanter Querschnitt, rund oder achteckig (2)	DIN EN 1995-1-1: NA 2013-08 [18]
12 mm $\leq d_D \leq 30 \text{ mm}$ ; konstanter Querschnitt, rund oder achteckig (3)	SIA 269/5:2011 [19]
24 mm $\leq d_D \leq 30 \text{ mm}$	Holzer, 2015 [11]
24 mm $\leq d_D \leq 30 \text{ mm}$ (min. 20 mm) meist achteckig, selten auch 4- und n-eckig, rund	Müller, 2016 [12]
<b>Hirnholzabstand</b>	
$\geq 75 \div 100 \text{ mm}$	Görlacher, 1989 [16]
$\geq 4 \cdot d$ bei Zugstoß	LIGNUM, 1990 [24]
$\geq 5 \cdot d$ bei Druckstoß	
$l_v \geq 1,5 \cdot d \div 2 \cdot d$	Kessel, Augustin, 1992 [25]
$\geq 3 \cdot d_{st}$ nach [26]	Blaß et al., 1999 [14]
$t \geq 2 \cdot d$	Blaß et al., 2005 [13]
$t \geq 2 \cdot d$ (4)	DIN EN 1995-1-1: NA 2013-08 [18]
$t_{i,erf,act} \geq 3 \cdot d$ (5)	SIA 269/5:2011 [19]
$t \geq 3 \cdot d \div 5 \cdot d$	Müller, 2016 [12]
<b>Abstand zwischen Verbindungsmitte und Randabstand</b>	
$\geq 50 \div 75 \text{ mm}$	Görlacher, 1989 [16]
$3 \cdot d_s \leq t \leq 4 \cdot d_s$ (zwischen Verbindungsmitte); $t \geq 2,5 \cdot d_s$ (Randabstand)	LIGNUM, 1990 [24]
$a_e \geq 1,5 \cdot d$ (zwischen Verbindungsmitte); $a_r \geq 2 \cdot d$ (Schwellenrandabstand); $l_v \geq 1,5 \cdot d$	Kessel, Augustin, 1992 [25]
$\geq 3 \cdot d_{st}$ bzw. $\geq 5 \cdot d_{st}$ nach [26] (zwischen Verbindungsmitte)	Blaß et al., 1999 [14]
$\geq 2 \cdot d$	Blaß et al., 2005 [13]
$\geq 2 \cdot d$ (6)	DIN EN 1995-1-1: NA 2013-08 [18]
$\geq 2 \cdot d$ (7)	SIA 269/5:2011 [19]
$t \geq 2 \cdot d$	Müller, 2016 [12]
<b>Mindestdicke Bauteil</b>	
Einschnittige Verbindungen: $b_s = 50 \text{ mm}$ ; Zweischnittige Verbindungen: $b_s = 33 \text{ mm}$	Görlacher, 1989 [16]
Einschnittig: $a = 2,5 \cdot d_s$ ; Mehrschnittig: Aussenholz: $a \geq 2 \cdot d_s$ ; Innenholz: $a \geq 3,33 \cdot d_s$	LIGNUM, 1990 [24]
Zweischnittig: Seitenholz: $t_s \geq 45 \text{ mm}$ ; Mittelholz: $t_m \geq 50 \text{ mm}$	Kessel, Augustin, 1992 [25]
Zweischnittig: Seitenholz: $t_{1,req}$ (vgl. Gl. 6); Mittelholz $t_{2,req}$ (vgl. Gl. 8, Gl. 6)	Blaß et al., 1999 [14]
$t_{req} \geq 2 \cdot d$	Blaß et al., 2005 [13]
$t_{req} \geq 2 \cdot d$	DIN EN 1995-1-1: NA 2013-08 [18]
Ein- oder zweischnittig: Seitenholz: $t_i \geq t_{i,erf,act}$	SIA 269/5:2011 [19]

**Tabelle 2-2 Zusammenfassung der Bemessungsmodelle für die Festigkeit und Steifigkeit von ein- und zweischichtigen Verbindungen mit scherbeanspruchten Holznägeln (die Nomenklatur entspricht der der jeweiligen Literaturquelle)**

Einschätzung der Tragfähigkeit und Verschiebungsmodul	
$N_{zul} = 4 \cdot n \cdot d^2 \cdot \frac{\rho_N}{\rho_{5\%}} \text{ [N]}$ Nach aktueller Norm umgerechnet [12]: $R_k = 9,5 \cdot n \cdot d^2 \cdot \frac{\rho_N}{\rho_{5\%}} \text{ [N]}$ Mit: $n$ = Anzahl Scherfugen; $d$ = Durchmesser des Eichenholznagels [mm]; $\rho_N$ = Rohdichte des Holznagels; $\rho_{5\%}$ = 5%-Fraktilwert der Rohdichte von Eichenholznägeln ( $\rho_{5\%} = 0,57 \text{ g/cm}^3$ ) $C = 1,0 \cdot N_{zul} \text{ [N/mm]}$	Görlacher, 1989 [16]
parallel: $F_{s,p} = 8 \cdot d_s^{1.7} \text{ [N]}$ pro Scherfuge senkrecht: $F_{s,s} = 9 \cdot d_s^{1.5} \text{ [N]}$ pro Scherfuge Nach aktueller Norm umgerechnet [12]: parallel: $R_{k,p} = 19 \cdot d_s^{1.7}$ ; senkrecht: $R_{k,s} = 21 \cdot d_s^{1.5}$ Mit: $d$ = Durchmesser des Eichenholznagels [mm]	Lignum, 1990 [24]
$C_{parallel} = F_{s,p}$ $C_{senkrecht} = 0,5 \cdot C_{parallel}$	
$F_{max} = 0,28 \cdot d - 1,5 \text{ [N]}$ pro Scherfuge Nach aktueller Norm umgerechnet [12]: $R_k = 12 \cdot n \cdot d^2 \cdot \frac{\rho_{HN}}{\rho_{5\%}} \text{ [N]}$ Mit: $d$ = Bohrlochdurchmesser [mm]; $n$ = Anzahl Scherfugen; $\rho_{HN}/\rho_{5\%}$ = Verhältnis der Rohdichte des Eichenholznagels zum 5%-Fraktilwert der Rohdichte ( $570 \text{ kg/m}^3$ ) Verbindungen mit Bauteilen aus Eichenholz: $C = 0,8 \cdot d \text{ [kN/mm]}$ Verbindungen mit Bauteilen aus Fichtenholz: $C = 0,3 \cdot d \text{ [kN/mm]}$	Kessel, Augustin, 1992 [25]
$R_k = \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{(1+\beta)}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{u,k} \cdot \delta \cdot f_{h,1,k} \cdot d} \text{ [N]}$ , pro Scherfuge Mit: [siehe 2.4]	Blaß et al., 1999 [14]
$k_{ser} = 220 \cdot d \text{ [N/mm]}$	
$R_k = 9,5 \cdot d^2 \text{ [N]}$ pro Scherfuge Mit: $d$ = Holznageldurchmesser [mm]	Blaß et al, 2005 [13]
$F_{R_k,red} = F_{R_k} * t_1 / t_{req}$ bzw. $t_2 / t_{req} \text{ [N]}$ pro Scherfuge Mit: $t_1$ = Holzdicke 1; $t_2$ = Holzdicke 2; $t_{req}$ = erforderliche Mindestholzdicke [mm]	DIN EN 1995-1-1: NA 2013-08 [18]
$R_{d,act} = \sqrt{\frac{\beta_{f,act}}{1+\beta_{f,act}}} \cdot \sqrt{M_{u,k,act} \cdot f_{h,1,k,act} \cdot d} \text{ [N]}$ pro Scherfuge Mit Berücksichtigung der Lochleibungsfestigkeit der Seitenhölzer ( $f_{h,1,k,act}$ ); Biegewiderstand ( $M_{u,k,act}$ ); Biegefestigkeit ( $f_{m,k}$ ); effektive Abstände Hirn- und Seitenholz (5) und (7); Winkel zur Faserrichtung; Dicke $t_{i,erf,act}$ der Seitenholzer; Schubfestigkeit der Seitenhölzer; $\beta$ = Verhältnis der Leibungsfestigkeiten vom Seiten- zum Mittelholz; $d$ = Holznageldurchmesser [mm]. Sind die Mindestdicke nicht eingehalten ( $t_i < t_{i,erf,act}$ ) ist $R_{d,act}$ für alle Schnittebenen proportional für das Verhältnis $t_i / t_{i,erf,act}$ zu reduzieren. Vereinfachter Nachweis:	SIA 269/5:2011 [19]
$R_{d,act} = 9 \cdot d^{1.8} \text{ [N]}$ pro Scherfuge. Sofern geforderte Bedingungen erfüllt sind: Vollholz min. Festigkeit C24 [23] mit einem auf Abscheren beanspruchten Holzstift aus Buche oder Eiche min. Festigkeit D30 [23] mit Durchmesser (3) und (5), (7); alle Holzteile Mindestholzdicke $t_i \geq 2 \cdot d$ Eichenholz in Eichenholz: $C = 900 \cdot d \text{ [N/mm]}$ . Mit: $d$ = Holznagel-Durchmesser [mm] Eichenholz in Nadelholz: $C = 450 \cdot d \text{ [N/mm]}$ . Mit: $d$ = Holznagel-Durchmesser [mm]	
Für $d \approx 24\text{mm}$ (unabhängig von den Einzelumständen): $F_{max} \geq 5,0 \text{ kN}$ je Holznagel und Scherfuge	Holzer, 2015 [11]
$C \approx 5,0 \text{ kN/mm}$	

## 2.4 Übertragbarkeit der existierenden Modelle

Ein passender mechanischer Ansatz für stiftförmige Verbindungsmittel bei axialer Zugbeanspruchung wurde in der existierenden Literatur nicht gefunden. Ebenso sind keine Datensätze oder Forschungsergebnisse für Holznägel und Holzdübel bei Zugbeanspruchung in axialer Richtung vorhanden.

Auf der anderen Seite ist das Modell von Blaß [14] ein passender Modellansatz für die Entwicklung eines Nachweises für die Holzkeildolle unter Abscherbeanspruchung. Dieser Modellansatz wurde als Basis für den Nachweis hölzerner stiftförmiger Verbindungsmittel auf Abscherbeanspruchung in der SIA 269/5:2011 [19] verwendet.

Es folgt die Analyse des Berechnungsmodells, publiziert in [14].

In dem Nachweis werden verschiedene Geometrie- und Materialeigenschaften mit definierten Parametern als Rahmenbedingungen definiert. Die Angaben des Nachweises gelten unter folgenden Voraussetzungen:

- Ein- und Zweischnittige Verbindungen ( $n = 1$  oder  $n = 2$ )
- $d = 12 \text{ mm} - 30 \text{ mm}$  (geprüft wurden  $d = 12 \text{ mm}; 20 \text{ mm}; 24 \text{ mm}; 30 \text{ mm}$ )
- Holzstifte aus Eiche, Buche, Robinie, Bongossi und Esche unter Einhaltung der jeweiligen Materialeigenschaften
- Bauteile aus Nadelholz
- Schlankheit  $\lambda_i = t_2/d$        $\lambda_1 = 2; \lambda_2 = 3; \lambda_3 = 4$   
Mit:  $t_2$  = Stärke des Mittelholzes;  $t_1$  = Stärke des Seitenholzes; Das Verhältnis der Mittelholzdicke  $t_2$  zur Seitenholzdicke  $t_1$  wurde bei allen Versuchen konstant gehalten;  $d$ : Dollendurchmesser.
- Die Mindestabstände entsprechen den zulässigen Abständen für Stabdübel nach DIN 1052-2:1988 [26].

Die Einschätzung der Tragfähigkeit für Holzstifte – geltend unter obengenannten Voraussetzungen - lauten:

$$R_k = \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{u,k} \cdot \delta \cdot f_{h,1,k} \cdot d} \quad [N] \quad \text{Gl. 1}$$

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} \quad [-] \quad \text{Gl. 2}$$

$$M_{u,k} = \frac{f_{m,k} \cdot \pi \cdot d^3}{32} \quad [N \cdot mm] \quad \text{Gl. 3}$$

$$\delta = 0,75 \quad [-] \quad \text{Gl. 4}$$

$$f_{h,1,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k \quad \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \quad \text{Gl. 5}$$

Mit:

$\beta$  = Verhältnis der Leibungsfestigkeiten vom Seiten- zum Mittelholz [-] aus SIA 265:2012 Teil 6.1.4.3 [28]

$f_{h,1,k}$  = charakteristische Lochleibungsfestigkeit des Seitenholzes  $1 \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$

$M_{u,k}$  = charakteristisches Biegemoment eines runden Holzstiftes  $[N \cdot mm]$

$f_{m,k}$  = charakteristische Biegefestigkeit des Holzstiftes  $\left[ \frac{N}{mm^2} \right]$  aus Messung des dynamischen Elastizitätsmoduls oder nach Angabe der Biegefestigkeit aus DIN EN 338 [23]

$d$  = Durchmesser des Stiftes  $[mm]$

$\delta$  = Abminderungsbeiwert [-]

$\rho_k$  = Rohdichte Seitenholz  $\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$

Das Modell lässt sich durch den Abminderungsbeiwert  $\delta$  auf die Johansen-Theorie zurückführen. Im Modell berücksichtigt  $\delta$  ungleichmäßige Spannungsverteilungen, das Nicht-Ausnutzen der Lochleibungsfestigkeit und Seileffekte infolge Reibung zwischen Bohrlochwandung und Holzstift.

Diese Nebeneffekte zeigen sich nicht nur in Holzdollen, sondern auch in Holzkeildollen unter Scherbeanspruchung. Die Präsenz des Abminderungsbeiwertes ist deshalb besonders interessant für die Weiterentwicklung dieses Modells für die Holzkeildolle. Denn der Seileffekt in Holzkeildollen zeigt sich wegen der Keilwirkung sogar vergrößert (vgl. 4.3.6).

Des Weiteren wird im Modell festgelegt, dass die durch den Nachweis maximale berechnete charakteristische Tragfähigkeit eines Stiftes pro Scherfuge erreicht wird, wenn die Mindestholzdicken  $t_{i,req}$  eingehalten sind (vgl. Gl. 6, Gl. 7 und Gl. 8).

$$t_{1,req} = \left( 2 \cdot \sqrt{\frac{\beta}{1 + \beta}} + 2 \right) \cdot \sqrt{\frac{M_{u,k}}{\delta \cdot f_{h,1,k} \cdot d}} \quad \text{Mindestholzdicke des Seitenholzes [mm]} \quad \text{Gl. 6}$$

$$t_{2,req} = \left( 2 \cdot \sqrt{\frac{\beta}{1 + \beta}} + 2 \right) \cdot \sqrt{\frac{M_{u,k}}{\delta \cdot f_{h,2,k} \cdot d}} \quad \text{Mindestholzdicke für das Seitenholz 2 einer einschnittigen Verbindung [mm]} \quad \text{Gl. 7}$$

$$t_{2,req} = 4 \cdot \sqrt{\frac{\beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{\frac{M_{u,k}}{\delta \cdot f_{h,2,k} \cdot d}} \quad \text{Mindestholzdicke für das Mittelholz einer zweischnittigen Verbindung [mm]} \quad \text{Gl. 8}$$

Sind die Mittel- oder Seitenhölzer kleiner als die entsprechenden Mindestholzdicken  $t_{i,req}$ , wird die charakteristische Tragfähigkeit nach Gl. 1 abgemindert, in dem sie mit dem kleineren der Verhältniswerte  $\frac{t_i}{t_{i,req}}$  multipliziert wird:

$$R_{k,red} = R_k \cdot \min \left\{ \frac{t_1}{t_{1,req}}, \frac{t_2}{t_{2,req}} \right\} \quad \text{falls } t_i < t_{i,req} \quad [N] \quad \text{Gl. 9}$$

Für den Anfangsverschiebungsmodul  $k_{ser}$  pro Holzstift und Scherfuge wird eine einfache Regressionsgerade abhängig vom Stiftdurchmesser vorgeschlagen:

$$k_{ser} = 220 \cdot d \quad \left[ \frac{N}{mm} \right] \quad \text{Gl. 10}$$

Mit:

$d$  = Durchmesser des Stiftes [mm]

## 2.5 Existierende Reparaturen durch Holzkeildolle (HKD)

### 2.5.1 Einleitung

Einleitend zu den existierenden Reparaturen durch HKD ist eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Analyse eines Dutzend Objekte, in dem die HKD nach *Erfahrungswerten* Jahrzehntelang eingebaut wurden. Die HKD wurden als Verbindungsmittel für Passstücke und zimmermannmäßige Verbindungsmittel in verschiedenen Holztragwerke eingesetzt. Ihre Anwendungsbereiche waren meist in Fachwerkfassaden. Sie wurden aber auch vereinzelt für die Ertüchtigung von Holzbalkenköpfen angewandt. Diese Lösungen wurden nach klassischen zimmermännischen Regeln von Zimmermännern entwickelt und nach Erfahrung eingesetzt, um das Kriterium der denkmalgerechten Sanierung am besten zu realisieren.

### 2.5.2 Anlass für die Untersuchung

Dipl.-Ing. Svenja Siegert und Dipl.-Ing. M.Sc. Architektin Tanja Gockel

Geschäftsführung IGP Gockel PartGmbH - Ingenieure und Architektin.

Anlass zur Entwicklung der Holzkeildolle gab ca. im Jahr 2000 die örtliche Begutachtung von Schäden an Fachwerkfassaden, die ihre Ursache in der Verwendung von diversen Reparaturmaßnahmen wie z.B. kunststoffhaltigen Spritz- und Spachtelmassen, feuchtesperrenden Mörteln und metallischen Verbindungsmitteln hatten.

Die Holzkeildolle wurden seitdem in den vergangenen zwei Jahrzehnten bei einer Vielzahl von Objekten, die durch das Ingenieurbüro IGP Gockel und Vorgängerbüros begleitet wurden, eingebaut. Ihr Anwendungsbereich lag zumeist in der Fassadensanierung von Fachwerkgebäuden. In späteren Jahren wurden auch defekte Sparrenfußpunkte und vereinzelt Deckenbalkenköpfe unter Verwendung der Holzkeildolle als Verbindungsmittel saniert.

Die folgende Objektliste dokumentiert existierende Reparaturen aus diesem Zeitraum. Die Objektliste soll dokumentieren, dass Reparaturen mit der Holzkeildolle material- und denkmalgerecht und gleichzeitig dauerhaft und nachhaltig funktionieren ohne Folgeschäden zu verursachen. Des Weiteren soll sie die früheren Ausführungen hinsichtlich der im Forschungsprojekt zu definierenden Randbedingungen dokumentieren.

Die Archivrecherche<sup>1</sup> hat ergeben, dass in Leistungsverzeichnissen zu Zimmerarbeiten in dem Kapitel „Holzoberflächen instandsetzen“ die Positionen zur Holzkeildolle seit dem Jahr 2000 enthalten waren. Digitales Bildmaterial von der Holzkeildolle wurde bei der Archivrecherche ab dem Jahr 2005 gefunden.

Der bisherige Einbau der Holzkeildolle geschah vorwiegend konstruktiv und ohne das Ziel einer wissenschaftlichen Dokumentation zu genügen. Daher liegt nicht bei allen Objekten der vergangenen 20 Jahre, bei denen die Holzkeildolle eingebaut wurde, ausreichend Dokumentationsmaterial vor. Viele Einbauorte sind zudem nicht mehr einseh- und/ oder erreichbar.

<sup>1</sup> Archiv ehem. Ingenieurbüro Brenker Gockel

### 2.5.3 Objektliste

## Inhaltsverzeichnis der exemplarischen Ausführungsbeispielen von Gebäuden mit der Holzkeildolle:

- Objekt 1 – Rathaus Duderstadt
  - Objekt 2 – Bauernhausmuseum Bortfeld
  - Objekt 3 – Brusttuch Goslar
  - Objekt 4 – Städtisches Museum Göttingen, ehem. Posthalterei
  - Objekt 5 – Café Winuwuk Bad Harzburg
  - Objekt 6 – Rathaus Goslar
  - Objekt 7 – Mönchehaus Museum Goslar
  - Objekt 8 – Haus Kreyenberg Wittingen
  - Objekt 9 – Forsthaus Rittergut Wedesbüttel
  - Objekt 10 – Holbornsches Haus Göttingen
  - Objekt 11 – Höfersches Haus Gifhorn
  - Objekt 12 – Frankenberger Kirche Goslar

## Kurzzeichen der Materialien der Bauteile:

Da die Holzart der Bauteile nicht explizit getestet wird/ wurde, werden folgende Begriffe verwendet:

- NH = Nadelholz
  - LH = Laubholz i. d. R. handelt es sich bei Laubholz um Eiche.

### Kurzzeichen der Materialien der Dollen und Keile:

- EI = Eiche
  - ES = Esche

Die Dollen und Keile sind i. d. R. in Eiche bestellt worden.

### Weitere Abkürzungen und Parameterbeschreibung:

Für die weitere Abkürzungen und die Parameterbeschreibung ist auf Tabelle 2-3 und Abbildung 2-3 zu verweisen.

Einige maßliche Angaben sind ca. Angaben und sind mit \* kennzeichnet. Für die Abkürzungen vgl. Abbildung 2-3.

**OBJEKT 1 – RATHAUS DUDESTADT****OBJEKTBILDER****OBJEKTBESCHREIBUNG**

Name	Rathaus Duderstadt
Kurzbeschreibung	Öffentliches Gebäude – Rathaus
Bauzeit	Massiver Kernbau 1302 / 1303, Fachwerkgeschosse 16. Jahrhundert
Bauweise	Zweischiffiger Saalbau – Erd- und 1. Obergeschoss Massivbauweise,
Einbauzeit der HKD	2005 bis ca. 2008

**HOLZKEILDOLLE AM OBJEKT**

Holzkeildolle in der Anwendung:	Am Objekt ausgeführt? X = ja
Ständer- oder Streben-Teilaustausch	X
Ständer- oder Streben-Passstück	
Schwellen-Teilaustausch	
Schwellen-Passstück	
Rähm-Teilaustausch	
Rähm-Passstück	
Riegel-Teilaustausch	X
Riegel-Passstück	X
Sparren-Teilaustausch	
Sparren-Passstück	X
Ergänzungsbauteil	
Lagesicherung	

**OBJEKT 1 – RATHAUS DUDESTADT****SPARREN-PASSSTÜCK (FASSADE)****ALLG. PARAMETER DER REPARATUR****Passstück**

Material Bauteil Bestand NH

Material Bauteil Ersatz NH

Material Dollen EI

Material Keile EI

Anzahl HKD in der Reparatur 4

Dollendurchmesser [mm] 16\*

Breite des Bauteils [mm] 200\*

Höhe des Bauteils [mm] 300\*

**SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE**

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]		5*						
$\Theta$ [°]		90*						
$\Phi$ [°]		30*						
$min a_1$ [mm]		250*						
$min a_2$ [mm]		140*						
$min a_3$ [mm]		2,5d <sub>D</sub> *						
$min a_4$ [mm]		1d <sub>D</sub> *						
$min a_r$ [mm]		-						

**BESONDERHEITEN**

\*) Maße geschätzt

**OBJEKT 1 – RATHAUS DUDESTADT****SPARREN-PASSSTÜCKE (FASSADE)****ALLG. PARAMETER DER REPARATUR**

Passstück

Material Bauteil Bestand

NH

Material Bauteil Ersatz

NH

Material Dollen

EI

Material Keile

EI

Anzahl HKD in der Reparatur

2

Dollendurchmesser [mm]

Breite des Bauteils [mm]

Höhe des Bauteils [mm]

**SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE**

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]								
$\Theta$ [°]								
$\Phi$ [°]								
$min a_1$ [mm]								
$min a_2$ [mm]								
$min a_3$ [mm]								
$min a_4$ [mm]								
$min a_r$ [mm]								
<b>BESONDERHEITEN</b>								
*) Maße geschätzt								

**OBJEKT 1 – RATHAUS DUDERSTADT****STREBEN-TEILAUSTAUSCH (FASSADE)****ALLG. PARAMETER DER REPARATUR**

Teilaustausch

Material Bauteil Bestand LH

Material Bauteil Ersatz LH

Material Dollen EI

Material Keile EI

Anzahl HKD in der Reparatur 2

Dollendurchmesser [mm] 30\*

Breite des Bauteils [mm] 200\*

Höhe des Bauteils [mm] 200\*

**SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE**

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	5*	5*						
$\Theta$ [°]	90	90						
$\Phi$ [°]	0	0						
$min\ a_1$ [mm]	100*	100*						
$min\ a_2$ [mm]	-	-						
$min\ a_3$ [mm]	30*	20*						
$min\ a_4$ [mm]	15*	15*						
$min\ a_r$ [mm]	-	-						

**BESONDERHEITEN**

\*) Maße geschätzt

**OBJEKT 1 – RATHAUS DUDESTADT****RIEGEL-PASSSTÜCK (FASSADE)****ALLG. PARAMETER DER REPARATUR****Passstück**

Material Bauteil Bestand	LH
Material Bauteil Ersatz	LH
Material Dollen	EI
Material Keile	EI
Anzahl HKD in der Reparatur	4
Dollendurchmesser [mm]	15*
Breite des Bauteils [mm]	250*
Höhe des Bauteils [mm]	200*

**SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE**

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	5*	5*	5*	5*				
$\Theta$ [°]	90	90	-	15*				
$\Phi$ [°]	90	90	90	90				
$min\ a_1$ [mm]	125*	125*	130*	130*				
$min\ a_2$ [mm]	80*	80*	80*	80*				
$min\ a_3$ [mm]	65*	70*	65*	65*				
$min\ a_4$ [mm]	55*	55*	55*	55*				
$min\ a_r$ [mm]	-	-	-	-				

**BESONDERHEITEN**

\*) Maße geschätzt

**OBJEKT 1 – RATHAUS DUDESTADT****RIEGEL-TEILAUSTAUSCH, RIEGEL-PASSSTÜCK (FASSADE)****ALLG. PARAMETER DER REPARATUR**

Teilaustausch, Passstück

Material Bauteil Bestand LH

Material Bauteil Ersatz LH

Material Dollen EI

Material Keile EI

Anzahl HKD in der Reparatur 2/ ≥4

Dollendurchmesser [mm] 30\*

Breite des Bauteils [mm] 200\*

Höhe des Bauteils [mm] 200\*

**SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE**

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	5*	5*						
Θ [°]	30*	30*						
Φ [°]	0	0						
min $a_1$ [mm]	90*	90*						
min $a_2$ [mm]	-	-						
min $a_3$ [mm]	15*	65*						
min $a_4$ [mm]	20*	20*						
min $a_r$ [mm]	-	-						

**BESONDERHEITEN**

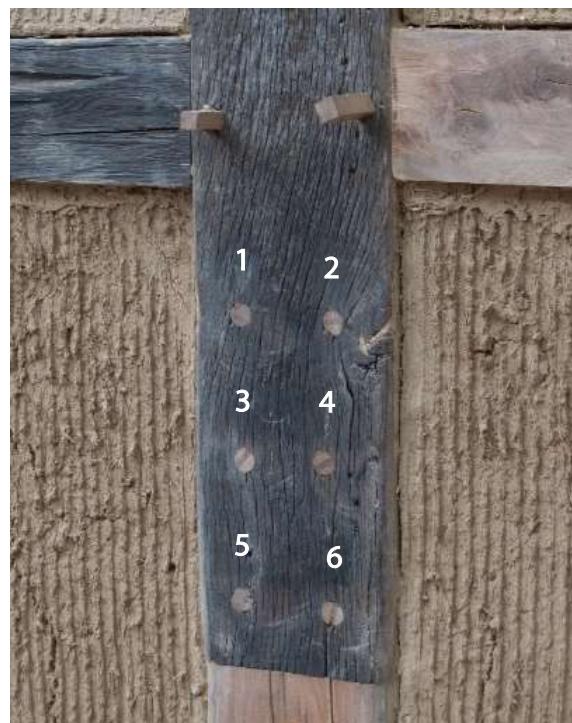
\*) Maße geschätzt

**OBJEKT 2 – BAUERNHAUSMUSEUM BORTFELD****OBJEKTBILDER****OBJEKTBESCHREIBUNG**

Name	Bauernhausmuseum Bortfeld
Kurzbeschreibung	Öffentliches Gebäude – Museum
Bauzeit	Kernbau von 1639 (d)
Bauweise	Ständerbauweise
Einbauzeit der HKD	2008 und 2017

**HOLZKEILDOLLE AM OBJEKT**

Holzkeildolle in der Anwendung:	Am Objekt ausgeführt? X = ja
Ständer- oder Streben-Teilaustausch	X
Ständer- oder Streben-Passstück	X
Schwellen-Teilaustausch	X
Schwellen-Passstück	
Rähm-Teilaustausch	X
Rähm-Passstück	
Riegel-Teilaustausch	
Riegel-Passstück	
Sparren-Teilaustausch	
Sparren-Passstück	X (Deckenbalken)
Ergänzungsbauteil	X
Lagesicherung	

**OBJEKT 2 – BAUERNHAUSMUSEUM BORTFELD****STÄNDER-TEILAUSTAUSCH (FASSADE)****ALLG. PARAMETER DER REPARATUR****Teilaustausch, Blattverbindung**

Material Bauteil Bestand LH

Material Bauteil Ersatz LH

Material Dollen EI

Material Keile EI

Anzahl HKD in der Reparatur 6

Dollendurchmesser [mm] 20

Breite des Bauteils [mm] 205

Höhe des Bauteils [mm] 1395

**SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE**

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	4	5	5	5	5	5		
$\Theta$ [°]	90	30	65	45	70	45		
$\Phi$ [°]	30	80	30	45	35	15		
$min\ a_1$ [mm]	135	130	130	140	-	-		
$min\ a_2$ [mm]	95	95	81	80	92	90		
$min\ a_3$ [mm]	-	-	-	-	63	60		
$min\ a_4$ [mm]	25	30	30	50	30	40		
$min\ a_r$ [mm]	-	-	-	-	-	-		

**BESONDERHEITEN**

\*) Maße geschätzt

## OBJEKT 2 – BAUERNHAUSMUSEUM BORTFELD

## STÄNDER-PASSTÜCK (FASSADE)



## ALLG. PARAMETER DER REPARATUR

## Passtück

Material Bauteil Bestand	LH
Material Bauteil Ersatz	LH
Material Dollen	EI
Material Keile	EI
Anzahl HKD in der Reparatur	3
Dollendurchmesser [mm]	20*
Breite des Bauteils [mm]	-
Höhe des Bauteils [mm]	50*

## SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	5*							
$\Theta$ [°]	90*							
$\Phi$ [°]	45							
$min\ a_1$ [mm]	-							
$min\ a_2$ [mm]	-							
$min\ a_3$ [mm]	-							
$min\ a_4$ [mm]	-							
$min\ a_r$ [mm]	-							

## BESONDERHEITEN

\*) Maße geschätzt

## OBJEKT 2 – BAUERNHAUSMUSEUM BORTFELD

## SCHWELLEN-TEILAUSTAUSCH (FASSADE)



## ALLG. PARAMETER DER REPARATUR

Teilaustausch, Blattverbindung

Material Bauteil Bestand LH

Material Bauteil Ersatz LH

Material Dollen EI

Material Keile EI

Anzahl HKD in der Reparatur 2

Dollendurchmesser [mm] 20\*

Breite des Bauteils [mm] -

Höhe des Bauteils [mm] 250\*

## SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	5*	-						
$\Theta$ [°]	-	-						
$\Phi$ [°]	90*	-						
$min a_1$ [mm]	$4d_D^*$	$4d_D^*$						
$min a_2$ [mm]	$3d_D^*$	$3d_D^*$						
$min a_3$ [mm]	$6d_D^*$	$2d_D^*$						
$min a_4$ [mm]	$2d_D^*$	$2d_D^*$						
$min a_r$ [mm]	-	-						

## BESONDERHEITEN

\*) Maße geschätzt

**OBJEKT 2 – BAUERNHAUSMUSEUM BORTFELD****STÄNDER-TEILAUSTAUSCH (INNENRAUM)****ALLG. PARAMETER DER REPARATUR**

Teilaustausch, Blattverbindung

Material Bauteil Bestand LH

Material Bauteil Ersatz LH

Material Dollen EI

Material Keile EI

Anzahl HKD in der Reparatur 3

Dollendurchmesser [mm] 20

Breite des Bauteils [mm] 95

Höhe des Bauteils [mm] 750

**SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE**

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	4	4	5					
$\Theta$ [°]	45	45	80					
$\Phi$ [°]	30	55	25					
$min a_1$ [mm]	150	140	-					
$min a_2$ [mm]	-	-	-					
$min a_3$ [mm]	93	-	300					
$min a_4$ [mm]	15	35	28					
$min a_r$ [mm]	-	-	-					

**BESONDERHEITEN**

\*) Maße geschätzt

## OBJEKT 2 – BAUERNHAUSMUSEUM BORTFELD

## ERGÄNZUNGSBAUTEIL (INNENRAUM)



## ALLG. PARAMETER DER REPARATUR

## Ergänzungsbauteil Klappstiel

Material Bauteil Bestand	LH
Material Bauteil Ersatz	LH
Material Dollen	EI
Material Keile	EI
Anzahl HKD in der Reparatur	2
Dollendurchmesser [mm]	20*
Breite des Bauteils [mm]	-
Höhe des Bauteils [mm]	250*

## SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	5*	5*						
$\Theta$ [°]	45	0						
$\Phi$ [°]	45	45						
$min a_1$ [mm]	-	-						
$min a_2$ [mm]	$6d_D^*$	$6d_D^*$						
$min a_3$ [mm]	-	-						
$min a_4$ [mm]	$2d_D^*$	$2d_D^*$						
$min a_r$ [mm]	-	-						

## BESONDERHEITEN

\*) Maße geschätzt



## OBJEKT 2 – BAUERNHAUSMUSEUM BORTFELD

## RÄHM-TEILAUSTAUSCH (INNENRAUM)



## ALLG. PARAMETER DER REPARATUR

## Teilaustausch

Material Bauteil Bestand	LH
Material Bauteil Ersatz	LH
Material Dollen	EI
Material Keile	EI
Anzahl HKD in der Reparatur	2
Dollendurchmesser [mm]	20*
Breite des Bauteils [mm]	-
Höhe des Bauteils [mm]	-

## SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	5*	5*						
$\Theta$ [°]	30	90						
$\Phi$ [°]	45	45						
$min a_1$ [mm]	-	-						
$min a_2$ [mm]	-	-						
$min a_3$ [mm]	-	-						
$min a_4$ [mm]	$2d_D^*$	$2d_D^*$						
$min a_r$ [mm]	-	-						

## BESONDERHEITEN

\*) Maße geschätzt

**OBJEKT 2 – BAUERNHAUSMUSEUM BORTFELD****SCHWELLEN-TEILAUSTAUSCH (INNENRAUM)****ALLG. PARAMETER DER REPARATUR****Teilaustausch**

Material Bauteil Bestand	LH
Material Bauteil Ersatz	LH
Material Dollen	EI
Material Keile	EI
Anzahl HKD in der Reparatur	4
Dollendurchmesser [mm]	20
Breite des Bauteils [mm]	*
Höhe des Bauteils [mm]	**

**SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE**

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	5	5	6	6				
$\Theta$ [°]	30	90	55	90				
$\Phi$ [°]	45	30	60	65				
$min\ a_1$ [mm]	75	75	90	90				
$min\ a_2$ [mm]	190	190	190	190				
$min\ a_3$ [mm]	50	25	47	70				
$min\ a_4$ [mm]	95	63	92	112				
$min\ a_r$ [mm]	-	-	-	-				

**BESONDERHEITEN**

\*) Maße geschätzt

\*Breite des linken Bauteils ca. 2550 mm

\*Breite des rechten oberen Bauteils ca. 430 mm

\*Breite des rechten unteren Bauteils ca. 2000 mm

\*\*Höhe des linken Bauteils ca. 160 mm

\*\*Höhe des rechten oberen Bauteils ca. 94 mm

\*\*Höhe des rechten unteren Bauteils ca. 120 mm

## OBJEKT 2 – BAUERNHAUSMUSEUM BORTFELD

## DECKENBALKEN-PASSSTÜCK (INNENRAUM)



## ALLG. PARAMETER DER REPARATUR

## Passstück

Material Bauteil Bestand	LH
Material Bauteil Ersatz	LH
Material Dollen	EI
Material Keile	EI
Anzahl HKD in der Reparatur	3
Dollendurchmesser [mm]	30*
Breite des Bauteils [mm]	120*
Höhe des Bauteils [mm]	180*

## SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]								
$\Theta$ [°]								
$\Phi$ [°]								
$min\ a_1$ [mm]								
$min\ a_2$ [mm]								
$min\ a_3$ [mm]								
$min\ a_4$ [mm]								
$min\ a_r$ [mm]								

## BESONDERHEITEN

\*) Maße geschätzt

**OBJEKT 2 – BAUERNHAUSMUSEUM BORTFELD****ERGÄNZUNGSBAUTEIL (DACHRAUM)****ALLG. PARAMETER DER REPARATUR**

Sicherung Bestandssparren nach Brand	
Material Bauteil Bestand	LH
Material Bauteil Ersatz	NH
Material Dollen	EI
Material Keile	EI
Anzahl HKD in der Reparatur	1/a
Dollendurchmesser [mm]	20*
Breite des Bauteils [mm]	160*
Höhe des Bauteils [mm]	160*

**SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE**

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	5*							
$\Theta$ [°]	90							
$\Phi$ [°]	90							
$min\ a_1$ [mm]	-							
$min\ a_2$ [mm]	-							
$min\ a_3$ [mm]	-							
$min\ a_4$ [mm]	-							
$min\ a_r$ [mm]	-							

**BESONDERHEITEN**

\*) Maße geschätzt

**OBJEKT 3 – BRUSTTUCH GOSLAR****OBJEKTBILDER****OBJEKTBESCHREIBUNG**

Name	Brusttuch Goslar
Kurzbeschreibung	Öffentliches Gebäude – Hotel und Restaurant
Bauzeit	1521
Bauweise	Patrizierhaus – Erdgeschoss Massivbauweise,
Einbauzeit der HKD	2010 / 2011

**HOLZKEILDOLLE AM OBJEKT**

Holzkeildolle in der Anwendung:	Am Objekt ausgeführt? X = ja
Ständer- oder Streben-Teilaustausch	
Ständer- oder Streben-Passstück	X
Schwellen-Teilaustausch	
Schwellen-Passstück	
Rähm-Teilaustausch	
Rähm-Passstück	X
Riegel-Teilaustausch	
Riegel-Passstück	
Sparren-Teilaustausch	
Sparren-Passstück	
Ergänzungsbauteil	
Lagesicherung	X

## OBJEKT 3 – BRUSTTUCH GOSLAR

## STÄNDER-PASSSTÜCK (FASSADE)



## ALLG. PARAMETER DER REPARATUR

## Passstück (mit Schnitzwerk)

Material Bauteil Bestand LH

Material Bauteil Ersatz LH

Material Dollen EI

Material Keile EI

Anzahl HKD in der Reparatur ≥4

Dollendurchmesser [mm] 30\*

Breite des Bauteils [mm] ≥300\*

Höhe des Bauteils [mm] ≥300\*

## SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	5*	5*	5*	5*				
Θ [°]	60	90	45	0				
Φ [°]	90	30	30	30				
min $a_1$ [mm]	-	4d <sub>D</sub> *	-	4d <sub>D</sub> *				
min $a_2$ [mm]	3d <sub>D</sub> *	3d <sub>D</sub> *	3d <sub>D</sub> *	3d <sub>D</sub> *				
min $a_3$ [mm]	5*	15*	3d <sub>D</sub> *	2d <sub>D</sub> *				
min $a_4$ [mm]	-	-	-	-				
min $a_r$ [mm]	-	-	-	-				

## BESONDERHEITEN

\*) Maße geschätzt

**OBJEKT 3 – BRUSTTUCH GOSLAR****RÄHM-PASSSTÜCK (FASSADE)****ALLG. PARAMETER DER REPARATUR****Passstück**

Material Bauteil Bestand	NH
Material Bauteil Ersatz	NH
Material Dollen	EI
Material Keile	EI
Anzahl HKD in der Reparatur	4
Dollendurchmesser [mm]	20*
Breite des Bauteils [mm]	160*
Höhe des Bauteils [mm]	160*

**SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE**

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	-	-	-	-				
$\Theta$ [°]	-	-	-	-				
$\Phi$ [°]	-	-	-	-				
$min a_1$ [mm]	-	-	-	-				
$min a_2$ [mm]	$2d_D^*$	$2d_D^*$	$2d_D^*$	$2d_D^*$				
$min a_3$ [mm]	-	-	-	-				
$min a_4$ [mm]	$3/2d_D^*$	$3/2d_D^*$	$3/2d_D^*$	$3/2d_D^*$				
$min a_r$ [mm]	-	-	-	-				

**BESONDERHEITEN**

\*) Maße geschätzt

## OBJEKT 3 – BRUSTTUCH GOSLAR

## LAGESICHERUNG (FASSADE)



## ALLG. PARAMETER DER REPARATUR

Lagesicherung Knagge

Material Bauteil Bestand LH

Material Bauteil Ersatz LH

Material Dollen EI

Material Keile EI

Anzahl HKD in der Reparatur -

Dollendurchmesser [mm] 20\*

Breite des Bauteils [mm] 240\*

Höhe des Bauteils [mm] -

## SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]								
$\Theta$ [°]								
$\Phi$ [°]								
$min\ a_1$ [mm]								
$min\ a_2$ [mm]								
$min\ a_3$ [mm]								
$min\ a_4$ [mm]								
$min\ a_r$ [mm]								
BESONDERHEITEN								
*) Maße geschätzt								

## OBJEKT 4 – STÄDTISCHES MUSEUM GÖTTINGEN, EHEM. POSTHALTEREI

## OBJEKTBILDER

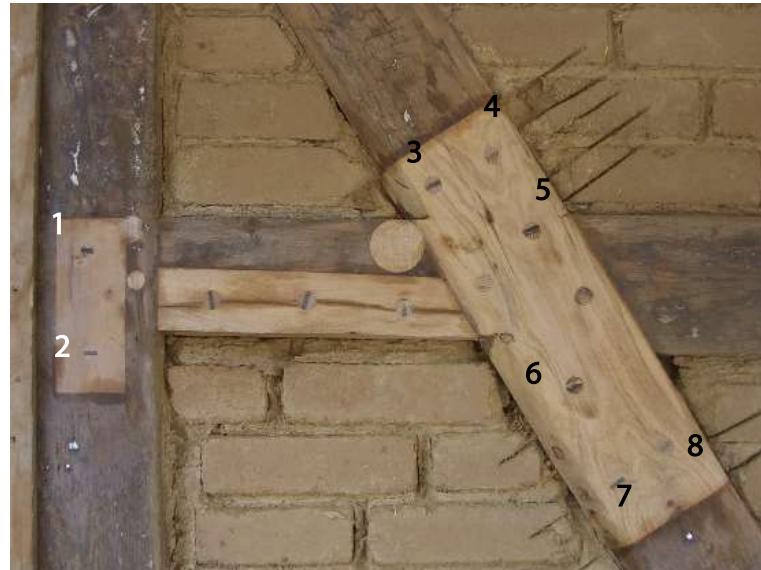


## OBJEKTBESCHREIBUNG

Name	Städtisches Museum Göttingen, ehem. Posthalterei
Kurzbeschreibung	Öffentliches Gebäude – Museum
Bauzeit	1712 (d)
Bauweise	Fachwerkbauweise
Einbauzeit der HKD	2010 / 2011

## HOLZKEILDOLLE AM OBJEKT

Holzkeildolle in der Anwendung:	Am Objekt ausgeführt? X = ja
Ständer- oder Streben-Teilaustausch	
Ständer- oder Streben-Passstück	X
Schwellen-Teilaustausch	
Schwellen-Passstück	X
Rähm-Teilaustausch	
Rähm-Passstück	X
Riegel-Teilaustausch	
Riegel-Passstück	X
Sparren-Teilaustausch	
Sparren-Passstück	
Ergänzungsbauteil	
Lagesicherung	

**OBJEKT 4 – STÄDTISCHES MUSEUM GÖTTINGEN, EHEM. POSTHALTEREI**
**STÄNDER-, STREBEN-, RIEGEL-PASSSTÜCKE (FASSADE)**

**ALLG. PARAMETER DER REPARATUR**
**Passstücke**

Material Bauteil Bestand	LH
Material Bauteil Ersatz	LH
Material Dollen	EI
Material Keile	EI
Anzahl HKD in der Reparatur	≥2
Dollendurchmesser [mm]	16-20*
Breite des Bauteils [mm]	-
Höhe des Bauteils [mm]	-

**SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE**

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	5*	5*	5*	5*	5*	5*	5*	5*
Θ [°]	45	0	45	45	45	45	45	45
Φ [°]	90	90	90	90	90	90	90	90
min $a_1$ [mm]	-	-	-	-	-	-	-	-
min $a_2$ [mm]	-	-	3d <sub>D</sub> *	3d <sub>D</sub> *	-	-	3d <sub>D</sub> *	3d <sub>D</sub> *
min $a_3$ [mm]	2d <sub>D</sub> *	2d <sub>D</sub> *	2d <sub>D</sub> *	2d <sub>D</sub> *	-	-	3d <sub>D</sub> *	3d <sub>D</sub> *
min $a_4$ [mm]	2d <sub>D</sub> *	3d <sub>D</sub> *	2d <sub>D</sub> *	2d <sub>D</sub> *				
min $a_r$ [mm]	-	-	-	-	-	-	-	-

**BESONDERHEITEN**

\*) Maße geschätzt

## OBJEKT 4 – STÄDTISCHES MUSEUM GÖTTINGEN, EHEM. POSTHALTEREI

## RÄHM-PASSSTÜCK (FASSADE)



## ALLG. PARAMETER DER REPARATUR

## Passstück

Material Bauteil Bestand	LH
Material Bauteil Ersatz	LH
Material Dollen	EI
Material Keile	EI
Anzahl HKD in der Reparatur	2
Dollendurchmesser [mm]	16*
Breite des Bauteils [mm]	-
Höhe des Bauteils [mm]	-

## SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	-	-						
$\Theta$ [°]	45	45						
$\Phi$ [°]	90	90						
$min\ a_1$ [mm]	-	-						
$min\ a_2$ [mm]	-	-						
$min\ a_3$ [mm]	$3d_D^*$	$3d_D^*$						
$min\ a_4$ [mm]	$3/2d_D^*$	$3/2d_D^*$						
$min\ a_r$ [mm]	-	-						
BESONDERHEITEN								
*) Maße geschätzt								

## OBJEKT 4 – STÄDTISCHES MUSEUM GÖTTINGEN, EHEM. POSTHALTEREI

## SCHWELLEN-PASSSTÜCKE (FASSADE)



## ALLG. PARAMETER DER REPARATUR

## Passstücke

Material Bauteil Bestand

-

Material Bauteil Ersatz

-

Material Dollen

EI

Material Keile

EI

Anzahl HKD in der Reparatur

≥2

Dollendurchmesser [mm]

-

Breite des Bauteils [mm]

-

Höhe des Bauteils [mm]

-

## SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	-	-						
$\Theta$ [°]	-	-						
$\Phi$ [°]	90	90						
$min\ a_1$ [mm]	-	-						
$min\ a_2$ [mm]	-	-						
$min\ a_3$ [mm]	$2d_D^*$	$2d_D^*$						
$min\ a_4$ [mm]	$3/2d_D^*$	$3/2d_D^*$						
$min\ a_r$ [mm]	-	-						

## BESONDERHEITEN

\*) Maße geschätzt

**OBJEKT 4 – STÄDTISCHES MUSEUM GÖTTINGEN, EHEM. POSTHALTEREI****STÄNDER-PASSSTÜCK (FASSADE)****ALLG. PARAMETER DER REPARATUR****Passtücke**

Material Bauteil Bestand	-
Material Bauteil Ersatz	-
Material Dollen	EI
Material Keile	EI
Anzahl HKD in der Reparatur	1
Dollendurchmesser [mm]	15
Breite des Bauteils [mm]	50
Höhe des Bauteils [mm]	78

**SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE**

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	5							
$\Theta$ [°]	75							
$\Phi$ [°]	75							
$min\ a_1$ [mm]	-							
$min\ a_2$ [mm]	-							
$min\ a_3$ [mm]	35							
$min\ a_4$ [mm]	25							
$min\ a_r$ [mm]	-							

**BESONDERHEITEN**

\*) Maße geschätzt

**OBJEKT 4 – STÄDTISCHES MUSEUM GÖTTINGEN, EHEM. POSTHALTEREI**
**STREBEN-PASSSTÜCK (FASSADE)**

**ALLG. PARAMETER DER REPARATUR**
**Passtücke**

Material Bauteil Bestand

-

Material Bauteil Ersatz

-

Material Dollen

EI

Material Keile

EI

Anzahl HKD in der Reparatur

6

Dollendurchmesser [mm]

20

Breite des Bauteils [mm]

505

Höhe des Bauteils [mm]

140\*

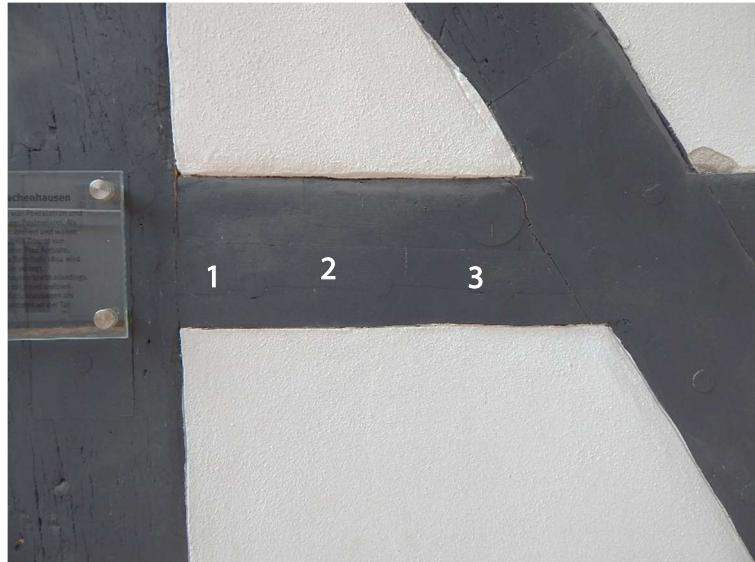
**SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE**

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	50	60	50	-	50	40		
$\Theta$ [°]	70	90	30	45	15	0		
$\Phi$ [°]	90	90	85	75	90	90		
$min\ a_1$ [mm]	95	95	180	120	120	120		
$min\ a_2$ [mm]	75	75	-	-	70	70		
$min\ a_3$ [mm]	45	54	-	-	70	74		
$min\ a_4$ [mm]	20	24	35	35	20	35		
$min\ a_r$ [mm]	-	-	-	-	-	-		

**BESONDERHEITEN**

\*) Maße geschätzt

Höhe der Strebe im Bereich Riegel 185 mm

**OBJEKT 4 – STÄDTISCHES MUSEUM GÖTTINGEN, EHEM. POSTHALTEREI****RIEGEL-PASSSTÜCK (FASSADE)****ALLG. PARAMETER DER REPARATUR****Passtücke**

Material Bauteil Bestand

-

Material Bauteil Ersatz

-

Material Dollen

EI

Material Keile

EI

Anzahl HKD in der Reparatur

3

Dollendurchmesser [mm]

20

Breite des Bauteils [mm]

340

Höhe des Bauteils [mm]

70

**SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE**

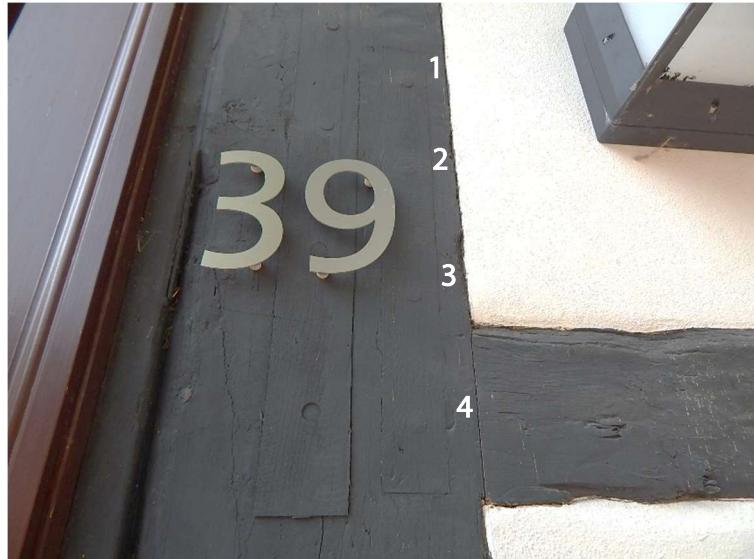
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	5	5	6					
$\Theta$ [°]	50	40	90					
$\Phi$ [°]	80	70	70					
$min\ a_1$ [mm]	3	-	5					
$min\ a_2$ [mm]	107	110	-					
$min\ a_3$ [mm]	35	32	30					
$min\ a_4$ [mm]	61	-	63					
$min\ a_r$ [mm]	-	-	-					

**BESONDERHEITEN**

\*) Maße geschätzt

## OBJEKT 4 – STÄDTISCHES MUSEUM GÖTTINGEN, EHEM. POSTHALTEREI

## STÄNDER-PASSSTÜCKE (FASSADE), RECHTES PASSSTÜCK



## ALLG. PARAMETER DER REPARATUR

## Passstücke

Material Bauteil Bestand	-
Material Bauteil Ersatz	-
Material Dollen	EI
Material Keile	EI
Anzahl HKD in der Reparatur	4
Dollendurchmesser [mm]	15
Breite des Bauteils [mm]	56
Höhe des Bauteils [mm]	52

## SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	4	5	4	5				
$\Theta$ [°]	-	-	90	45				
$\Phi$ [°]	90	75	30	80				
$min a_1$ [mm]	137	150	123	-				
$min a_2$ [mm]	-	-	-	-				
$min a_3$ [mm]	65	-	-	55				
$min a_4$ [mm]	25	26	25	26				
$min a_r$ [mm]	-	-	-	-				

## BESONDERHEITEN

\*) Maße geschätzt

**OBJEKT 4 – STÄDTISCHES MUSEUM GÖTTINGEN, EHEM. POSTHALTEREI****STÄNDER-PASSSTÜCK (FASSADE)****ALLG. PARAMETER DER REPARATUR****Passtücke**

Material Bauteil Bestand

-

Material Bauteil Ersatz

-

Material Dollen

EI

Material Keile

EI

Anzahl HKD in der Reparatur

2

Dollendurchmesser [mm]

15

Breite des Bauteils [mm]

63

Höhe des Bauteils [mm]

340

**SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE**

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	5	4						
$\Theta$ [°]	90	15						
$\Phi$ [°]	80	90						
$min\ a_1$ [mm]	278	278						
$min\ a_2$ [mm]	-	-						
$min\ a_3$ [mm]	20	44						
$min\ a_4$ [mm]	31	30						
$min\ a_r$ [mm]	-	-						

**BESONDERHEITEN**

\*) Maße geschätzt

## OBJEKT 4 – STÄDTISCHES MUSEUM GÖTTINGEN, EHEM. POSTHALTEREI

## RÄHM-PASSSTÜCK (FASSADE)



## ALLG. PARAMETER DER REPARATUR

## Passstücke

Material Bauteil Bestand

-

Material Bauteil Ersatz

-

Material Dollen

EI

Material Keile

EI

Anzahl HKD in der Reparatur

4

Dollendurchmesser [mm]

15

Breite des Bauteils [mm]

580

Höhe des Bauteils [mm]

\*

## SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	6	6	6	6				
$\Theta$ [°]	70	90	-	-				
$\Phi$ [°]	90	85	85	-				
$min a_1$ [mm]	144	170	142	-				
$min a_2$ [mm]	-	-	-	-				
$min a_3$ [mm]	0	25	28	25				
$min a_4$ [mm]	58	20	-	60				
$min a_r$ [mm]	-	-	-	-				

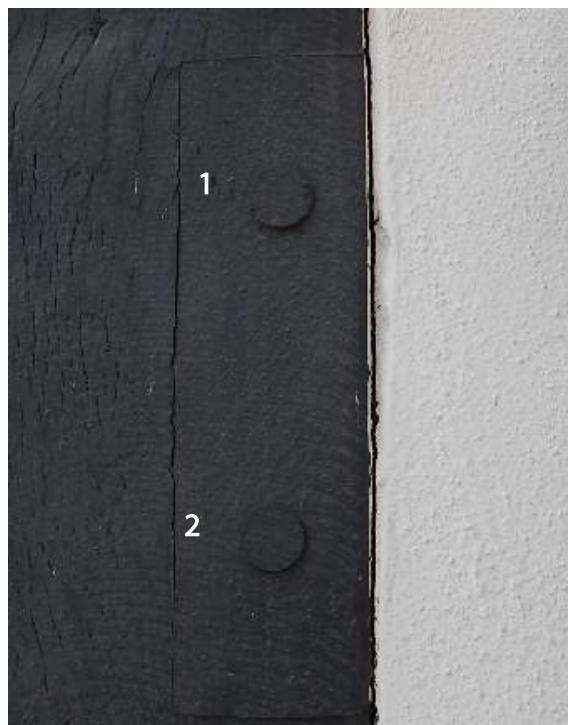
## BESONDERHEITEN

\*) Maße geschätzt

Höhe links ~35 mm, Höhe rechts ~56 mm

## OBJEKT 4 – STÄDTISCHES MUSEUM GÖTTINGEN, EHEM. POSTHALTEREI

## STÄNDER-PASSSTÜCK (FASSADE)



## ALLG. PARAMETER DER REPARATUR

## Passstücke

Material Bauteil Bestand	-
Material Bauteil Ersatz	-
Material Dollen	EI
Material Keile	EI
Anzahl HKD in der Reparatur	2
Dollendurchmesser [mm]	15
Breite des Bauteils [mm]	50
Höhe des Bauteils [mm]	171

## SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE

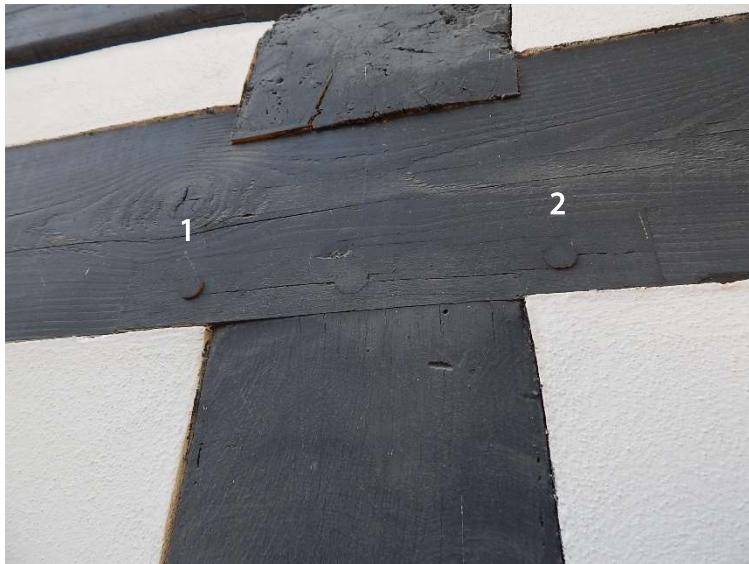
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	4	5						
$\Theta$ [°]	40	45						
$\Phi$ [°]	90	90						
$min a_1$ [mm]	90	90						
$min a_2$ [mm]	-	-						
$min a_3$ [mm]	40	43						
$min a_4$ [mm]	22	23						
$min a_r$ [mm]	-	-						

## BESONDERHEITEN

\*) Maße geschätzt

## OBJEKT 4 – STÄDTISCHES MUSEUM GÖTTINGEN, EHEM. POSTHALTEREI

## RÄHM-PASSSTÜCK (FASSADE)



## ALLG. PARAMETER DER REPARATUR

## Passstücke

Material Bauteil Bestand	-
Material Bauteil Ersatz	-
Material Dollen	EI
Material Keile	EI
Anzahl HKD in der Reparatur	2
Dollendurchmesser [mm]	15
Breite des Bauteils [mm]	334
Höhe des Bauteils [mm]	50

## SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE

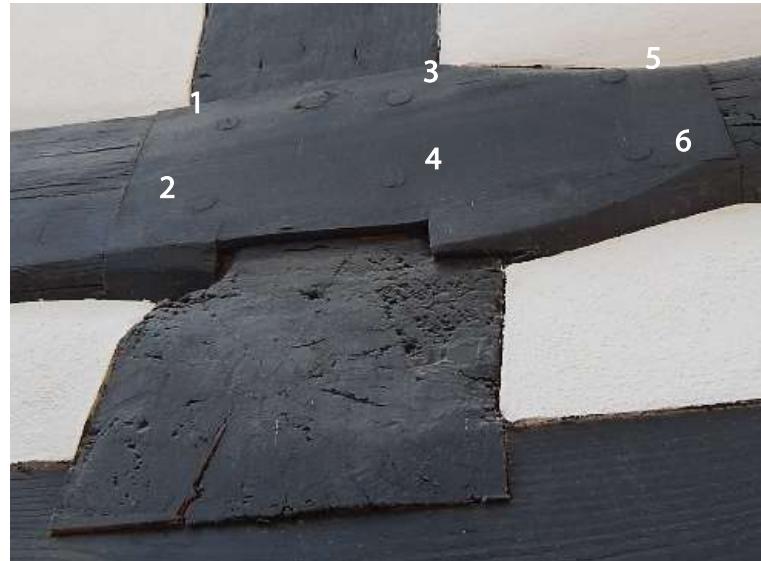
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	5	-						
$\Theta$ [°]	90	-						
$\Phi$ [°]	85	-						
$min\ a_1$ [mm]	235	235						
$min\ a_2$ [mm]	-	-						
$min\ a_3$ [mm]	21	24						
$min\ a_4$ [mm]	50	48						
$min\ a_r$ [mm]	-	-						

## BESONDERHEITEN

\*) Maße geschätzt

## OBJEKT 4 – STÄDTISCHES MUSEUM GÖTTINGEN, EHEM. POSTHALTEREI

## SCHWELLEN-PASSSTÜCK (FASSADE)



## ALLG. PARAMETER DER REPARATUR

## Passtücke

Material Bauteil Bestand

-

Material Bauteil Ersatz

-

Material Dollen

EI

Material Keile

EI

Anzahl HKD in der Reparatur

6

Dollendurchmesser [mm]

15

Breite des Bauteils [mm]

357

Höhe des Bauteils [mm]

\*

## SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE

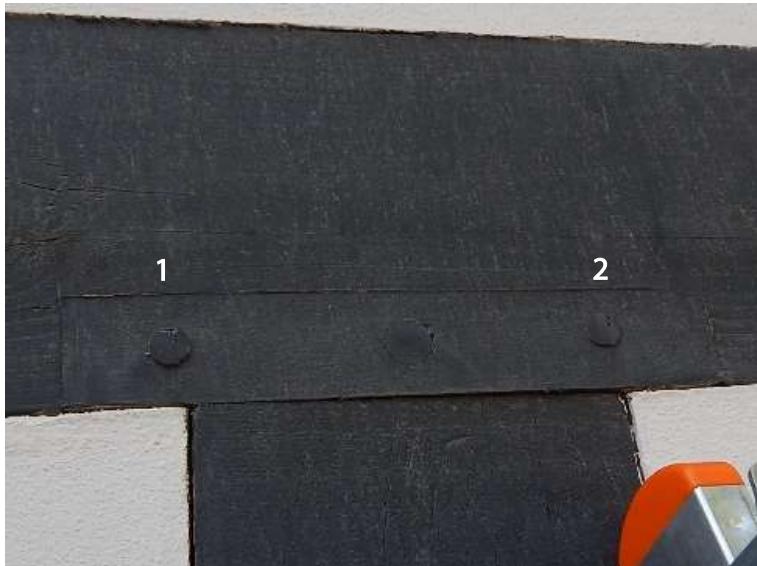
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	4	5	5	4	5	5		
$\Theta$ [°]	60	60	90	40	60	60		
$\Phi$ [°]	85	80	85	90	90	90		
$min\ a_1$ [mm]	87	87	87	87	80	80		
$min\ a_2$ [mm]	125	125	145	147	145	147		
$min\ a_3$ [mm]	33	75**	33	44	35**	65**		
$min\ a_4$ [mm]	63	60	-	-	55	54		
$min\ a_r$ [mm]	-	-	-	-	-	-		

## BESONDERHEITEN

\*) Maße geschätzt

Höhe Bauteil ~162 mm, größte Höhe ~190 mm

Messung bis zur Putzkante Gefache, da Bauteil gewölbt

**OBJEKT 4 – STÄDTISCHES MUSEUM GÖTTINGEN, EHEM. POSTHALTEREI****RÄHM-PASSSTÜCK (FASSADE)****ALLG. PARAMETER DER REPARATUR****Passtücke**

Material Bauteil Bestand	-
Material Bauteil Ersatz	-
Material Dollen	EI
Material Keile	EI
Anzahl HKD in der Reparatur	2
Dollendurchmesser [mm]	15
Breite des Bauteils [mm]	295
Höhe des Bauteils [mm]	50

**SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE**

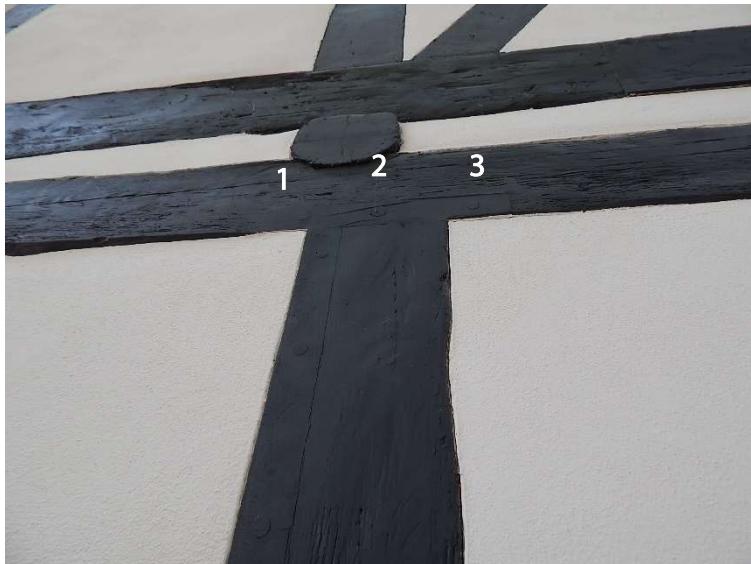
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	4	4						
$\Theta$ [°]	85	85						
$\Phi$ [°]	90	85						
$min\ a_1$ [mm]	198	198						
$min\ a_2$ [mm]	-	-						
$min\ a_3$ [mm]	43	55						
$min\ a_4$ [mm]	25	22						
$min\ a_r$ [mm]	-	-						

**BESONDERHEITEN**

\*) Maße geschätzt

## OBJEKT 4 – STÄDTISCHES MUSEUM GÖTTINGEN, EHEM. POSTHALTEREI

## STÄNDER-PASSSTÜCK (FASSADE)



## ALLG. PARAMETER DER REPARATUR

## Passtücke

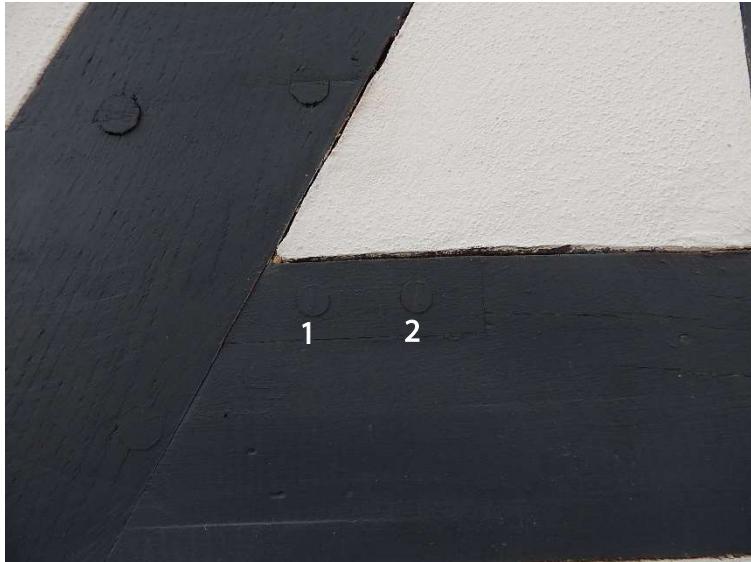
Material Bauteil Bestand	-
Material Bauteil Ersatz	-
Material Dollen	EI
Material Keile	EI
Anzahl HKD in der Reparatur	3
Dollendurchmesser [mm]	15
Breite des Bauteils [mm]	50
Höhe des Bauteils [mm]	600

## SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	4	4	4					
$\Theta$ [°]	55	60	45					
$\Phi$ [°]	90	75	90					
$min a_1$ [mm]	145	185	185					
$min a_2$ [mm]	-	-	-					
$min a_3$ [mm]	52	-	123					
$min a_4$ [mm]	21	25	23					
$min a_r$ [mm]	-	-	-					

## BESONDERHEITEN

\*) Maße geschätzt

**OBJEKT 4 – STÄDTISCHES MUSEUM GÖTTINGEN, EHEM. POSTHALTEREI****RIEGEL-PASSSTÜCK (FASSADE)****ALLG. PARAMETER DER REPARATUR****Passtücke**

Material Bauteil Bestand	-
Material Bauteil Ersatz	-
Material Dollen	EI
Material Keile	EI
Anzahl HKD in der Reparatur	2
Dollendurchmesser [mm]	15
Breite des Bauteils [mm]	*
Höhe des Bauteils [mm]	40

**SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE**

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	3	3						
$\Theta$ [°]	45	90						
$\Phi$ [°]	75	80						
$min\ a_1$ [mm]	-	-						
$min\ a_2$ [mm]	54	54						
$min\ a_3$ [mm]	20	20						
$min\ a_4$ [mm]	34	35						
$min\ a_r$ [mm]	-	-						

**BESONDERHEITEN**

\*) Maße geschätzt

Bauteilbreite oben ~111 mm, unten ~133 mm

## OBJEKT 4 – STÄDTISCHES MUSEUM GÖTTINGEN, EHEM. POSTHALTEREI

## STÄNDER-PASSSTÜCK (FASSADE)



## ALLG. PARAMETER DER REPARATUR

## Passtücke

Material Bauteil Bestand	-
Material Bauteil Ersatz	-
Material Dollen	EI
Material Keile	EI
Anzahl HKD in der Reparatur	3
Dollendurchmesser [mm]	20
Breite des Bauteils [mm]	129
Höhe des Bauteils [mm]	713

## SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	3	4	4					
$\Theta$ [°]	70	50	90					
$\Phi$ [°]	70	70	65					
$min a_1$ [mm]	128	432	-					
$min a_2$ [mm]	-	-	-					
$min a_3$ [mm]	103	-	50					
$min a_4$ [mm]	65	60	59					
$min a_r$ [mm]	-	-	-					

## BESONDERHEITEN

\*) Maße geschätzt

**OBJEKT 4 – STÄDTISCHES MUSEUM GÖTTINGEN, EHEM. POSTHALTEREI****STÄNDER-PASSSTÜCK (FASSADE)****ALLG. PARAMETER DER REPARATUR****Passtücke**

Material Bauteil Bestand	-
Material Bauteil Ersatz	-
Material Dollen	EI
Material Keile	EI
Anzahl HKD in der Reparatur	4
Dollendurchmesser [mm]	16
Breite des Bauteils [mm]	50
Höhe des Bauteils [mm]	505

**SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE**

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	4	4	5	3				
$\Theta$ [°]	45	55	10	45				
$\Phi$ [°]	85	70	90	85				
$min\ a_1$ [mm]	133	142	83	-				
$min\ a_2$ [mm]	-	-	-	-				
$min\ a_3$ [mm]	85	-	-	60				
$min\ a_4$ [mm]	21	22	25	25				
$min\ a_r$ [mm]	-	-	-	-				

**BESONDERHEITEN**

\*) Maße geschätzt

**OBJEKT 5 – CAFÉ WINUWUK BAD HARZBURG****OBJEKTBILDER****OBJEKTBESCHREIBUNG**

Name	Café Winuwuk
Kurzbeschreibung	Öffentliches Gebäude – Café
Bauzeit	1922 / 1923
Bauweise	Fachwerkbauweise (expressionistischer Architektur)
Einbauzeit der HKD	2011

**HOLZKEILDOLLE AM OBJEKT**

Holzkeildolle in der Anwendung:	Am Objekt ausgeführt? X = ja
Ständer- oder Streben-Teilaustausch	
Ständer- oder Streben-Passstück	
Schwellen-Teilaustausch	
Schwellen-Passstück	
Rähm-Teilaustausch	
Rähm-Passstück	
Riegel-Teilaustausch	
Riegel-Passstück	
Sparren-Teilaustausch	
Sparren-Passstück	
Ergänzungsbauteil	
Lagesicherung	X

**OBJEKT 5 – CAFÉ WINUWUK BAD HARZBURG****LAGESICHERUNG (AUßenraum)****ALLG. PARAMETER DER REPARATUR****Lagesicherung Ständerfuß**

Material Bauteil Bestand	LH
Material Bauteil Ersatz	-
Material Dollen	EI
Material Keile	EI
Anzahl HKD in der Reparatur	6
Dollendurchmesser [mm]	20
Breite des Bauteils [mm]	330
Höhe des Bauteils [mm]	550

**SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE**

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	7	5	7	5	5	7		
$\Theta$ [°]	30	30	45	30	30	55		
$\Phi$ [°]	90	85	45	85	90	85		
$min\ a_1$ [mm]	170	160	185	180	-	-		
$min\ a_2$ [mm]	132	132	150	150	145	145		
$min\ a_3$ [mm]	50**	50**	-	-	110	120		
$min\ a_4$ [mm]	15	60	25	55	30	70		
$min\ a_r$ [mm]	-	-	-	-	-	-		

**BESONDERHEITEN**

\*) Maße geschätzt

\*\*) Maßen bis zum oberen Abschluss des Blattes auf der Rückseite

**OBJEKT 6 – RATHAUS GOSLAR****OBJEKTBILDER****OBJEKTBESCHREIBUNG**

Name	Rathaus Goslar
Kurzbeschreibung	Öffentliches Gebäude – Rathaus
Bauzeit	Ostflügel Mitte 15. Jh., Marienkapelle 1498-1506, Ratslaube 1537
Bauweise	Massivbauweise
Einbauzeit der HKD	2012 / 2013

**HOLZKEILDOLLE AM OBJEKT**

Holzkeildolle in der Anwendung:	Am Objekt ausgeführt? X = ja
Ständer- oder Streben-Teilaustausch	
Ständer- oder Streben-Passstück	
Schwellen-Teilaustausch	
Schwellen-Passstück	
Rähm-Teilaustausch	
Rähm-Passstück	
Riegel-Teilaustausch	
Riegel-Passstück	
Sparren-Teilaustausch	X
Sparren-Passstück	
Ergänzungsbauteil	
Lagesicherung	

**OBJEKT 6 – RATHAUS GOSLAR****SPARREN-TEILAUSTAUSCH (DACHRAUM)****ALLG. PARAMETER DER REPARATUR**

Teilaustausch, innenliegendes Blatt

Material Bauteil Bestand NH

Material Bauteil Ersatz NH

Material Dollen EI

Material Keile EI

Anzahl HKD in der Reparatur 4+1

Dollendurchmesser [mm] 30

Breite des Bauteils [mm] 175

Höhe des Bauteils [mm] 220

**SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE**

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	5	5	5	5	5			
$\Theta$ [°]	35	30	15	90	30			
$\Phi$ [°]	30	15	30	60	15			
$min\ a_1$ [mm]	245	245	225	-	-			
$min\ a_2$ [mm]	85	85	-	85	85			
$min\ a_3$ [mm]	-	-	-	180	180			
$min\ a_4$ [mm]	50	75	55	55	85			
$min\ a_r$ [mm]	20	15	-	15	20			

**BESONDERHEITEN**

\*) Maße geschätzt

**OBJEKT 6 – RATHAUS GOSLAR****SPARREN-TEILAUSTAUSCH (DACHRAUM)****ALLG. PARAMETER DER REPARATUR**

Teilaustausch, innenliegendes Blatt

Material Bauteil Bestand NH

Material Bauteil Ersatz NH

Material Dollen EI

Material Keile EI

Anzahl HKD in der Reparatur 4+1

Dollendurchmesser [mm] 30

Breite des Bauteils [mm] 160

Höhe des Bauteils [mm] 225

**SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE**

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	5	5	5	5	5			
$\Theta$ [°]	90	85	70	70	90			
$\Phi$ [°]	30	20	25	25	30			
$min\ a_1$ [mm]	240	185	240	-	-			
$min\ a_2$ [mm]	80	80	-	80	80			
$min\ a_3$ [mm]	-	-	-	110	110			
$min\ a_4$ [mm]	75	55	95	75	55			
$min\ a_r$ [mm]	-	-	-	-	-			

**BESONDERHEITEN**

\*) Maße geschätzt

## OBJEKT 7 – MÖNCHEHaus MUSEUM GOSLAR

## OBJEKTBILDER



## OBJEKTBESCHREIBUNG

Name	Mönchehausmuseum Goslar
Kurzbeschreibung	Öffentliches Gebäude – Museum
Bauzeit	Hauptgebäude 1528 (i), Nebengebäude 1526 (d), Erker 1611 (i)
Bauweise	Hauptgebäude: dreistöckiges Ackerbürgerhaus in Fachwerkbauweise
Einbauzeit der HKD	2013

## HOLZKEILDOLLE AM OBJEKT

Holzkeildolle in der Anwendung:	Am Objekt ausgeführt? X = ja
Ständer- oder Streben-Teilaustausch	
Ständer- oder Streben-Passstück	
Schwellen-Teilaustausch	
Schwellen-Passstück	
Rähm-Teilaustausch	
Rähm-Passstück	
Riegel-Teilaustausch	
Riegel-Passstück	
Sparren-Teilaustausch	X
Sparren-Passstück	
Ergänzungsbauteil	
Lagesicherung	

**OBJEKT 7 – MÖNCHEHaus MUSEUM GOSLAR****SPARREN-TEILAUSTAUSCH (DACHRAUM)****ALLG. PARAMETER DER REPARATUR**

Teilaustausch, innenliegendes Blatt

Material Bauteil Bestand LH

Material Bauteil Ersatz LH

Material Dollen ES

Material Keile EI

Anzahl HKD in der Reparatur ≥2

Dollendurchmesser [mm]

Breite des Bauteils [mm]

Höhe des Bauteils [mm]

**SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE**

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	-	-						
Θ [°]	0	45						
Φ [°]	30	45						
min $a_1$ [mm]	1d <sub>D</sub> *	1d <sub>D</sub> *						
min $a_2$ [mm]	2d <sub>D</sub> *	2d <sub>D</sub> *						
min $a_3$ [mm]	-	-						
min $a_4$ [mm]	3/2d <sub>D</sub> *	2d <sub>D</sub> *						
min $a_r$ [mm]	0	1/2d <sub>D</sub> *						

**BESONDERHEITEN**

\*) Maße geschätzt

**OBJEKT 8 – HAUS KREYENBERG WITTINGEN****OBJEKTBILDER****OBJEKTBESCHREIBUNG**

Name	Haus Kreyenberg Wittingen
Kurzbeschreibung	Öffentliches Gebäude – Café
Bauzeit	Kernbauphase 1639 (d) / 1640 (i)
Bauweise	Fachwerk-/ Ständerbauweise
Einbauzeit der HKD	2014 bis 2016

**HOLZKEILDOLLE AM OBJEKT**

Holzkeildolle in der Anwendung:	Am Objekt ausgeführt? X = ja
Ständer- oder Streben-Teilaustausch	X
Ständer- oder Streben-Passstück	
Schwellen-Teilaustausch	
Schwellen-Passstück	
Rähm-Teilaustausch	
Rähm-Passstück	
Riegel-Teilaustausch	
Riegel-Passstück	
Sparren-Teilaustausch	
Sparren-Passstück	
Ergänzungsbauteil	
Lagesicherung	

**OBJEKT 8 – HAUS KREYENBERG WITTINGEN****STÄNDER-, STREBEN-TEILAUSTAUSCHE (FASSADE)****ALLG. PARAMETER DER REPARATUR****Teilaustausche**

Material Bauteil Bestand LH

Material Bauteil Ersatz LH

Material Dollen EI

Material Keile EI

Anzahl HKD in der Reparatur 6

Dollendurchmesser [mm]

Breite des Bauteils [mm]

Höhe des Bauteils [mm]

**SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE**

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	-	-		-	-	-		
$\Theta$ [°]	-	-		-	-	-		
$\Phi$ [°]	30	45		45	-	30		
$min a_1$ [mm]	-	-		-	-	-		
$min a_2$ [mm]	-	-		-	-	-		
$min a_3$ [mm]	-	-		-	-	-		
$min a_4$ [mm]	$2d_D^*$	-		$2d_D^*$	$5/2d_D^*$	$5/2d_D^*$		
$min a_r$ [mm]	-	-		-	-	-		

**BESONDERHEITEN**

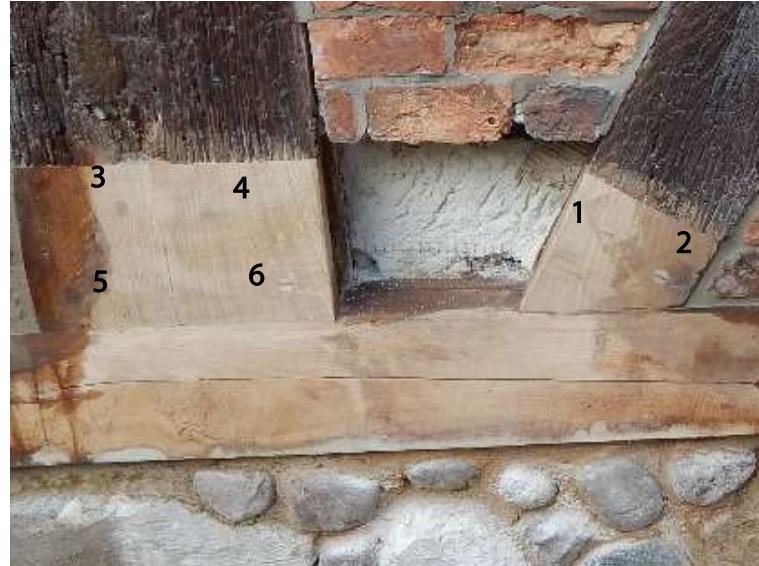
\*) Maße geschätzt

**OBJEKT 9 – FORSTHAUS RITTERGUT WEDESBÜTTEL****OBJEKTBILDER****OBJEKTBESCHREIBUNG**

Name	Forsthaus Rittergut Wedesbüttel
Kurzbeschreibung	Privates Wohngebäude
Bauzeit	1654
Bauweise	Fachwerkbauweise
Einbauzeit der HKD	2013 / 2015

**HOLZKEILDOLLE AM OBJEKT**

Holzkeildolle in der Anwendung:	Am Objekt ausgeführt? X = ja
Ständer- oder Streben-Teilaustausch	X
Ständer- oder Streben-Passstück	X
Schwellen-Teilaustausch	X
Schwellen-Passstück	
Rähm-Teilaustausch	
Rähm-Passstück	
Riegel-Teilaustausch	
Riegel-Passstück	X
Sparren-Teilaustausch	
Sparren-Passstück	
Ergänzungsbauteil	
Lagesicherung	

**OBJEKT 9 – FORSTHAUS RITTERGUT WEDESBÜTTEL****STÄNDER-, STREBEN-, SCHWELLEN-TEILAUSTAUSCHE (FASSADE)****ALLG. PARAMETER DER REPARATUR****Teilaustausche**

Material Bauteil Bestand	LH
Material Bauteil Ersatz	LH
Material Dollen	EI
Material Keile	EI
Anzahl HKD in der Reparatur	2-4
Dollendurchmesser [mm]	-
Breite des Bauteils [mm]	-
Höhe des Bauteils [mm]	-

**SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE**

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	-	-	-	-	-	-	-	-
$\Theta$ [°]	-	-	-	-	-	-	-	-
$\Phi$ [°]	90	90	90	90	90	90	90	90
$min\ a_1$ [mm]	$3/2d_D^*$	$3/2d_D^*$	-	-	-	-	-	-
$min\ a_2$ [mm]	$4d_D^*$	$4d_D^*$	$5d_D^*$	$5d_D^*$	-	-	-	-
$min\ a_3$ [mm]	$5/2d_D^*$	$3/2d_D^*$	$5/2d_D^*$	$5/2d_D^*$	$5/2d_D^*$	$5/2d_D^*$	-	-
$min\ a_4$ [mm]	$5/2d_D^*$	$3/2d_D^*$	-	-	$3d_D^*$	$3d_D^*$	-	-
$min\ a_r$ [mm]	-	-	-	-	-	-	-	-

**BESONDERHEITEN**

\*) Maße geschätzt

**OBJEKT 9 – FORSTHAUS RITTERGUT WEDES BüTTEL****STÄNDER-TEILAUSTAUSCH, STÄNDER-, STREBEN-, RIEGEL-PASSSTÜCKE (FASSADE)****ALLG. PARAMETER DER REPARATUR**

Teilaustausche, Passstücke

Material Bauteil Bestand LH

Material Bauteil Ersatz LH

Material Dollen EI

Material Keile EI

Anzahl HKD in der Reparatur ≥2

Dollendurchmesser [mm] -

Breite des Bauteils [mm] -

Höhe des Bauteils [mm] -

**SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE**

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]								
$\Theta$ [°]								
$\Phi$ [°]								
$min\ a_1$ [mm]								
$min\ a_2$ [mm]								
$min\ a_3$ [mm]								
$min\ a_4$ [mm]								
$min\ a_r$ [mm]								

**BESONDERHEITEN**

\*) Maße geschätzt

## OBJEKT 10 – HOLBORN SCHES HAUS GÖTTINGEN

## OBJEKTBILDER



## OBJEKTBESCHREIBUNG

Name	Holbornsches Haus Göttingen
Kurzbeschreibung	Öffentliches Gebäude mit teilweiser privater Vermietung –
Bauzeit	Kernbau um 1266, Fachwerkbau 1639/1734
Bauweise	vorrangig Fachwerkbauweise, teilweise Massivbauweise
Einbauzeit der HKD	2016 / 2017

## HOLZKEILDOLLE AM OBJEKT

Holzkeildolle in der Anwendung:	Am Objekt ausgeführt? X = ja
Ständer- oder Streben-Teilaustausch	
Ständer- oder Streben-Passstück	X
Schwellen-Teilaustausch	X
Schwellen-Passstück	X
Rähm-Teilaustausch	X
Rähm-Passstück	X
Riegel-Teilaustausch	
Riegel-Passstück	X
Sparren-Teilaustausch	
Sparren-Passstück	
Ergänzungsbauteil	
Lagesicherung	

**OBJEKT 10 – HOLBORN'SCHES HAUS GÖTTINGEN****STÄNDER-, STREBEN-PASSSTÜCKE (FASSADE)****ALLG. PARAMETER DER REPARATUR****Passstücke**

Material Bauteil Bestand LH

Material Bauteil Ersatz LH

Material Dollen EI

Material Keile EI

Anzahl HKD in der Reparatur 4

Dollendurchmesser [mm] -

Breite des Bauteils [mm] -

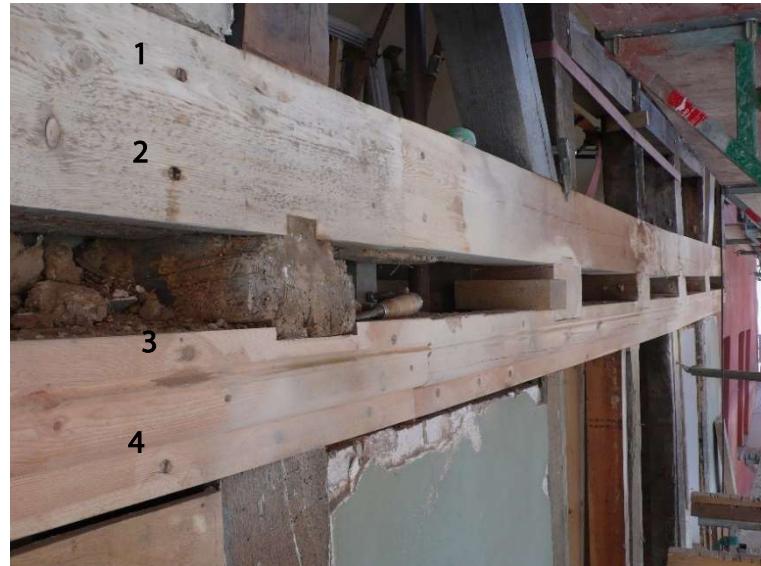
Höhe des Bauteils [mm] -

**SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE**

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]								
$\Theta$ [°]				90	90	90	90	90
$\Phi$ [°]	90	90	90	90	90	90	90	90
$min\ a_1$ [mm]								
$min\ a_2$ [mm]					4d <sub>D</sub> *	4d <sub>D</sub> *	4d <sub>D</sub> *	4d <sub>D</sub> *
$min\ a_3$ [mm]								
$min\ a_4$ [mm]					5/2d <sub>D</sub> *	5/2d <sub>D</sub> *	5/2d <sub>D</sub> *	5/2d <sub>D</sub> *
$min\ a_r$ [mm]	-	-	-	-	-	-	-	-

**BESONDERHEITEN**

\*) Maße geschätzt

**OBJEKT 10 – HOLBORN'SCHES HAUS GÖTTINGEN****SCHWELLEN- UND RÄHM-TEILAUSTAUSCHE, -PASSTÜCK (FASSADE)****ALLG. PARAMETER DER REPARATUR****Teilaustausche, Passstücke**

Material Bauteil Bestand	NH
Material Bauteil Ersatz	NH
Material Dollen	EI
Material Keile	EI
Anzahl HKD in der Reparatur	~4/lfdm
Dollendurchmesser [mm]	
Breite des Bauteils [mm]	
Höhe des Bauteils [mm]	

**SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE**

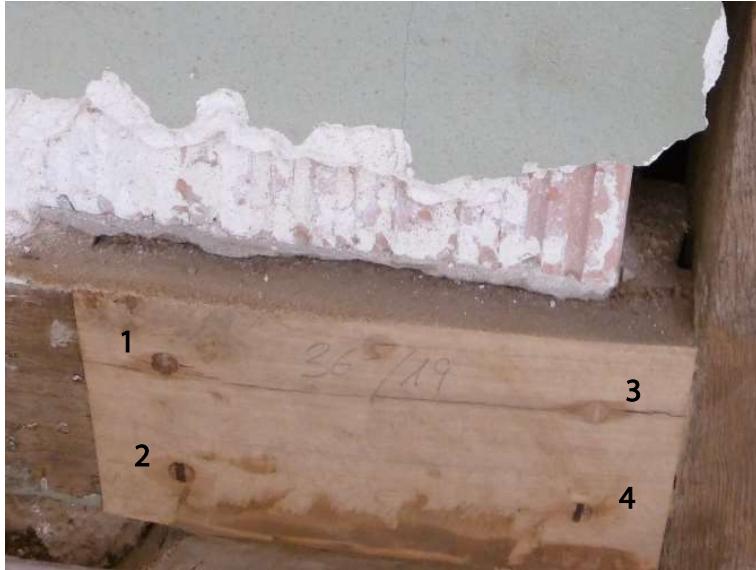
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	-	-	-	-				
$\Theta$ [°]	30*	0*	45*	45*				
$\Phi$ [°]	90	90	45	45				
$min\ a_1$ [mm]	-	-	-	-				
$min\ a_2$ [mm]	-	-	-	-				
$min\ a_3$ [mm]	-	-	-	-				
$min\ a_4$ [mm]	$3d_D^*$	$3d_D^*$	$1d_D^*$	$3/2d_D^*$				
$min\ a_r$ [mm]	-	-	-	-				

**BESONDERHEITEN**

\*) Maße geschätzt

## OBJEKT 10 – HOLBORN'SCHES HAUS GÖTTINGEN

## RIEGEL-PASSSTÜCK (FASSADE)



## ALLG. PARAMETER DER REPARATUR

## Passstück

Material Bauteil Bestand	LH
Material Bauteil Ersatz	LH
Material Dollen	EI
Material Keile	EI
Anzahl HKD in der Reparatur	4
Dollendurchmesser [mm]	20
Breite des Bauteils [mm]	365
Höhe des Bauteils [mm]	190

## SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	-	-	-	-				
$\Theta$ [°]	45	45	45	30				
$\Phi$ [°]	90	90	90	90				
$min a_1$ [mm]	-	-	-	-				
$min a_2$ [mm]	$5d_D^*$	$5d_D^*$	$4d_D^*$	$4d_D^*$				
$min a_3$ [mm]	$3d_D^*$	$7/2d_D^*$	$3d_D^*$	$7/2d_D^*$				
$min a_4$ [mm]	$3d_D^*$	$3d_D^*$	$3d_D^*$	$3d_D^*$				
$min a_r$ [mm]	0	$5d_D^*$	0	$4d_D^*$				

## BESONDERHEITEN

\*) Maße geschätzt

**OBJEKT 11 – HÖFERSCHES HAUS GIFHORN****OBJEKTBILDER****OBJEKTBESCHREIBUNG**

Name	Höfersches Haus Gifhorn
Kurzbeschreibung	Privates Wohngebäude mit gewerblich genutzten Büro-
Bauzeit	Kernbauphase 1570
Bauweise	Fachwerkbauweise mit teilweise massivem Erdgeschoss
Einbauzeit der HKD	2016 / 2017

**HOLZKEILDOLLE AM OBJEKT**

Holzkeildolle in der Anwendung:	Am Objekt ausgeführt? X = ja
Ständer- oder Streben-Teilaustausch	
Ständer- oder Streben-Passstück	X
Schwellen-Teilaustausch	
Schwellen-Passstück	
Rähm-Teilaustausch	
Rähm-Passstück	X
Riegel-Teilaustausch	
Riegel-Passstück	X
Sparren-Teilaustausch	
Sparren-Passstück	
Ergänzungsbauteil	
Lagesicherung	

**OBJEKT 11 – HÖFERSCHES HAUS GIFHORN****STÄNDER-, RÄHM-PASSSTÜCKE (FASSADE)****ALLG. PARAMETER DER REPARATUR****Passtücke**

Material Bauteil Bestand	LH
Material Bauteil Ersatz	LH
Material Dollen	EI
Material Keile	EI
Anzahl HKD in der Reparatur	6
Dollendurchmesser [mm]	10
Breite des Bauteils [mm]	-
Höhe des Bauteils [mm]	-

**SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE**

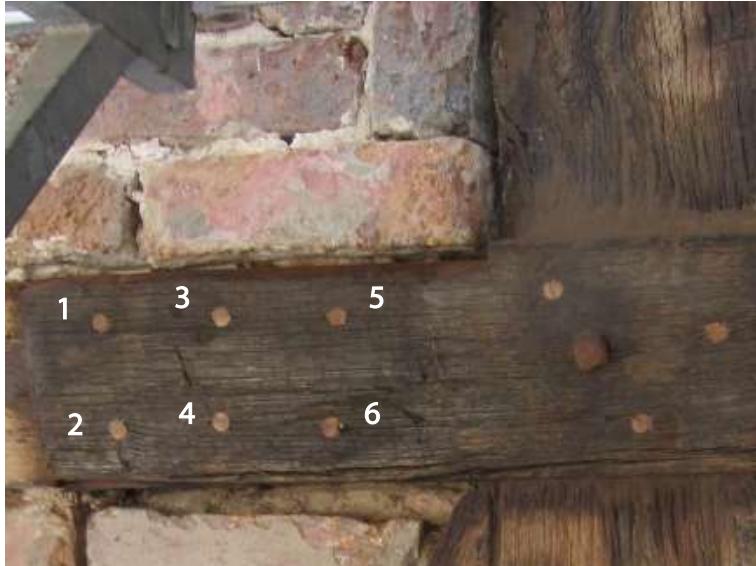
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	-	-	-	-	-	-	-	-
$\Theta$ [°]	60*	45*	60*	45*	90*	0*		
$\Phi$ [°]	45	0	45	45	0	45		
$min a_1$ [mm]	-	-	-	-	-	-		
$min a_2$ [mm]	$5d_D^*$	$5d_D^*$	$6d_D^*$	$6d_D^*$	$5d_D^*$	$5d_D^*$		
$min a_3$ [mm]	$4d_D^*$	$4d_D^*$	-	-	$5d_D^*$	$5d_D^*$		
$min a_4$ [mm]	$4d_D^*$	$5d_D^*$	$3d_D^*$	$4d_D^*$	$4d_D^*$	$5d_D^*$		
$min a_r$ [mm]	-	-	-	-	-	-		

**BESONDERHEITEN**

\*) Maße geschätzt

## OBJEKT 11 – HÖFERSCHES HAUS GIFHORN

## RIEGEL-PASSSTÜCK (FASSADE)



## ALLG. PARAMETER DER REPARATUR

## Passstück

Material Bauteil Bestand	LH
Material Bauteil Ersatz	LH
Material Dollen	EI
Material Keile	EI
Anzahl HKD in der Reparatur	6
Dollendurchmesser [mm]	10
Breite des Bauteils [mm]	120*
Höhe des Bauteils [mm]	140*

## SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	-	-	-	-	-	-		
$\Theta$ [°]	90*	-	-	45*	45*	-		
$\Phi$ [°]	45	45	45	45	45	45		
$min\ a_1$ [mm]	$6d_D^*$	$5d_D^*$	$5d_D^*$	$6d_D^*$	$6d_D^*$	$6d_D^*$		
$min\ a_2$ [mm]	$6d_D^*$	$6d_D^*$	$6d_D^*$	$6d_D^*$	$6d_D^*$	$6d_D^*$		
$min\ a_3$ [mm]	$7/2d_D^*$	$3d_D^*$	-	-	$4d_D^*$	$5d_D^*$		
$min\ a_4$ [mm]	$5/2d_D^*$	$5/2d_D^*$	$5/2d_D^*$	$3d_D^*$	$3d_D^*$	$5/2d_D^*$		
$min\ a_r$ [mm]	-	-	-	-	-	-		

## BESONDERHEITEN

\*) Maße geschätzt

**OBJEKT 12 – FRANKENBERGER KIRCHE GOSLAR****OBJEKTBILDER****OBJEKTBESCHREIBUNG**

Name	St. Peter und Paul auf dem Frankenberge Goslar
Kurzbeschreibung	Öffentliches Gebäude - Kirche
Bauzeit	Kernbau Mitte 12. Jhd., Dachwerke um 1478d, 1654d
Bauweise	Massivbauweise (Naturstein)
Einbauzeit der HKD	2019

**HOLZKEILDOLLE AM OBJEKT**

Holzkeildolle in der Anwendung:	Am Objekt ausgeführt? X = ja
Ständer- oder Streben-Teilaustausch	
Ständer- oder Streben-Passstück	
Schwellen-Teilaustausch	
Schwellen-Passstück	
Rähm-Teilaustausch	
Rähm-Passstück	
Riegel-Teilaustausch	
Riegel-Passstück	
Sparren-Teilaustausch	X (Deckenbalken, Kehlbalken)
Sparren-Passstück	
Ergänzungsbauteil	
Lagesicherung	X

**OBJEKT 12 – FRANKENBERGER KIRCHE GOSLAR**
**LAGESICHERUNG (DACHRAUM)**

**ALLG. PARAMETER DER REPARATUR**

Lagesicherung Sparrenfuß

Material Bauteil Bestand NH

Material Bauteil Ersatz NH

Material Dollen EI

Material Keile EI

Anzahl HKD in der Reparatur 2

Dollendurchmesser [mm] 20

Breite des Bauteils [mm] 200\*

Höhe des Bauteils [mm] 180\*

**SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE**

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	5*	5*						
$\Theta$ [°]	45	0						
$\Phi$ [°]	90	0						
$min a_1$ [mm]	-	-						
$min a_2$ [mm]	120	120						
$min a_3$ [mm]	100	140						
$min a_4$ [mm]	40	40						
$min a_r$ [mm]	-	-						

**BESONDERHEITEN**

\*) Maße geschätzt

**OBJEKT 12 – FRANKENBERGER KIRCHE GOSLAR****DECKENBALKEN-TEILAUSTAUSCH (DACHRAUM)****ALLG. PARAMETER DER REPARATUR****Teilaustausch**

Material Bauteil Bestand	NH
Material Bauteil Ersatz	NH
Material Dollen	EI
Material Keile	EI
Anzahl HKD in der Reparatur	8
Dollendurchmesser [mm]	20
Breite des Bauteils [mm]	200
Höhe des Bauteils [mm]	240

**SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE**

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	-	-	-	-	-	-	-	-
$\Theta$ [°]	90	90	45	45	-	90	45	45
$\Phi$ [°]	0	45	45	45	-	90	90	45
$min a_1$ [mm]	$9/2d_D^*$	-	$4d_D^*$	-	$3d_D^*$	$3d_D^*$	$3d_D^*$	$3d_D^*$
$min a_2$ [mm]	$9/2d_D^*$							
$min a_3$ [mm]	-	-	-	-	-	-	-	-
$min a_4$ [mm]	$3/2d_D^*$	$3/2d_D^*$	$3/2d_D^*$	$3/2d_D^*$	$1d_D^*$	$1d_D^*$	$3/2d_D^*$	$3/2d_D^*$
$min a_r$ [mm]	$3/2d_D^*$	$3/2d_D^*$	$2d_D^*$	$2d_D^*$	$2d_D^*$	$3/2d_D^*$	$1d_D^*$	$1d_D^*$

**BESONDERHEITEN**

\*) Maße geschätzt

## OBJEKT 12 – FRANKENBERGER KIRCHE GOSLAR

## KEHLBALKEN-TEILAUSTAUSCH (DACHRAUM)



## ALLG. PARAMETER DER REPARATUR

## Teilaustausch

Material Bauteil Bestand	NH
Material Bauteil Ersatz	NH
Material Dollen	EI
Material Keile	EI
Anzahl HKD in der Reparatur	4
Dollendurchmesser [mm]	20
Breite des Bauteils [mm]	150
Höhe des Bauteils [mm]	160

## SPEZIFISCHE PARAMETER DER HOLZKEILDOLLE

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Sichtbare Keilbreite [mm]	2	2	2	2				
$\Theta$ [°]	45*	45*	30*	45*				
$\Phi$ [°]	90	45	90	45				
$min a_1$ [mm]	-	-	-	-				
$min a_2$ [mm]	$2d_D^*$	$2d_D^*$	$2d_D^*$	$2d_D^*$				
$min a_3$ [mm]	-	-	$5d_D^*$	$5d_D^*$				
$min a_4$ [mm]	$3d_D^*$	$3/2d_D^*$	$3d_D^*$	$2d_D^*$				
$min a_r$ [mm]	0	$2d_D^*$	$1d_D^*$	$1d_D^*$				

## BESONDERHEITEN

\*) Maße geschätzt

## 2.6 Vorläufige grundlegende Parameter (Erfahrungswerte)

Aus der Analyse existierender Ausführungen, *Erfahrungswerten* von befragten erfahrenen Zimmermännern und analysierten mechanischen Modellansätzen wurden die folgenden vorläufigen geometrisch-konstruktiven Parameter für die Holzkeildolle festgelegt.

WICHTIG: Diese Parameter sind *Erfahrungswerte* und werden verworfen oder geändert! Die endgültigen Parameter für die Holzkeildolle sind im Abschnitt 4.1 zu finden.

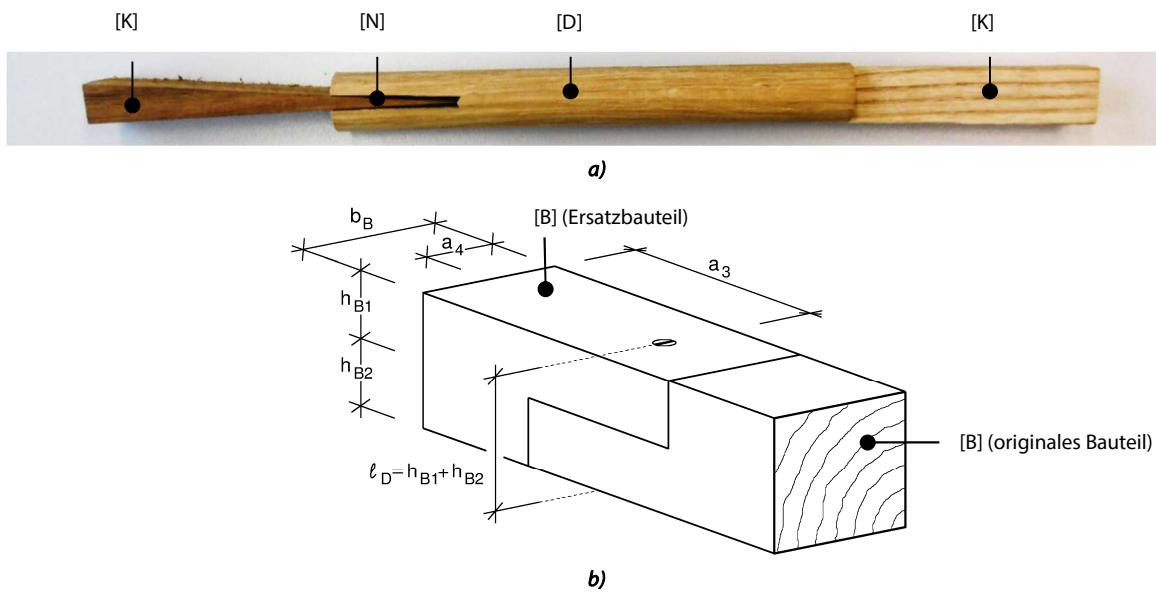


Abbildung 2-1 Abkürzungen der Teile in der Reparaturverbindung mittels Holzkeildolle: a) Teile der Holzkeildolle; b) Darstellung der Reparaturverbindung (Beispiel an einschnittiger Verbindung).

Eine Reparaturverbindung mittels Holzkeildolle besteht aus zwei zu verbindenden Bauteilen (normalerweise ein originales Bauteil und ein Ersatzbauteil), einer auf zwei Seiten genuteten Dolle mit jeweils einem Keil. Der jeweilige Index der geometrisch-konstruktiven Parameter bezeichnet den entsprechenden betreffenden Teil der Verbindung (K = Keil; N = Nut; D = Dolle; B = (Ersatz-)Bauteil), wie in Abbildung 2-1 dargestellt. Die Darstellung der folgenden schriftlich beschriebenen Parameter ist in der Abbildung 2-3 zu finden.

### Dolle [D]

- Holzarten Dolle: Laubholz, meist Eiche (technisch getrocknet) oder Esche (technisch getrocknet);
- Richtung der Fasern der Dolle (Längsrichtung). Holzdollen langfaserig gewachsen, natürlich entsprechend dem Faserverlauf gespalten;
- Länge der Dolle [ $l_D$ ]: Variabel, gleich Bauteil-Querschnittshöhe  $l_D = h_{B1} + h_{B2}$ ;
- Durchmesser der Dolle [ $d_D$ ]:  $d_D = 16 - 20 - 24 - 30 \text{ mm}$ .

### Nut [N]

- Mittig in der Dolle, als Diameter ausgewählt
- Länge der Nut 1 [ $l_{N,1}$ ] und Nut 2 [ $l_{N,2}$ ]: je max.  $l_{N,i} \leq 1/4 \cdot l_D$  und  $l_{N,1} = l_{N,2}$ ;
- Dicke der Nut [ $t_N$ ]:  $t_N = 1 - 3 \text{ mm}$  (nach Fertigungsregel:  $t_N = 1/10 \cdot d_D$ );
- Länge des Kerns [ $l_{D,kern}$ ]:  $l_{D,kern} = l_D - l_{N,1} - l_{N,2}$ ;
- Abstand des Nutbodens zur Scherfuge =  $l_{kern,D}/2$ ;
- Winkel  $\theta$  zwischen Nutlängsachse und Jahrring-Ausrichtung in dem Dollenquerschnitt (Parameter T1: vgl. Tabelle 2-3). Nach den bisherigen *Erfahrungswerten* wurde dieser Winkel nicht beachtet.

- Der Einfluss der mechanischen und elastischen Eigenschaften im Abhängigkeit vom Winkel zur Jahrringe wurde bei Clorius [29] für  $f_{t,90,k}$  und Kollmann [30] und Niemz [31] für  $E_{m,90,mean}$  untersucht (vgl. Abbildung 2-2). Auf Basis der Literaturergebnissen [30; 31] wurde der variable Parameter T1 festgelegt als T1-0 →  $\theta = 0$ .

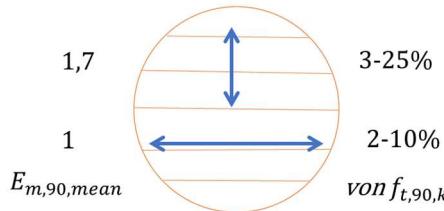


Abbildung 2-2 Einfluss der Winkel zur Jahrringe- Richtung. Clorius [29] für  $f_{t,90,k}$ . Kollmann [30] und Niemz [31] für  $E_{m,90,mean}$ .

- Winkel  $\varphi$  zwischen Nutlängsachse auf Seite 1 [N,1] und Faserrichtung des Bauteils (Parameter T2: vgl. Tabelle 2-3). Nach den bisherigen *Erfahrungswerten* wurde dieser Winkel nicht immer beachtet. Die Tendenz in den vorhandenen Praxisbeispielen aus Abschnitt 2.5.3 zeigt eine zufällige Einordnung.
- Winkel  $\beta$  zwischen Nutlängsachse auf Seite 1 [N,1] und Nut auf Seite 2 [N,2] (Parameter G: vgl. Tabelle 2-3). Die Nuten in der Dolle wurden in den vorhandenen Praxisbeispielen auf den gegenüberliegenden Seiten um 90° versetzt, um das befürchtete Risiko der Spaltung der Holzkeildolle in der Kernzone zu vermeiden.

### Keil [K]

- Holzart Keile: Eiche (technisch getrocknet);
- Länge des Keils in Längsrichtung [ $l_K$ ]: nach den bisherigen *Erfahrungswerten* wurde diese nicht beachtet;
- Breite des Keils [ $b_K$ ] = Durchmesser der Dolle [ $d_D$ ]:  $b_K = d_D$
- Dicke des Keils (oben) [ $t_{K,2}$ ]: abhängig von  $l_K$ ;
- Dicke des Keils (Spitze) [ $t_{K,1}$ ]:  $t_{K,1} \cong 0\text{mm}$ ;
- Dicke des Keils auf der Oberkante der Nut [ $t_{K,3}$ ]: abhängig von  $l_K$ ;
- Winkel des Keils [ $\alpha_{K,1}; \alpha_{K,3}$ ]: mit  $\alpha_{K,1} = 8^\circ - 10^\circ$  (Praktische Fertigungsregel für den Winkel des Keils: „Pro cm Länge wächst der Keil 2 mm in der Dicke“)

### Bauteil [B] (Ersatzbauteil)

- Holzarten typischer Ersatzbauteile:
  - Eiche 5 Jahre luftgetrocknet (Rohdichte jedes Mal zu ermitteln);
  - Fichte technisch getrocknet (Rohdichte jedes Mal zu ermitteln);
- Holzfeuchte (idealerweise konstant) [ $u = \text{ca. } 12\%$  (Fichte technisch getrocknet);  $u = \text{ca. } 17\%$  (Eiche luftgetrocknet)];
- Min. Bauteilbreite [ $b_{B,min}$ ]:  $b_{B,min} = 100\text{mm}$  äquivalent zu  $d_D = 20\text{ mm}$  mit  $a_4 \geq 2,5 \cdot d_D$ ;
- Schnittigkeit der Verbindung: ein- oder zweiseitig;
- Min. Bauteilhöhe in der Verbindung [ $h_{B,min}$ ]:  $h_{B,min} = h_{B1} + h_{B2} \geq 120\text{ mm}$  (z.B. eine einschellige Verbindung mit jeweils  $h_{B1} \geq 60\text{ mm}$  und  $h_{B2} \geq 60\text{ mm}$  vgl. Abbildung 2-1 b)) äquivalent zu Mindestlänge des Kerns  $l_{D,kern} \geq 60\text{ mm}$ .

### Bauteil-Holzkeildolle Holzkombination

Die Holzkombination zwischen Bauteil und Holzkeildolle ist in den gebauten Beispielen variabel (Parameter H: vgl. Tabelle 2-3).

- Die häufigsten Bauteile im Bestand sind aus Fichte, Tanne oder Eiche vorzufinden.
- In den Reparaturverbindungen sind die Holzkeildollen meist aus Eiche; dennoch wurden in jüngsten Reparaturen auch Holzkeildollen aus Esche eingebaut.

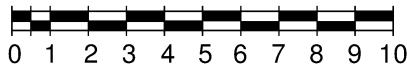
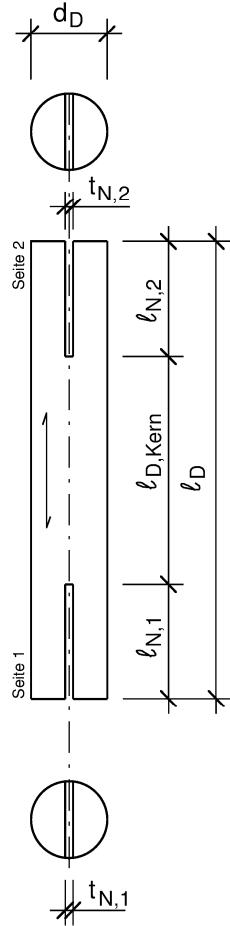
### Min-Abstände in der Verbindung

- Minimum Abstand zum Bauteil-Rand [ $a_4$ ]:  $a_4 \geq 2,5 \cdot d_D$  [mm];
- Minimum Abstand zum Hirnholz [ $a_3$ ]:  $a_{3,min} \geq 3 \cdot d_D$  [mm];
- Minimum Abstand des Verbindungsmittels in der Verbindung [ $a_1 = a_2$ ]:  $[a_1 = a_2 \geq 2 \cdot d_D]$ ;
- Minimum Abstand des Verbindungsmittels zu einem Riss [ $a_r$ ]:  $[a_r \geq 2,5 \cdot d_D]$ ;

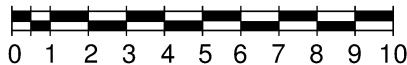
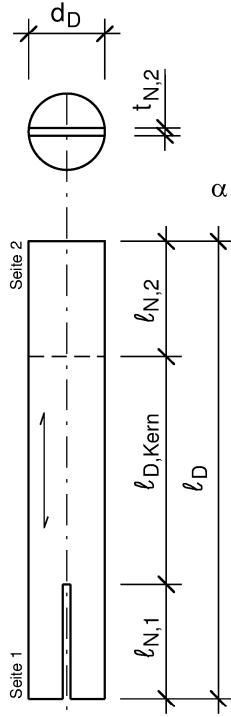
**Tabelle 2-3 Abkürzungen für die variablen Parameter in der Holzkeildolle**

H	T1-	T2-	G-
Holzkombination	Winkel $\theta$ zwischen Nutlängsachse und Jahrring-Ausrichtung der Dolle	Winkel $\varphi$ zwischen Nutlängsachse auf der Seite 1 [N,1] und Faserrichtung des Bauteils	Winkel $\beta$ zwischen Nutlängsachse auf Seite 1 [N,1] und auf Seite 2 [N,2]
H1 = Dolle: Eiche / Bauteil: Fichte H2 = Dolle: Eiche / Bauteil: Eiche H3 = Dolle Esche/ Bauteil: Fichte	T1-0 $\rightarrow \theta = 0^\circ$ (festgelegt) T1-45 $\rightarrow \theta = 45^\circ$ (verworfen) T1-90 $\rightarrow \theta = 90^\circ$ (verworfen)	T2-0 $\rightarrow \varphi = 0^\circ$ T2-45 $\rightarrow \varphi = 45^\circ$ T2-90 $\rightarrow \varphi = 90^\circ$	G1 $\rightarrow$ Anordnung der Nut auf der Seite 2 der Dolle parallel ( $\beta = 0^\circ$ ) zur Anordnung auf der Seite 1 G2 $\rightarrow$ Anordnung der Nut auf der Seite 2 der Dolle senkrecht ( $\beta = 90^\circ$ ) zur Anordnung auf der Seite 1.

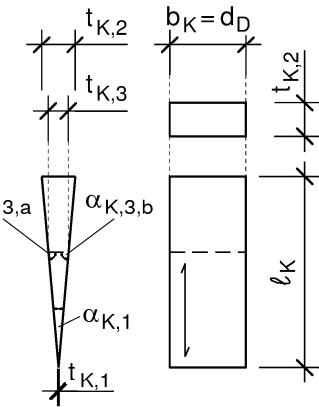
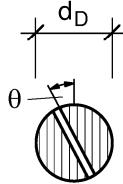
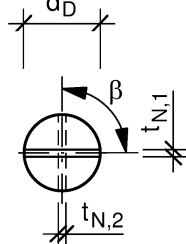
Geometrie 1 (G1)



Geometrie 2 (G2)



Geometrie des Keils

Winkel  $\theta$  zwischen Nut und Jahrringe der DolleWinkel  $\beta$  zwischen Nut auf der Seite 1 [N,1] und Nut auf der Seite 2 [N,2]

Winkel  $\varphi$  zwischen Nut auf der Seite 1 [N,1] und Faserrichtung des Bauteils

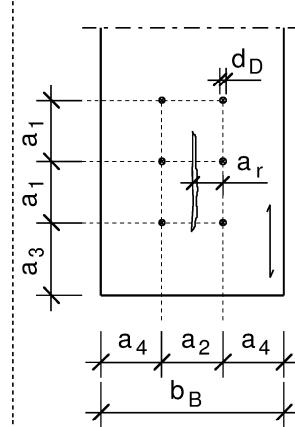
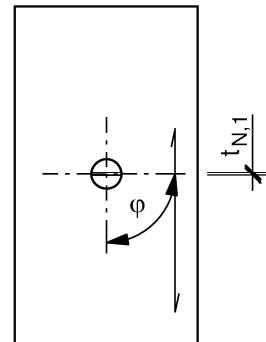


Abbildung 2-3 Darstellung der vorläufigen festgelegten Parameter in der Reparaturverbindung mit Holzkeildolle  
*(Erfahrungswerte)*

## 2.7 Fazit

Die Zusammenstellung typischer geometrischer Angaben existierender Reparaturen mittels Holzkeildolle zeigte sich als notwendig, um die Übertragbarkeit existierender Modellansätze über allgemeine stiftförmige Verbindungsmittel zu überprüfen. Anhand der entstandenen Zusammenstellung von verschiedenartigen Informationen wurde festgestellt, welche Parameter für die Bewertung und den Aufbau eines Modells für die Holzkeildolle bezüglich seiner Tragfähigkeit benötigt werden könnten, welche einen wesentlichen Beitrag zu einer konstruktiven Bewertung liefern könnten und welche anhand der Literatur und konstruktiven Hinweise festgelegt sein müssten. Diese Parameter stellen die Basis für die weitere Untersuchung der Holzkeildolle in der Tastversuchen TV1, TV2 und TV3 (vgl. Absatz 3).

### 3 Voranalyse und Anforderungen an die HKD

#### 3.1 Einleitung und Hintergründe der Voruntersuchungen

Wie schon im Absatz 2.3 gesehen, kann die Tragfähigkeit nach dem Stand der Technik im Ingenieurholzbau durch die Ermittlung der zu erwartenden Versagensformen besser eingeschätzt werden. Für die korrekte Einschätzung der Tragfähigkeit der Verbindungen nach dieser Theorie ist das Einhalten bestimmter geometrischer Parameter in der Verbindung wie Randabstände, Mindestdicke des Holzbauteils, usw. notwendig. Viele mögliche Versagensarten können auftreten. Rechnerisch nicht abzuleiten ist das Versagen des Holzes durch Aufspalten aufgrund von unzureichenden Verbindungsmittel- und Randabständen. Die erforderlichen Mindestabstände und Mindestholzdicke, sowie die Beanspruchungsrichtung des Bauteils sind von besonderer Wichtigkeit und müssen deshalb, auch für die HKD, bestimmt werden. Mit diesen Voraussetzungen wurden die in den eingebauten Beispielen existierenden Rahmenbedingungen analysiert, um evtl. solche Rissbildung und Spaltungsphänomene in dem gebauten Zustand zu erfassen und die direkte Vergleichbarkeit mit existierenden Modellen für stiftförmige Verbindungsmittel zu erlauben. Die identifizierten Parameter sind die Folgenden:

- Holzart,
- Randabstände,
- Winkel  $\theta$  zwischen Nut und Jahrringen der Dolle,
- Winkel  $\varphi$  zwischen Nut auf der Oberflächenseite und Fasserrichtung des Bauteils,
- Winkel  $\beta$  zwischen Nut auf Seite 1 und Nut auf Seite 2.

Diese Parameter sind nach *Erfahrungswerten* im Absatz 2.6 zusammengefasst und aus Abbildung 2-3 zu entnehmen. Die Bedeutung dieser geometrischen Parameter aus der Literatur, ohne direkten Zusammenhang mit der HKD, die jedoch für die Übertragungsmöglichkeit existierender Modelle für die HKD relevant sind, ist im Absatz 2.4 beschrieben. Die Beobachtungen zu diesen Parametern - Basis für die Entwicklung der Tastversuche - sind folgend kurz beschrieben.

**Parameter  $\varphi$ : Winkel zwischen Nut auf Seite 1 und Fasserrichtung des Bauteils.** Durch die Einführung des Keils in die Nut kann das Aufspalten des Dollenkerns oder eine Rissöffnung im Bauteil ausgelöst werden. Hierdurch kann die Kraftübertragung von den Verbindungsmitteln zu den Bauteilen reduziert oder annulliert werden. Als Konsequenz kann die zu erwartenden Tragfähigkeit der Reparaturverbindung nicht mehr angegeben/ bestimmt werden. Aus den analysierten Beispielobjekten ergibt sich, dass beim Einbau dieser Parameter nicht berücksichtigt wurde. Verschiedene zufällige Einbauwinkel sind vorzufinden. Es wurde kein Zusammenhang zwischen der vorgefundenen Rissbildung und dem Einbauwinkel  $\varphi$  festgestellt. Nichtdestotrotz ist nicht auszuschließen, dass die sehr oft auftretende Rissbildung auf der Bauteilloberfläche in einem Zusammenhang damit steht.

**Parameter  $\beta$ : Winkel zwischen Nut auf Seite 1 und Nut auf Seite 2.** Der Einbau des Keils in der Dolle benötigt das Einbringen einer Nut in den beiden Hirnholzseiten der Holzkeildolle. Die Nut ist auf den zwei gegenüberliegenden Seiten der Holzkeildolle eingeschnitten. In den präsentierten Beispielen ist nicht ermittelbar, welche Regel für den Winkel eingehalten wurde. Aus dem Interview mit erfahrenen Zimmermännern (*Erfahrungswerte*) hat sich herausgestellt, dass die Nut auf den beiden gegenüberliegenden Seiten der Holzkeildolle mit einem Winkel von  $90^\circ$  versetzt ist. Hinter dieser Regel steht die Überlegung, das Spalten des Dollenkerns zu vermeiden. Gustafsson in [32] analysiert die Belastung, die notwendig ist, um die Ausbreitung eines Risses von einem bestehenden Bruch aus zu starten. Aus dieser Arbeit ist bekannt, dass das Schlitzen des Holzes in Faserrichtung ein Risswachstum initiieren kann. Deshalb ist es sehr wahrscheinlich, dass die Nut zu einem Versagen der Verbindungsmittel durch Aufspalten führen kann. Hierdurch kann die Kraftübertragung von den Verbindungsmitteln zu den Bauteilen reduziert oder annulliert werden. Als

Konsequenz ist die zu erwartende Tragfähigkeit der Reparaturverbindung nicht mehr gegeben. Es ist nicht nachweisbar, ob sich in den gebauten Beispielen dieses Phänomen manifestiert hat.

**Parameter  $\theta$ : Winkel zwischen Nut und Jahrringen der Dolle.** Aus den analysierten Beispielobjekten ergibt sich, dass dieser Parameter nicht berücksichtigt wurde. Verschiedene zufällige Einbauwinkel zwischen Nut und Jahrringen der Dolle wurden eingebaut. Auf Basis der Literaturergebnisse [30; 31] gibt es keinen Hinweis auf eine sich verändernde Spaltgefahr im Holz bei diesem Einbauparameter. Zwischen den vorgefundenen Einbauwinkeln  $\theta$  und der vorhandenen Rissbildung wurde kein Zusammenhang festgestellt.

### 3.2 Ziele der Voranalyse

Mit dem finalen Ziel des Forschungsvorhabens, ein mechanisches Modell für die Holzkeildolle unter axialem Zugbeanspruchung zu entwickeln und ein Modell für die Holzkeildolle unter axialem Abscherbeanspruchung aus existierenden Ansätzen (Vgl. 2.4) weiterzuentwickeln, wurden Tastversuche entworfen.

Spezifisches Ziel der Tastversuche (TV1, TV2, TV3) war, die *Erfahrungswerte* und die Parameter aus existierenden Modellen zu analysieren. Basierend auf diesen Werten wurde eine Parametermatrix zu den maßgebenden Bewertungs- und Untersuchungsparametern aus konstruktiver und statischer Sicht definiert. So wurden die Tastversuche konzipiert, um die Zusammenhänge zwischen Geometrie und Rissbildung und Spaltgefahr zu verstehen, und diese später diese zu reduzieren. Diese Analyse eröffnete die Möglichkeit, unter bestimmten Rahmenbedingungen die maximale Dauerhaftigkeit und Tragfähigkeit zu konzipieren und die Reparaturverbindung durch HKD rechnerisch zu erfassen [33].

### 3.3 Methodik

In den Tastversuchen TV1 und TV2 wurden einige signifikante Parameter und Kombinationen zwischen den Parametern, die für die Rissbildung der Dolle im Nutbodenbereich und auf der Bauteiloberfläche verantwortlich sind und deren Einfluss auf die Tragfähigkeit, identifiziert. Für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Tragfähigkeit der Holzkeildolle unter axialem Zugbeanspruchung mit den Ergebnissen der Holzdolle im gleichen Beanspruchungsfall wurden zunächst die Tastversuche TV3 entwickelt.

**TV1.** Die initialen geometrisch-konstruktiven Parameter für den Aufbau der Prüfkörper für die TV1 wurden den *Erfahrungswerten* entnommen. Für die Untersuchung der Rissbildung in der Reparaturverbindung wurden die variablen Parameter aus Tabelle 2-3 in den TV1 variiert, mit dem Ziel, die Ursache der Rissbildung (1) in der Kernzone der Dolle und (2) in den zu verbindenden Bauteilen nach Einbau der zwei Keile zu identifizieren und die geometrisch-konstruktiven Parameter zu kalibrieren.

**TV2.** Die gesammelten Daten aus den TV1 wurden parallel als Basis für die Entwicklung eines FE-Modells der Reparaturverbindung genutzt (vgl. 3.6). Das Ziel der Entwicklung dieses FE-Modells war, die Komplexität der Parameter-Variation realitätsnah darzustellen, damit die festgelegten Parameter für die Entwicklung eines mechanischen Modells nicht nur aus den Laborergebnissen, sondern auch aus Simulationen entnommen werden können. Ergänzend wurden Parameter, die nicht aus Laborergebnissen erhalten werden konnten, durch die FE-Simulationen erzeugt.

Die finale Ergänzung der Anforderungsmatrix für die Holzkeildolle wurde in einem weiteren Schritt umgesetzt. Ziele der Tastversuche TV2 (vgl. 3.5) waren (1) die Bestimmung der axialen Zugtragfähigkeit der Holzkeildolle unter axialem Zugbeanspruchung in Abhängigkeit variierender Parameter, (2) die Analyse der Versagensmechanismen in der Dolle und in den zu verbindenden Bauteilen unter demselben Beanspruchungsfall und (3) die Festlegung geometrisch-konstruktiven Parameter und Fertigungsregeln für die Holzkeildolle.

**TV3.** Weitere Datensätze resultierten aus den TV3 (vgl. 3.6.3). Ziel der Tastversuche TV3 war (1) die Ermittlung der axialen Zugtragfähigkeit zugbeanspruchter Holzdollen für (2) den direkten Vergleich mit den Ergebnissen

axialer Zugtragfähigkeit zugbeanspruchter Holzkeildollen aus TV2. Besondere Charakteristik dieser Testreihe ist die Aufnahme der Beanspruchung in der Verbindung nur mittels Reibung zwischen der Kontaktfläche der Dolle und der zu verbindenden Bauteile. Die Zuverlässigkeit dieser Ergebnisse ist im Abschnitt 3.7.6 diskutiert.

### 3.4 Tastversuche TV1: Rissbildung Holzkeildolle

#### 3.4.1 Ziele

Die Ziele der Tastversuche TV1 sind:

- Analyse der Verteilung der Dehnungen im Material beim Einbringen des Keils in die Nut;
- Analyse der Bruchgefahr und Rissbildung in den Materialien der Dolle und der Bauteile beim Einbringen des Keils in die Nut;
- Kalibrierung der maßgebenden geometrisch-konstruktiven Parameter;
- Bestimmung einiger Fertigungsregeln;
- Sammlung von Daten über das Dehnverhalten der Materialien für den Aufbau eines FE-Modells der HKD.

#### 3.4.2 Materialien

Die Probekörper sind vor der Prüfung in der Klimakammer  $T = 20^\circ\text{C}$  und  $LF = 65\%$  nach EN 408 [34] klimatisiert. Die mechanischen Holzeigenschaften (lokale Rohdichte, Holzfeuchte und E-Moduln) der Prüfkörper sind sowohl für die Bauteile als auch für die Dollen ermittelt. Die Bestimmung der Eigenschaften erfolgt pro Probekörpergruppe durch Referenz-Kleinproben. Prüfkörper, die aus demselben ursprünglichen Ausgangsquerschnitt herkommen, gehören einer identischen Probekörpergruppe an. Die Ergebnisse der Analyse der mechanischen Holzeigenschaften befinden sich in der Tabelle 3-11 und der Tabelle 3-12. Bestimmt wurden die Rohdichte und das E-Modul durch mechanische Tests an kleinen perfekten Proben nach EN 408 [34] und die Holzfeuchte durch das Darrdichteverfahren.

#### 3.4.3 Geometrie der Prüfkörper

Die Prüfkörper simulieren eine einschnittige Verbindung, die durch eine Holzkeildolle verbunden ist. Die Geometrie der Prüfkörper (Bauteil und Holzkeildolle) ist nach den *Erfahrungswerten* (vgl. 2.6) vorbereitet. Die Prüfkörper bestehen aus festgelegten und variablen Parametern.

Die festgelegten Parameter sind aus der Tabelle 3-1 und der Abbildung 3-1 zu entnehmen.

**Tabelle 3-1 Geometrische festgelegte Parameter und Holzarten für die TV1**

	Holzart	Maße
<b>Bauteil</b>	Fichte C24, Eiche D30	$(b_B \times h_B \times l_B) = 120 \times (60 + 60) \times 220 \text{ mm}^3$
<b>Bohrloch</b>	-	$d_{B,LOCH} = d_D = 20\text{mm}$
<b>Dolle</b>	Eiche D30	$d_D = 20\text{mm}$ (rund) $l_D = 120\text{mm}$
<b>Nut</b>	-	$t_N = 2 \text{ mm}$ $l_{N,1} = l_{N,2} = 30\text{mm}$
<b>Keil</b>	Eiche D30	Die Maße der Keile wurden auf Basis der <i>Erfahrungswerte</i> festgelegt. Die Keile entsprechen nicht den theoretischen Standards in Abbildung 2-3, sondern die Parameter $l_K$ , $\alpha_{K,1}$ , $t_{K,1}$ und $t_{K,2}$ unterliegen leichten Schwankungen.

**Tabelle 3-2 Getestete geometrische Kombinationen für die TV1**

Geometrische Kombination	Wiederholungen für Holzkombination	
	H1	H2
T1-0_T2-0_G1	1	4
T1-0_T2-45_G1	4	0
T1-0_T2-45_G2	5	5
T1-0_T2-90_G1	5	5
T1-0_T2-90_G2	5	5

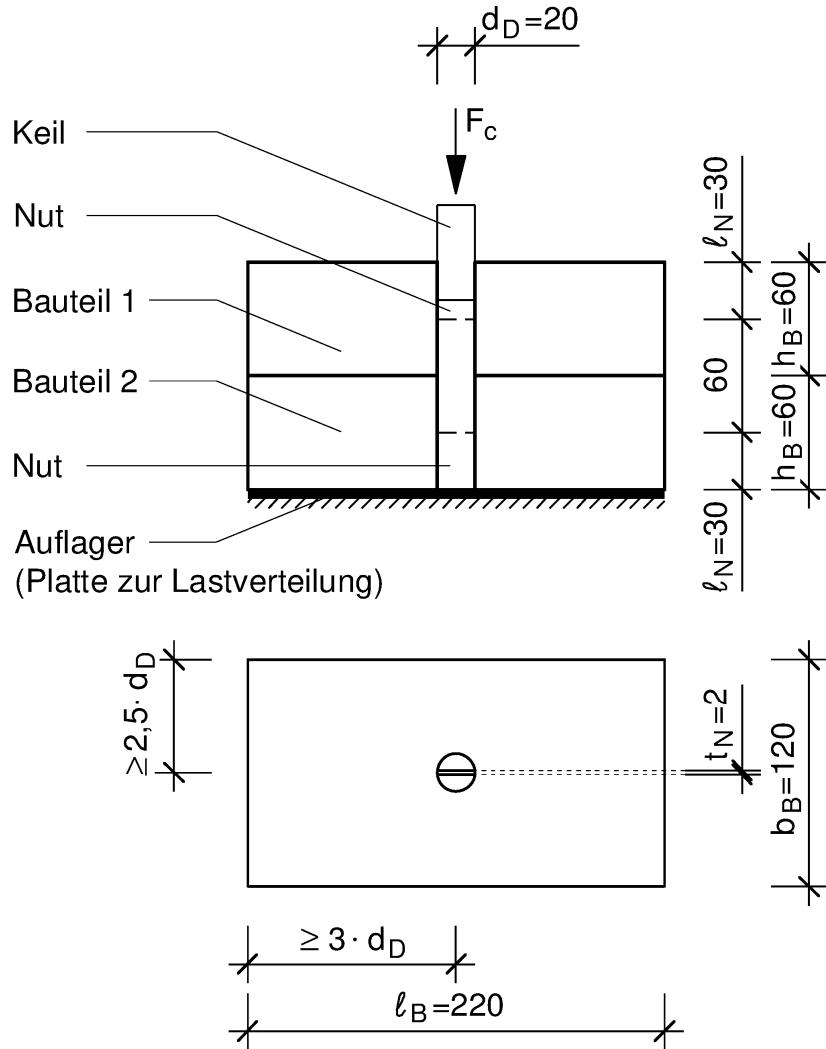


Abbildung 3-1 Geometrisch festgelegte Parameter für die TV1 [mm] und statisches Schema der TV1.

Die allgemeinen variablen Parameter sind aus der Tabelle 2-3 zu entnehmen. Die in TV1 zu analysierenden, variablen Parametern sind nachfolgend erläutert:

- H: Folgende Holzartkombinationen wurden analysiert: H1 → Dolle: Eiche / Bauteil: Fichte;  
H2 → Dolle: Eiche / Bauteil: Eiche;

Für die Holzkombinationen H1 und H2 sind jeweils verschiedenartigen geometrischen Kombinationen T2 und G kombiniert worden (vgl. Abbildung 2-3):

- T2: Anordnung der Nutlängsachse der Dolle zur Faserrichtung des Bauteils, auf Seite 1 der Dolle in den Kombinationen:  
T2-0 →  $\varphi = 0^\circ$ ;  
T2-45 →  $\varphi = 45^\circ$ ;  
T2-90 →  $\varphi = 90^\circ$ ;
- G: Anordnung zwischen Nutlängsachse auf Seite 1 und auf Seite 2 der Dolle in den Kombinationen:  
G1 →  $\beta = 0^\circ$ ;  
G2 →  $\beta = 90^\circ$ .

Die Kombinationen der variablen Parameter sowie die Anzahl der Wiederholungen für die beiden Holzkombinationen sind in der Tabelle 3-2 und Abbildung 3-2 erläutert.

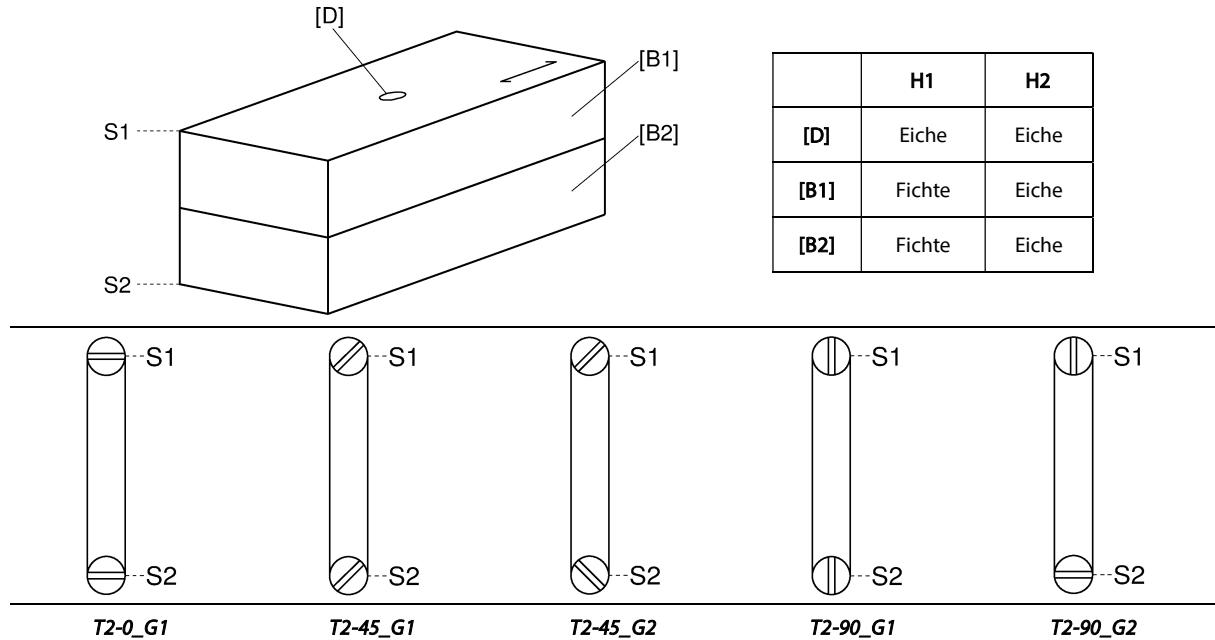


Abbildung 3-2 Getestete geometrische Kombinationen für die TV1.

### 3.4.4 Methoden

In der Tastversuchsserie TV1 ist der Einbau des Keils in die Dolle als Verbindungsmitte für eine einschnittige Verbindung untersucht.

Der übliche Einbau des Keils in der Nut der Dolle erfolgt mittels Hammerschlag. In dieser Laborprüfung wird der Prozess des Eintreibens des Keils in der Dolle als weggesteuerte Druckprüfung (Geschwindigkeit  $v = 1 \text{ mm/s}$ ) mit einer universalen mechanischen Prüfmaschine durchgeführt. Der Grund für die Wahl dieser Belastungsmethode liegt an dem Versuch, für jede Probe die gleichen Randbedingungen zu gewährleisten: Geschwindigkeit, Lastbetrag, Belastungsrichtung (ohne natürliche Richtungskorrekturen eines menschlichen Operators) und zentrierte Lasteinleitung auf den (asymmetrischen) Keil.

Mittels eines optischen Messtechniksystems bestehend aus Hochleistungskameras wurden entlang ausgewählter Führungslinien a), b), c) die oberflächlich makroskopischen Verformungen, die während der Tests entstanden sind, aufgenommen (vgl. Abbildung 3-3):

- Verformung / Einwirkung im Bauteil quer zur Faser (BQ).
- Verformung / Einwirkung im Bauteil unter einem Winkel  $\alpha$  zur Faser, senkrecht zur Keilspreizung (BS).
- Verformung / Einwirkung in der Dolle senkrecht zur Keilspreizung (D05).

Die Führungslinie a) wurde für jede Konfiguration auf dem Bauteil senkrecht zur Faser festgelegt. Die Führungslinien b) und c) wurden entsprechend der T2-Konfiguration nach dem Winkel der Nut rotiert (vgl. Abbildung 3-4). Diese Messmethode wurde für die Datensammlung der Informationen für den Aufbau der Elastizitätsmatrix der Materialien in dem FE-Modell finalisiert.

Abbruchkriterien der Prüfung sind (a) das Erreichen der Eindringtiefe (Abkürzung: E.T.)  $E.T_{S1,max} = 30 \text{ mm} = l_N$  oder (b) der Stabilitätsverlust / das Knicken des Keils (vgl. Abbildung 3-5).

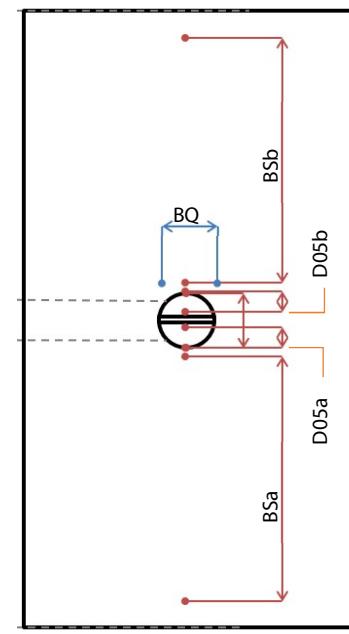
Methode des Einbaus und der Prüfung:

- (Schritt 0): Vor dem Test erfolgt das Einbringen der eingenuteten Dolle in das Bohrloch der zu verbindenden Bauteile.
- (Schritt 1): Der Prüfkörper (Bauteil und Dolle) ist unter der Prüfmaschine positioniert. Der Keil ist händisch in die Nut leicht eingedrückt (vgl. Abbildung 3-3 und Abbildung 3-4-d). Das Aufbringen der Drucklast auf

- dem Keil ist bis zum definierten Abbruchkriterium (a) Knick (b) Versagen out-of-plane (SVKoP) oder (c) Versagen in-plane (SVKP) vorgenommen (vgl. Abbildung 3-5-).
- (Schritt 2): Der Prüfkörper (Bauteil und Dolle) ist erneut unter der Prüfmaschine auf der anderen Seite (S2) positioniert. Der Schritt 1 wird wiederholt.



a)



b)

Abbildung 3-3 Test-setup mit optischen Messtechniksystems und Konfiguration für der Messung der Dehnung entlang ausgewählter Führungslinien: a) Bild b) Schema.

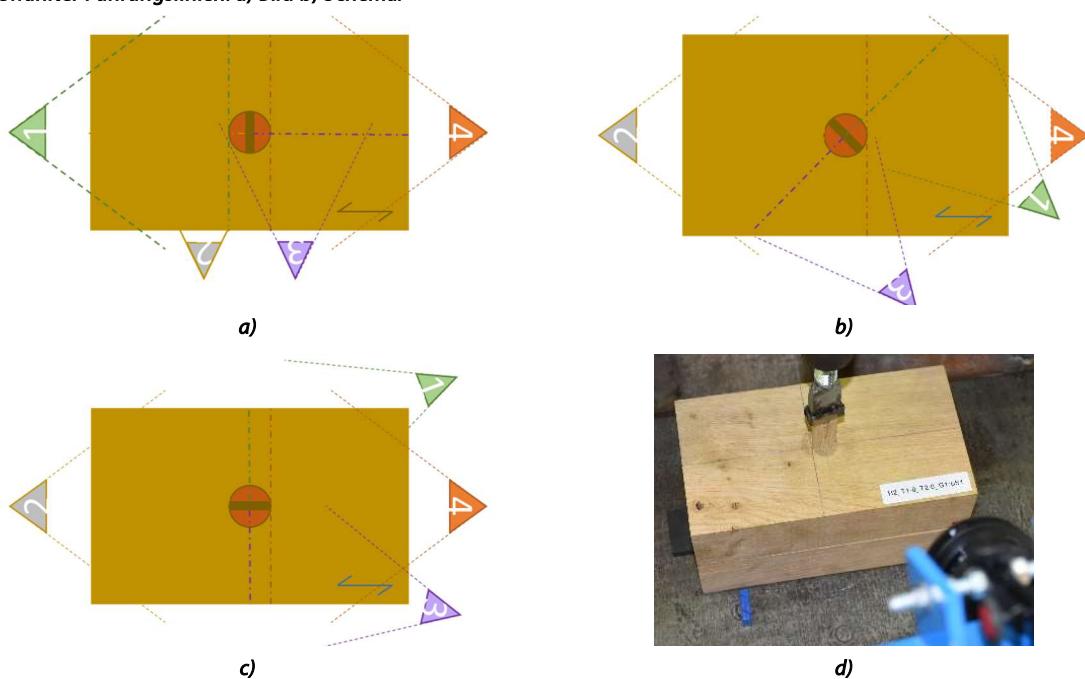


Abbildung 3-4 Beispielhafte optische Konfigurationen für die Messung der Dehnung entlang ausgewählten Führungslinien (Die Farbe der nummerierten Kameras entspricht den jeweils aufgenommenen Bereich entlang der farbigen Strichpunktlinie): a) für T2=90; b) T2=45; c) T2=0. d) Bild der Führungslinien für die Überprüfung des optischen Messsystems.



a)

b)

c)

Abbildung 3-5 Abbruchkriterien „Stabilitätsverlust des Keils“: a) Knicken; b) Versagen out-of-plane (SVKoP); c) Versagen in-plane (SVKP).

### 3.4.5 Prüfergebnisse

Die Ergebnisse der TV1 sind in Form von Statistiken in dem Diagramm 3-1 und dem Diagramm 3-2 zusammengefasst. Die Statistiken der Wahrscheinlichkeit der Rissbildung auf der Oberfläche des Bauteils, im Bodenbereich und im verbundenen Restkern sind im Diagramm 3-1 zu finden. Die Mittelwerte des Restkerns (geometrieabhängig), Mittelwerte der Eindringtiefe des Keils (geometrie- und holzkombinationsabhängig), und Mittelwerte des Abrisses (Abriss = Eindringtiefe [E.T.] + Länge des Risses) der Dolle (geometrie- und holzartabhängig) nach der Prüfung sind im Diagramm 3-2 zu finden.

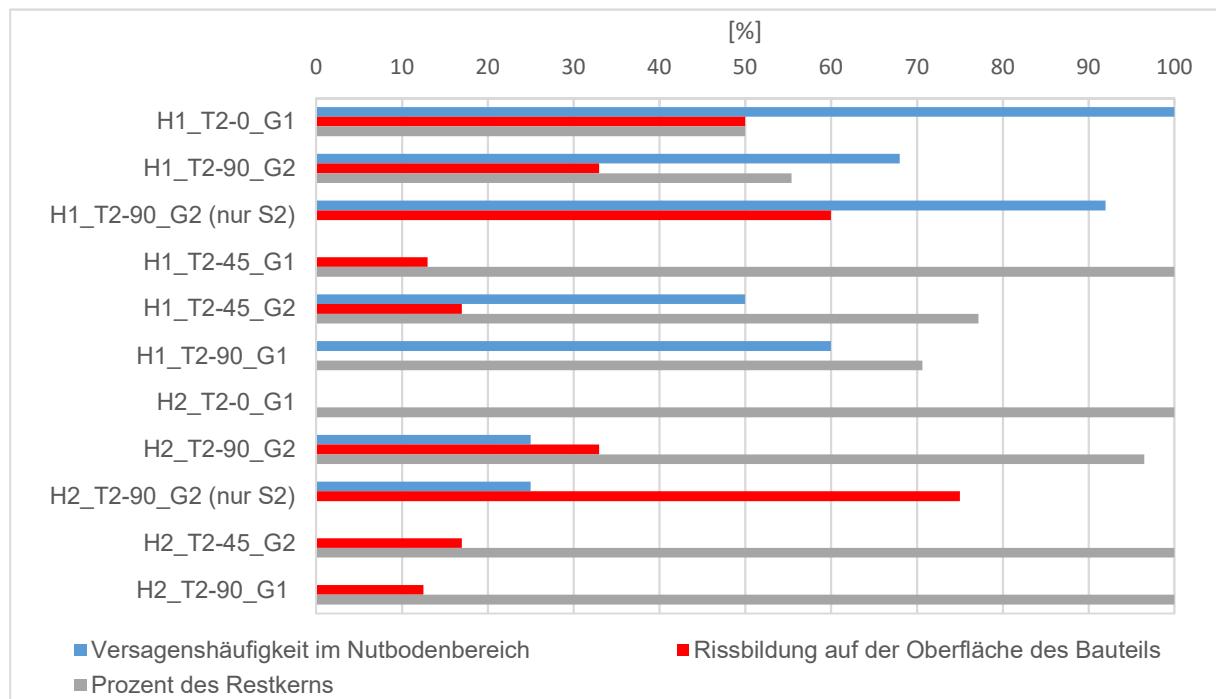


Diagramm 3-1 Versagenshäufigkeit im Nutbodenbereich, Rissbildung auf der Oberfläche des Bauteils, Restkern (in %) der Prüfkörper.

Zusammenfassend konnten folgende Beobachtungen aus den Prüfergebnissen entnommen werden:

#### Allgemeine Schlussfolgerungen:

- Die Kernzone bleibt für alle Prüfkörper - unabhängig von  $\beta$  (vgl. Abbildung 2-3) - ausreichend frei von Rissen.

- Ein Verdacht auf Torsionsbelastung im Kernbereich der Dolle für die Kombinationen G2, die sich auch in den FE-Simulationen zeigte, wurde bestätigt (vgl. 3.6).
- Dagegen wurde kein Verdacht auf Torsionsbelastung für die Kombinationen G1 festgestellt; dieses Ergebnis wurde auch mit den FE-Simulationen bestätigt.

#### Schlussfolgerungen für die Holzkombination H1:

##### **T2-0**

Für die Serien H1\_T2-0\_G1 und H1\_T2-90\_G2 wurde die Versagenshäufigkeit im Nutbodenbereich jeweils zu 100% und 68% und für die Rissbildung auf der Oberfläche des Bauteils jeweils zu 50% und 33% (vgl. Diagramm 3-1) bestimmt. Wichtig hervorzuheben ist, dass sich für H1\_T2-90\_G2 die Versagenshäufigkeit auf der Bauteiloberfläche auf 60% und in der Dolle auf 92% erhöht, wenn nur die S2 (mit  $\varphi = 0^\circ$ ) betrachtet wird.

Diese Ergebnisse schließen somit für H1 alle Konfigurationen mit  $\varphi = 0^\circ$  auf S1 oder S2 (T2-0\_G1; T2-0\_G2; T2-90\_G2) aus. Die Gründe dafür sind (1) eine hohe Wahrscheinlichkeit der Rissbildung der Bauteiloberfläche aufgrund Querzug auf der Oberflächenseite mit Keil in einem Winkel von  $\varphi = 0^\circ$  und (2) eine hohe Wahrscheinlichkeit der Rissbildung über den Nutboden hinaus mit der Konsequenz einer unzureichenden Restkernlänge. Wird eine beidseitige Rissbildung über den Nutboden hinaus von  $l_{D,Riss,mean} = 14,7\text{mm}$  angenommen (Mittelwert aus T2-90\_G2\_S2 und T2-0\_G1), ergäbe sich ein mangelhafter Restkern mit einem Mittelwert von  $l_{D,kern,mean} = 30,0\text{mm}$ .

##### **T2-45**

Für die Konfigurationen H1\_T2-45\_G1 und H1\_T2-45\_G2 liegt die Versagenshäufigkeit für die Rissbildung auf der Bauteiloberfläche jeweils bei 13% und 17% (vgl. Diagramm 3-1). Zudem ist die Versagenshäufigkeit im Nutbodenbereich jeweils bei 0% und 50%. Diese Divergenz wird möglicherweise von der Torsion im Kernbereich verursacht. Die Konfiguration G2 zeigt - im Vergleich zu der korrespondierenden Konfiguration G1 - einen niedrigeren Mittelwert der Restkernlänge. Die Konfiguration G2 wird deswegen im weiteren Vorgehen ausgeschlossen. Für diese Versuchsreihe wurde auch beobachtet, dass je höher die Rohdichte der Dolle ist, desto geringer die Wahrscheinlichkeit der Rissbildung in der Dolle im Nutboden ist. Z.B. für T2-45\_G2:  $\rho_{DOLLE,mean} = 0,560\text{ g/cm}^3$ : Versagen des Keils: 6/12; T2-45\_G1:  $\rho_{DOLLE,mean} = 0,715\text{ g/cm}^3$ : Versagen des Keils: 0/16).

##### **T2-90\_G1**

Die Konfiguration T2-90\_G1 zeigt Mittelwerte des Restkerns von  $l_{D,kern,mean} = 42,4\text{mm}$ , eine Versagenshäufigkeit im Nutbodenbereich von 60% und eine Wahrscheinlichkeit von 100% keinen Riss auf der Bauteiloberfläche (vgl. Diagramm 3-1) auszubilden. Die Konfiguration T2-90\_G1 wird deswegen weiterführend, bevorzugend betrachtet.

#### Schlussfolgerungen für die Holzkombination H2:

##### **T2-0**

Für die Konfigurationen H2\_T2-0\_G1 und H2\_T2-90\_G2 sind die Ergebnisse der Mittelwerte des Restkerns jeweils  $l_{D,kern,mean} = 60,0\text{mm}$  und  $l_{D,kern,mean} = 59,0\text{mm}$ . Diese Ergebnisse sind als sehr gut zu beurteilen. Die Versagenshäufigkeit im Nutbodenbereich ist jeweils 0% und 25% und die Rissbildung auf der Oberfläche des Bauteils jeweils 0% und 33%. Wichtig hervorzuheben ist, dass sich die Versagenshäufigkeit auf der Bauteiloberfläche auf 75% und in dem Nutbodenbereich auf 25% erhöht, wenn für T2-90\_G2 nur die S2 (mit  $\varphi = 0^\circ$ ) betrachtet wird. Die Konfiguration G2 zeigt wieder eine - hier unbedenklich - erhöhte Wahrscheinlichkeit für das Versagen der Dolle im Nutbodenbereich und für die Rissbildung auf der Oberfläche des Bauteils. Die Gründe dieses Phänomens sind unbekannt, aber vermutlich auf die mögliche Torsionsbelastung zurückzuführen.

Dazu wird auch beobachtet, dass je höher die Rohdichte der Dolle ist, desto geringer die Wahrscheinlichkeit der Rissbildung in der Dolle im Nutboden ist. Z.B. T2-90\_G2:  $\rho_{DOLLE,mean} = 0,569\text{ g/cm}^3$ : Versagen des Keils auf der S2: 2/8; T2-0\_G1:  $\rho_{DOLLE,mean} = 0,721\text{ g/cm}^3$ : Versagen des Keils: 0/16.

## T2-45

Die Konfiguration H2\_T2-45\_G2 zeigt unbedenkliche Ergebnisse für die Mittelwerte des Restkerns und der Versagenshäufigkeit im Nutbodenbereich. Die Rissbildung auf der Oberfläche des Bauteils beträgt jeweils 0% und 17%.

## T2-90

Die Konfiguration H2\_T2-90\_G1 zeigt Mittelwerte des Restkerns von  $l_{D,kern,mean} = 60,0$  mm und eine Rissbildung auf der Oberfläche des Bauteils von 12,5%. Die Versagenshäufigkeit im Nutbodenbereich ist hier 0%. Damit ist die Konfiguration H2\_T2-90\_G1 ähnlich den Ergebnissen der gesamte Testreihe H2.

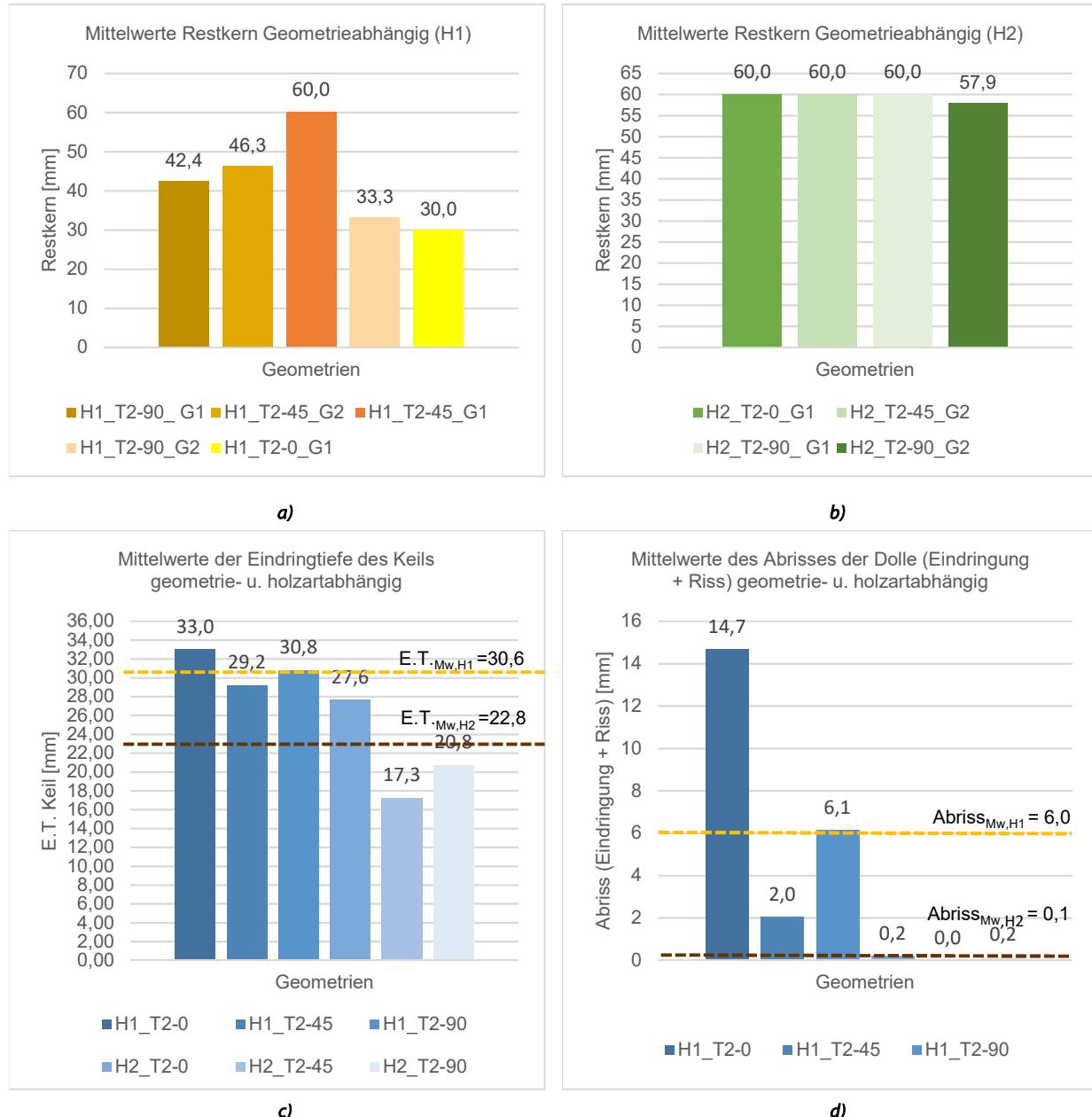
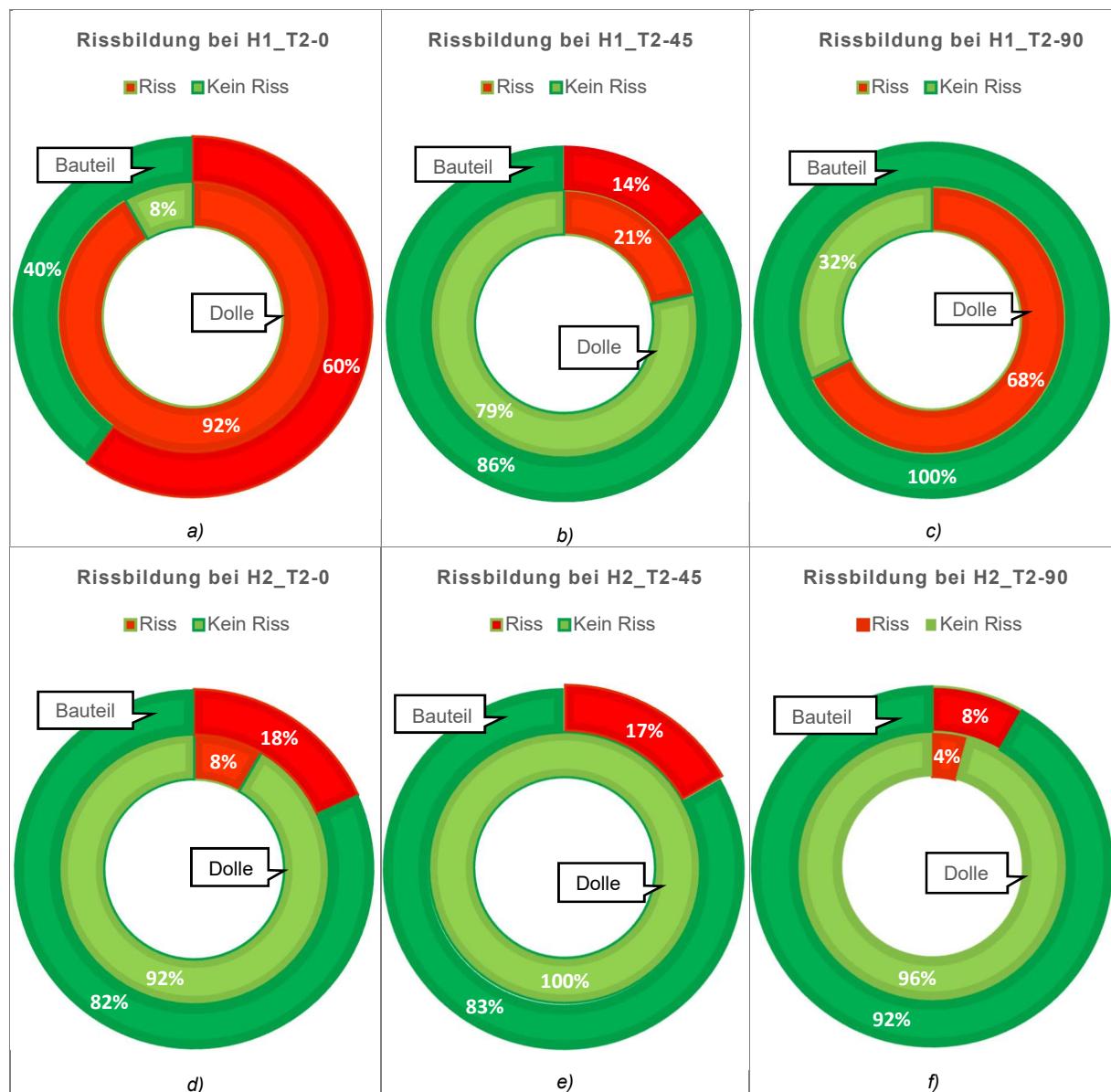


Diagramm 3-2 Statistiken über die Ergebnisse TV1: Restkern der geometrischen Kombinationen für  
 a) H1 und b) H2; c) Mittelwerte der Eindringtiefe des Keils; d) Mittelwerte des Abrisses der Dolle (Eindringung + Riss)

Tabelle 3-3 Versagenshäufigkeiten nach Prüfreihe

		Versagenshäufigkeit im Nutbodenbereich	Rissbildung auf der Oberfläche des Bauteils	
			Seite der Beobachtung	Versagenshäufigkeit [%]
		[%]	[–]	
H1	T2-0_G1	100	S1 und S2	50
	T2-90_G2	68	S1 und S2	33
	T2-45_G1	92	S2 ( $\varphi=0^\circ$ )	60
	T2-45_G2	0	S1 und S2	13
	T2-90_G1	50	S1 und S2	17
H2	T2-0_G1	60	S1 und S2	0
	T2-90_G2	0	S1 und S2	0
	T2-45_G2	25	S1 und S2	33
	T2-90_G1	25	S2 ( $\varphi=0^\circ$ )	75
		0	S1 und S2	17
		0	S1 und S2	12,5

Diagramm 3-3 Statistiken über die Rissbildung in TV1 nach Holzart und  $\varphi$ : a) b) c) geometrieabhängige Rissbildung für H1; d) e) f) geometrieabhängige Rissbildung für H2.

Riss- und Versagensverhalten

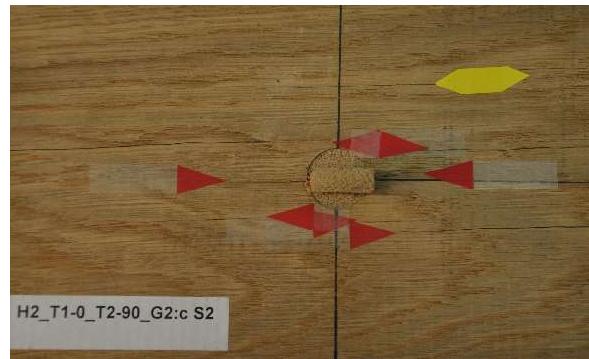
Folgend werden das Riss- und Versagensverhalten auf der Bauteiloberfläche und in der Holzkeildolle (Verbindungsmittel) getrennt beschrieben.

Das Riss- und Versagensverhalten auf der Bauteiloberfläche ist auf der Abbildung 3-6 dargestellt. Die Prüfkörper aus Fichtenholz haben die Tendenz einen einzigen Riss entlang der Überschreitung der Querzugtragfähigkeit aufzubauen. Die Prüfkörper aus Eichenholz haben die Tendenz, die Rissbildung entlang mehrerer Fasern zu verteilen. Dieses Verhalten wurde immer in der unmittelbaren Nähe der Nut, aber unabhängig von der Orientierung T2 der Nut beobachtet. Dieses Phänomen ist erstens durch den mikroskopischen Aufbau des Holzes (spezifisch für jede Holzart und somit unterschiedlich für Fichte und Eiche) und zweitens durch die Erkenntnisse von Sjödin et Al. [21] erklärt. In seinen Studien (über Stabdübel aus Stahl) beschließt der Autor, dass die Oberflächenbeschaffenheit eines Verbindungsmittels, die Art der Holzstauchung, sowie die seitliche Verdrängung des Holzes bei einer Beanspruchung in Faserrichtung beeinflusst wird. Die Ergebnisse aus dieser Studie zeigen u. a. Unterschiede in den Bruchbildern. Bei einer glatten Oberfläche der Verbindungsmitte bildet sich jeweils nur ein Riss in Faserrichtung aus. Bei höherer Rauigkeit der Verbindungsmitte bilden sich zwei Risse in Faserrichtung aus. Trotz Differenzen in dem Material der Verbindungsmitte sind diese Erkenntnisse auf die Ergebnisse TV1 folgend zu übertragen. Die Kontaktfläche zwischen Dolle und Bauteil in der Holzkombination H1 weist einen geringeren Reibungskoeffizient als in der Holzkombination H2 auf. Aufgrund der Materialunterschiede und den damit einhergehenden unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften zeigen sich die Risse an dem Kontaktpunkt der Kante des Keils am Bauteil. In Holzkombination H1 treten Einzelrisse auf und in der Holzkombination H2 zeigen sich verteilte Risse von verschiedener Intensität auf der Bauteiloberfläche. In der Holzkombination H2 weisen Spannungsentlastungsrisse auf der Bauteiloberfläche in der unmittelbaren Nähe des Keils auf die Überschreitung der Querzugtragfähigkeit (Rote Pfeile auf der Abbildung 3-6) hin. In Eichenbauteilen (H2) treten zusätzliche Risse auf, die auf einer weitreichenden Spannungsentlastung im Material (gelbe Pfeile) hinweisen.

Der Riss und das Versagensverhalten der Holzkeildolle (Verbindungsmitte) ist in Abbildung 3-7 dargestellt. Folgend wird der Einfluss der verschiedenen geometrischen Kombinationen auf das Rissverhalten der Dolle für die Holzkombinationen H1 und H2 vorgestellt. Aufgrund des sehr niedrigen Widerstands vom Bauteil aus Fichte quer zur Faser zeigt sich in der Dolle des Prüfkörpers H1\_T2-0 (vgl. Abbildung 3-7-a) ein Abriss (Riss + Eindringung), der sehr tief in den Kern der Holzkeildolle vordringt. Dieser Abriss entsteht durch die außerordentliche langen Eindringtiefe des Keils in die Dolle und einem darauffolgenden Riss im Kern der Dolle. Aufgrund des geringen Widerstands des Bauteils dringt der Keil weiter über den Nutboden hinaus ein und verursacht so die Rissbildung im Kern, an der Spitze des Keils. Des Weiteren wird auf den Vergleich zwischen den Prüfkörpern H1\_T2-45\_G1 und H1\_T2-45\_G2 (vgl. Abbildung 3-7-c und Abbildung 3-7-b) eingegangen. Die gegenseitige Anordnung der Nut in demselben Verbindungsmitte (G1 oder G2 nach Tabelle 2-3 und Abbildung 3-2) hat ein Einfluss auf die Restkernlänge. Die unterschiedliche Restkernlänge für die Anordnungen G1 und G2 zeigt beispielsweise, dass die G2 Konfiguration tendenziell eine höhere Rissbildung vorweist. Dennoch zeigt die letzte Konfiguration eine niedrigere Risswahrscheinlichkeit als die Konfiguration H1\_T2-90. Diese Konfiguration zeigt sehr oft Risse in dem Nutboden (vgl. Abbildung 3-7-d). Der Vergleich zwischen den Prüfkörpern H2\_T2-0, H2\_T2-45 und H2\_T2-90 (vgl. Abbildung 3-7-e, Abbildung 3-7-f und Abbildung 3-7-g) und den zuvor analysierten Prüfkörpern zeigen, dass für die Holzkombination H2 das Rissverhalten der Dolle weniger abhängig von der Anordnung der Nut ist (T2), als für die Holzkombination H1. Auf der anderen Seite zeigen die letzten Prüfkörper, dass die Eindringtiefe für die H2 Konfiguration ein kritischer Parameter sein kann. Es wurde beobachtet, dass H2\_T2-45 mit keiner bis zu einer geringen Spreizung der Dolle ( $E.T._{mean} = 17,3\text{ mm}$ , d.h.  $t_N = t_{k,3,mean} = 2\text{ mm}$ ) den möglichen Nachteil haben könnte, eine geringe Tragfähigkeit aufzuweisen. Die niedrige Spreizung wurde ebenso bei H2\_T2-90 beobachtet ( $E.T._{mean} = 22,8\text{ mm}$ , d.h.  $t_N = t_{k,3,mean} = 2\text{ mm}$ ). Im Gegensatz zu den vorherigen Prüfkörpern zeigt H2\_T2-0 einen höheren Mittelwert der Eindringtiefe. Das Thema der Tragfähigkeit in Abhängigkeit von der Spreizung wird in den TV2 eingehend untersucht (vgl. 3.5).



a)



b)



b)



d)



c)



f)

Abbildung 3-6 Rissverhalten auf der Oberfläche: a) für H1\_T1-0\_T2-90\_G2; b) H1\_T1-0\_T2-45\_G2; c) H1\_T1-0\_T2-90\_G1; d) H2\_T1-0\_T2-90\_G2; e) H2\_T1-0\_T2-0\_G2; f) H2\_T1-0\_T2-90\_G1.



a) H1\_T2-0: G1



b) H1\_T2-45: G1



c) H1\_T2-45: G2



d) H1\_T2-90: G1



e) H2\_T2-0: G1



f) H2\_T2-45: G2



g) H2\_T2-90: G1

Abbildung 3-7 Rissverhalten in der Dolle für: a) H1\_T2-0\_G1; b) H1\_T2-45\_G1; c) H1\_T2-45\_G2; d) H1\_T2-90\_G1, e) H1\_T2-0\_G1; f) H2\_T2-45\_G2 und g) H2\_T2-90\_G1.

### 3.4.6 Schlussfolgerung

Nach der Analyse der Bruchgefahr und Rissbildung in den Materialien des Bauteils und der Holzkeildolle wurden die maßgebenden geometrisch-konstruktiven Parameter der Holzkeildolle festgelegt.

Alle HKD Konfigurationen, die eine Nutposition mit  $\varphi = 0^\circ$  auf S1 oder S2 vorsehen (T2-0\_G1; T2-0\_G2; T2-90\_G2) werden aufgrund der höheren Wahrscheinlichkeit der Rissbildung in dem Bauteil und wegen der niedrigeren Werten des Restkerns - überwiegend für H1 beobachtet - ausgeschlossen. Dieser Ausschluss wird auch für H2 verfolgt, da eine Vereinfachung der konstruktiven Regeln als ein Ziel dieses Forschungsvorhabens definiert ist.

Für die Konfigurationen T2-45 und T2-90 zeigt sich aufgrund des Widerstandes des Bauteils beim Einschlag der Dolle in das Bohrloch eine Verdrehung der Anfangsstellung der Nut. Die Bauteile aus Eiche beweisen mehr Widerstand als die Bauteile aus Fichte, d.h. das Verdrehen der Dollen bei einem Bauteil aus Eiche ist als sehr wahrscheinlich eingestuft. Es wird angenommen, dass die Abweichung zur vorgesehenen Anfangsstellung der Nut  $\varphi \approx \mp 45^\circ$  der Grund ist. Aufgrund der Verdrehung besteht auf einer Seite für die Konfiguration T2-45 ( $\varphi = 45^\circ$ ) das Risiko, die Konfiguration  $\varphi = 0^\circ$  zu erreichen und somit erfolgt eine konsequente Maximierung der Rissbildung. Auf der anderen Seite besteht für die Konfiguration T2-90 ( $\varphi = 90^\circ$ ) die Möglichkeit, die Konfiguration  $\varphi = 45^\circ$  zu erreichen, was keinen besonderen Nachteil darstellt und eher noch als günstigere Konfiguration anzusehen ist. Aus diesen Gründen wird die Geometrie T2-90 als Einbau-Geometrie favorisiert. Weitere Konsequenzen auf die Tragfähigkeit dieser letzten Konfiguration und der Tragfähigkeit selbst sind in dem TV2 (vgl. 3.5) untersucht.

Eine weitere Konsequenz des Widerstands des Bauteils auf die HKD ist die niedrige Eindringtiefe des Keils in die Nut, die überwiegend für die Konfigurationen T2-90 und T2-45 in den jeweiligen Holzkombinationen gilt. Die reduzierte Eindringtiefe könnte Auswirkungen auf die Tragfähigkeit der Holzkeildolle haben. Dieser Einfluss wird in den Tastversuchen TV2 untersucht (vgl. 3.5).

Im Abschnitt 2.6 sind alle wesentlichen Einbauparameter nach den *Erfahrungswerten* zusammengefasst. Im Abschnitt 2.5 ist berichtet worden, dass die Holzkeildollen im eingebauten Zustand eine G2 Konfiguration haben. Die Wahl dieses Parameters wurde aus Verdacht eines Versagens der Kernzone des Stiftes ausgewählt. Aus unseren Testergebnissen geht dagegen hervor, dass die Konfiguration G2 ein erhöhtes Risiko für die Versagenshäufigkeit im Nutbereich hat und die Rissbildung auf der Oberfläche des Bauteils im Vergleich zur G1 steigt. G1 zeigt sich als die Konfiguration mit der geringsten Rissbildung. Ein anderer Vorteil der G1-Konfiguration aus handwerklicher Sicht ist ein geringerer Aufwand bei der Herstellung. Die Geometrie G1 wird daher als geometrisch-konstruktive Konfiguration für die Herstellung der HKD favorisiert.

Zusammenfassend zeigt sich die Konfiguration T2-90\_G1 als die günstigste / zu favorisierende Konfiguration. Denn diese zeigt eine Minimierung der Rissbildung im Bauteil und der Dolle bei gleichzeitig geringem Herstellungsaufwand.

## 3.5 Tastversuche TV2: Zugtragfähigkeit Holzkeildolle

### 3.5.1 Ziele

Die Ziele der Tastversuche TV2 sind:

- Analyse der axialen Zugtragfähigkeit der Holzkeildolle.
- Bestimmung der Einflüsse der geometrischen Konfigurationen aus TV1 auf das Tragverhalten und die Tragfähigkeit.
- Optimierung des Tragverhaltens durch die Kalibrierung der maßgebenden geometrisch-konstruktiven Parameter.
- Bestimmung der Versagensmechanismen der Holzkeildolle.
- Festlegung einiger Fertigungsregeln.

### 3.5.2 Materialien

Die Probekörper sind vor der Prüfung in der Klimakammer auf  $T = 20^\circ$  und  $LF = 65\%$  nach EN 408 [34] klimatisiert. Die mechanischen Holzeigenschaften (lokale Rohdichte, Holzfeuchte und E-Moduln) der Prüfkörper sind sowohl für die Bauteile als auch für die Dollen ermittelt. Die Bestimmung der lokalen Rohdichte erfolgt aus dem Gewicht und Volumen des jeweiligen Prüfstückes; die Ermittlung der Holzfeuchte mittels elektrischer Widerstands-Messmethode. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 3-5 für das Bauteil und in der Tabelle 3-6 für die Dolle aufgeführt.

### 3.5.3 Geometrie der Prüfkörper

Die Prüfkörper simulieren eine einschnittige Verbindung mit einer Holzkeildolle. Die Holzkeildolle wirkt in axialem Zug und hält die zu verbindenden Bauteile zusammen. Dargestellt in dieser Versuchsreihe ist das Verhalten einer halben Verbindung. Jeder Prüfkörper besteht aus einem Bauteil, einer genuteten Dolle und einem Keil. Die Prüfkörper sind nach den *Erfahrungswerten* mit dem festen Parameter  $T1-0$  (vgl. 2.6) und unter Anordnung G1 - Nut auf Seite 1 parallel zur Nut auf Seite 2 - aus den Schlussfolgerungen aus TV1 vorbereitet. Die allgemeinen Fertigungsmaße und der Aufbau der Prüfkörper sind in der Tabelle 3-4 und in der Abbildung 3-8 zu entnehmen. Die Holzbauteile und Holzkeildollen mit den bekannten geometrischen Parametern werden wie in Tabelle 3-7 kombiniert und getestet. Der Keil wird in die Nut eingetrieben und es entsteht die axiale Zugtragfähigkeit der Holzkeildolle.

Sowohl Nut als auch Keil weisen maßliche Ungenauigkeiten zwischen den theoretischen Vorgaben und der realen Anfertigung auf. Die speziellen Fertigungsmaße der einzelnen Prüfkörper und seiner Komponenten sind in der Tabelle 3-5 zu entnehmen. Bei handgefertigten Verbindungsmitteln sind die Abweichungen oder Imperfektionen nicht zu vermeiden und müssen in den Testergebnissen berücksichtigt werden.

**Tabelle 3-4 Geometrische festgelegte Parameter und Holzarten für die TV2**

	Holzart	Maße
<b>Bauteil</b>	Fichte C24, Eiche D30	$(b_B \times h_B \times l_B) = 120 \times 60 \times 230 \text{ mm}^3$
<b>Bohrloch</b>	-	$d_{B,LOCH} = d_D = 20 \text{ mm}$
<b>Dolle</b>	Eiche D30	$d_D = 20 \text{ mm (rund)}$ $l_D = 500 \text{ mm}$
<b>Nut</b>	-	$t_N = 2 \text{ mm}$ $l_{N,1} = 30 \text{ mm}$
<b>Keil</b>	Eiche D30	Die Maße der Keile wurden auf Basis der <i>Erfahrungswerte</i> gefertigt. Die Keile entsprechen nicht den theoretischen Standards in Abbildung 2-3, sondern die Parameter $l_K$ , $\alpha_{K,1}$ , $t_{K,1}$ und $t_{K,2}$ unterliegen leichten Schwankungen. Festgelegt für bessere Kontrolle der Eindringtiefe: $l_K = 30 + 10 \text{ mm} = 40 \text{ mm}$

Tabelle 3-5 Prüfkörpereigenschaften TV2: Bauteil

Geometrie	Versuchskörper	Bauteil		$b_B$ [mm]	$h_B$ [mm]	$l_B$ [mm]	$d_{B,LOCH}$ [mm]	$V_{B,Loch}$ [cm <sup>3</sup> ]	$m_B$ [g]	$\rho_{B,20,65}$ [kg/cm <sup>3</sup> ]	$U_{B,mess}$ [%]	$U_{B,mean}$ [%]
		Stück Nr.	Holzart									
H1_T1-0_T2-45_G1	TV-2_H1_T2-45:a	(1)	Fichte	119,37	60,50	229,51	19,20	1639,98	876,60	0,535	13,10	13,31
	TV-2_H1_T2-45:b	(1)		119,20	59,50	229,60	19,80	1610,09	891,60	0,554	12,85	
	TV-2_H1_T2-45:c	(1)		119,60	59,50	230,10	19,70	1619,30	904,00	0,558	13,45	
	TV-2_H1_T2-45:d	(2)		119,30	59,30	229,50	19,40	1606,07	889,40	0,554	13,30	
	TV-2_H1_T2-45:e	(2)		119,50	59,30	229,70	19,30	1610,39	890,40	0,553	13,85	
H1_T1-0_T2-90	TV-2_H1_T2-90:a	(2)	Fichte	119,70	59,30	229,70	19,40	1612,93	894,20	0,554	13,05	13,42
	TV-2_H1_T2-90:b	(2)		119,50	59,60	229,50	19,60	1616,56	889,40	0,550	13,15	
	TV-2_H1_T2-90:c	(2)		119,50	59,50	229,70	19,30	1615,82	897,10	0,555	14,15	
	TV-2_H1_T2-90:d	(2)		119,40	59,60	229,50	19,30	1615,74	905,40	0,560	13,15	
	TV-2_H1_T2-90:e	(2)		119,30	59,40	229,50	19,40	1608,78	884,00	0,549	13,60	
H2_T1-0_T2-0	TV-2_H2_T2-0:a	(1)	Eiche	120,00	60,00	229,90	19,50	1637,36	1156,60	0,706	13,25	12,93
	TV-2_H2_T2-0:b	(1)		119,80	60,10	229,80	19,70	1636,24	1208,90	0,739	13,10	
	TV-2_H2_T2-0:c	(1)		119,60	60,10	229,90	19,60	1634,38	1191,80	0,729	13,15	
	TV-2_H2_T2-0:d	(1)		120,40	60,10	229,90	19,60	1645,43	1179,00	0,717	13,15	
	TV-2_H2_T2-0:e	(1)		119,90	60,40	229,80	19,50	1646,16	1157,20	0,703	12,00	
H2_T1-0_T2-45	TV-2_H2_T2-45:a	(2)	Eiche	120,00	60,20	229,60	19,70	1640,28	1262,60	0,770	14,35	14,80
	TV-2_H2_T2-45:b	(2)		119,80	60,50	230,00	19,70	1648,58	1259,60	0,764	14,40	
	TV-2_H2_T2-45:c	(2)		120,00	60,00	229,60	19,80	1634,65	1332,60	0,815	15,30	
	TV-2_H2_T2-45:d	(2)		119,80	60,20	229,70	19,70	1638,24	1270,20	0,775	15,20	
	TV-2_H2_T2-45:e	(2)		119,90	60,30	229,70	19,70	1642,34	1269,20	0,773	14,75	
H2_T1-0_T2-90	TV-2_H2_T2-90:a	(1)	Eiche	119,90	60,10	229,60	19,80	1635,99	1245,00	0,761	12,70	13,62
	TV-2_H2_T2-90:b	(1)		119,80	60,00	229,80	19,60	1633,70	1268,00	0,776	14,75	
	TV-2_H2_T2-90:c	(1)		119,90	60,30	229,80	19,60	1643,25	1181,40	0,719	12,25	
	TV-2_H2_T2-90:d	(2)		119,80	60,00	229,80	19,90	1633,14	1256,80	0,770	14,65	
	TV-2_H2_T2-90:e	(2)		120,10	60,20	229,80	19,70	1643,11	1269,60	0,773	13,75	

Tabelle 3-6 Prüfkörpereigenschaften TV2: Dolle

Geometrie	Versuchskörper	Dolle Nr.	Holzart Bauteil	$l_N$ [mm]	$b_N$ [mm]	$d_D$ [mm]	$d_{D,pausch}$ [mm]	$V_D$ [cm³]	$m_D$ [g]	$\rho_{D,20,65}$ [kg/cm³]	$U_{D,mess}$ [%]	$U_{D,mean}$ [%]
H1_T1-0_T2-45_G1	TV-2_H1_T2-45:a	1	Eiche	29,00	2,70	19,20	500,00	143,26	106,00	0,740	6,95	6,95
	TV-2_H1_T2-45:b	2		30,00	2,40	19,80	500,00	152,53	113,40	0,743	-	
	TV-2_H1_T2-45:c	3		31,50	2,80	19,70	500,00	150,67	113,40	0,753	-	
	TV-2_H1_T2-45:d	4		30,00	2,10	19,40	500,00	146,57	90,40	0,617	-	
	TV-2_H1_T2-45:e	5		28,50	2,30	19,30	500,00	145,01	108,80	0,750	-	
H1_T1-0_T2-90	TV-2_H1_T2-90:a	6	Eiche	29,00	2,40	19,40	500,00	146,45	110,40	0,754	-	6,93
	TV-2_H1_T2-90:b	7		29,00	2,20	19,60	500,00	149,61	103,60	0,692	-	
	TV-2_H1_T2-90:c	8		30,50	2,80	19,30	500,00	144,63	81,60	0,564	6,00	
	TV-2_H1_T2-90:d	9		31,50	2,40	19,30	500,00	144,82	95,20	0,657	-	
	TV-2_H1_T2-90:e	10		28,00	3,10	19,40	500,00	146,11	112,00	0,767	7,85	
H2_T1-0_T2-0	TV-2_H2_T2-0:a	11	Eiche	30,00	2,30	19,50	500,00	147,98	108,00	0,730	-	-
	TV-2_H2_T2-0:b	12		28,00	2,80	19,70	500,00	150,86	93,00	0,616	-	
	TV-2_H2_T2-0:c	13		30,00	1,90	19,60	500,00	149,74	79,40	0,530	-	
	TV-2_H2_T2-0:d	14		29,00	2,40	19,60	500,00	149,50	109,80	0,734	-	
	TV-2_H2_T2-0:e	15		31,00	2,40	19,50	500,00	147,87	101,40	0,686	-	
H2_T1-0_T2-45	TV-2_H2_T2-45:a	16	Eiche	29,00	2,20	19,70	500,00	151,15	101,00	0,668	-	6,85
	TV-2_H2_T2-45:b	17		30,00	2,80	19,70	500,00	150,75	95,00	0,630	-	
	TV-2_H2_T2-45:c	18		28,00	2,30	19,80	500,00	152,68	105,00	0,688	-	
	TV-2_H2_T2-45:d	19		29,00	2,20	19,70	500,00	151,15	109,00	0,721	6,85	
	TV-2_H2_T2-45:e	20		29,00	2,40	19,70	500,00	151,03	90,00	0,596	-	
H2_T1-0_T2-90	TV-2_H2_T2-90:a	21	Eiche	29,00	2,50	19,80	500,00	152,52	104,40	0,685	8,20	7,75
	TV-2_H2_T2-90:b	22		30,00	2,00	19,60	500,00	149,68	102,80	0,687	-	
	TV-2_H2_T2-90:c	23		28,00	2,60	19,60	500,00	149,43	103,80	0,695	-	
	TV-2_H2_T2-90:d	24		28,50	2,20	19,90	500,00	154,27	110,60	0,717	7,30	
	TV-2_H2_T2-90:e	25		28,50	2,40	19,70	500,00	151,06	109,00	0,722	-	

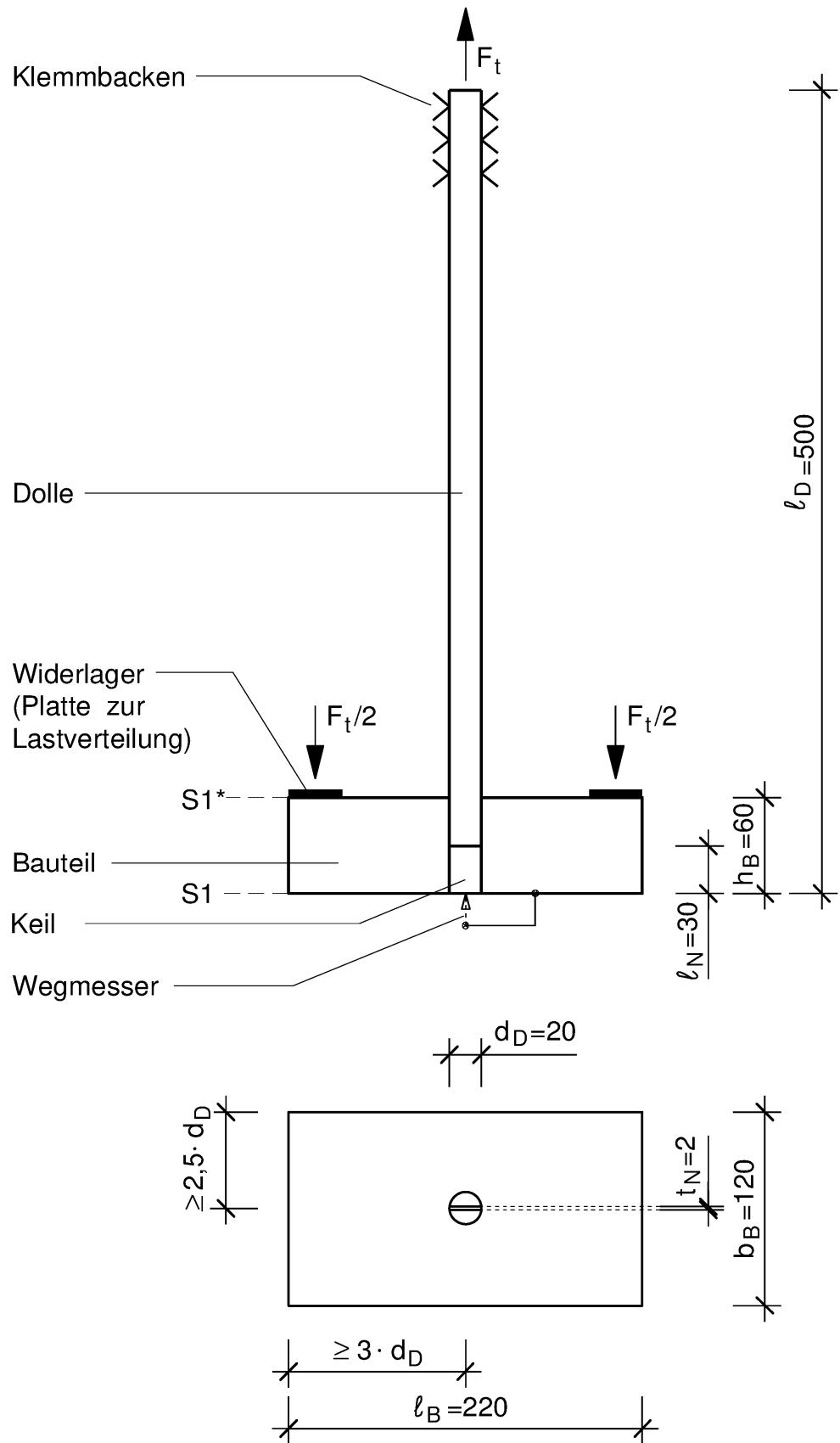


Abbildung 3-8 Prüfkörpergeometrie und -aufbau für die Zugprüfung TV2

Tabelle 3-7 Getestete geometrische Kombinationen für die TV1

Geometrische Kombination	Wiederholungen für Holzkombination	
	H1	H2
T1-0_T2-0	0	7
T1-0_T2-45	5	5
T1-0_T2-90	5	7

### 3.5.4 Methoden

In der Tastversuchsserie TV2 wird die Verbindung mittels Holzkeildolle bei axialer Zugbeanspruchung getestet.

Die Zugprüfung ist mit einer universalen mechanischen Prüfmaschine mit einer weggesteuerten Prüfung (Geschwindigkeit  $v = 0,05 \text{ mm/s}$ ) durchgeführt. Abbruchkriterien sind (a) die Verschiebung der Holzkeildolle im Bohrloch bis  $\varepsilon = 35 \text{ mm}$ , (b) das Erreichen einer Last (nach Versagen) von  $F_{exp} \leq 2 \text{ kN}$  oder (c) Zugversagen parallel zur Faser der Dolle.

Für die Messung der Verschiebung der Holzkeildolle in dem Bohrloch des Bauteils wurde ein induktiver Wegaufnehmer zwischen der unteren Bauteiloberfläche auf S1 und der Dolle installiert.

Methode des Einbaus und der Prüfung:

- (Schritt 0): Vor dem Test erfolgt das Einbringen der Dolle in das Bohrloch des Bauteils.
- (Schritt 1): Manuelles Eintreiben des Keils in die Nut (mit Hammerschlag) bis zu einer Eindringtiefe in die Nut  $E.T_{S1,max} \leq 30\text{mm}$  ( $E.T_{S1,max} = l_N$ ). Drei Kontrolllinien auf dem Keil führen zu der richtigen Einbautiefe.
- (Schritt 2): Der Prüfkörper ist in der Prüfmaschine positioniert. Die Dolle ist zwischen den Stahlbacken, für die Applikation der Zugkraft, eingespannt. Das Ausziehen der Holzkeildolle (vgl. Abbildung 3-9) wird bis zum definierten Abbruchkriterium (a), (b), oder (c) vorgenommen.

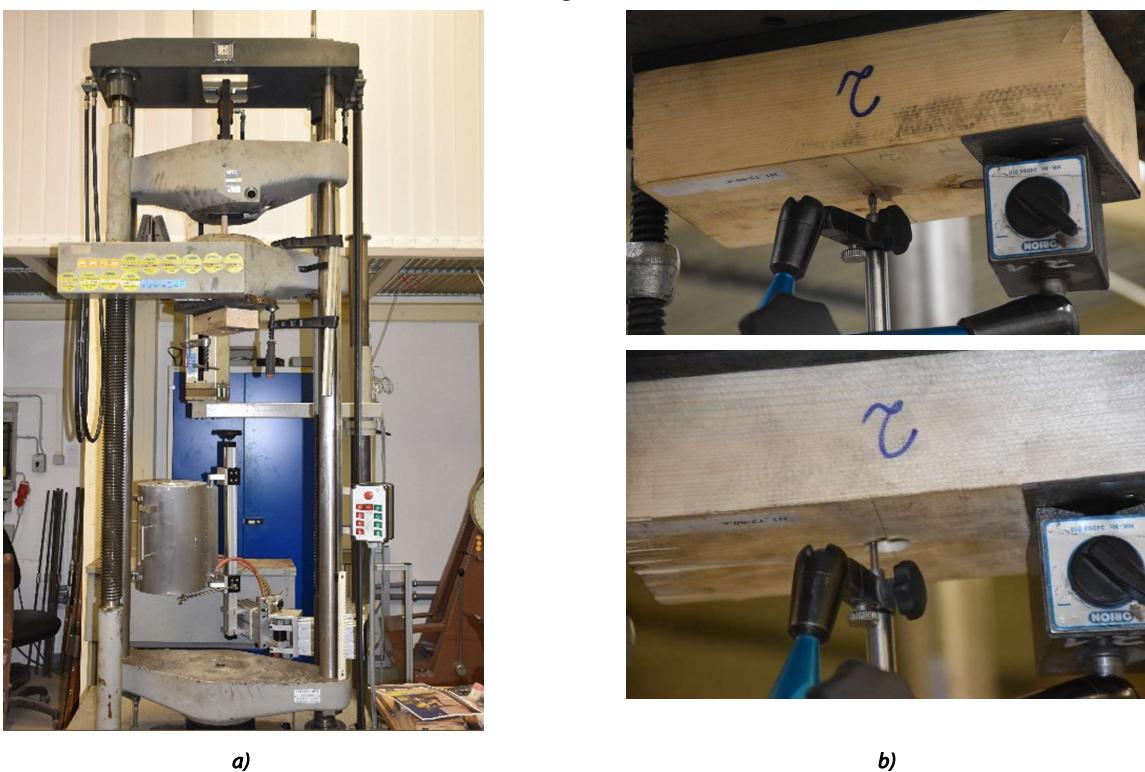


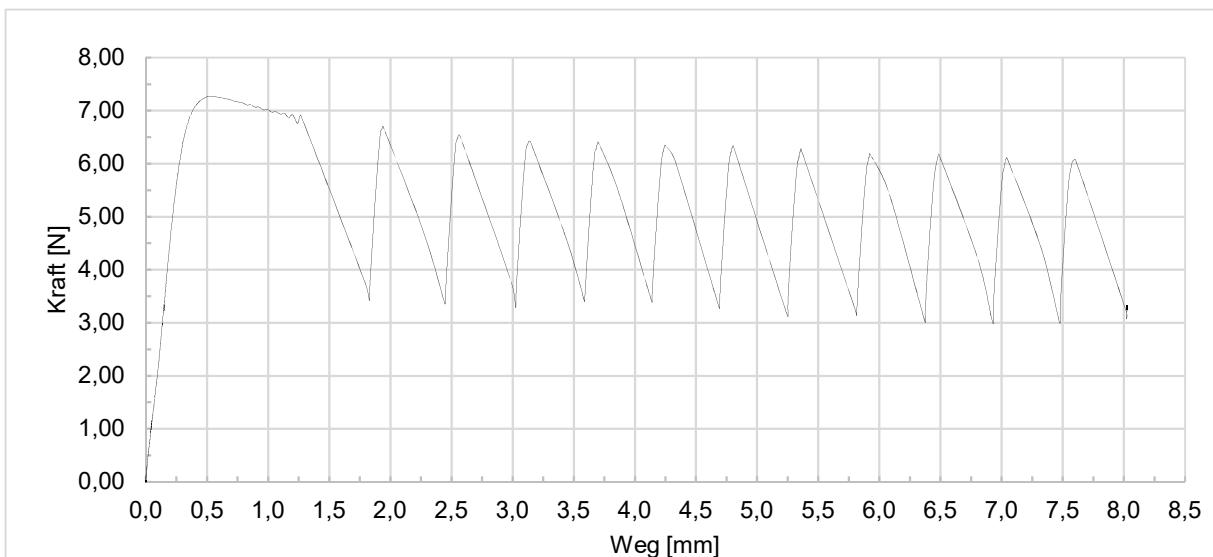
Abbildung 3-9 Testaufbau der Zugprüfung TV2 a) Testaufbau b) induktiver Wegaufnehmer zwischen Bauteiloberfläche und Dolle für die Messung der lokalen Verschiebung der HKD: Vor (oben) und nach (unten) der Prüfung.

### 3.5.5 Prüfergebnisse

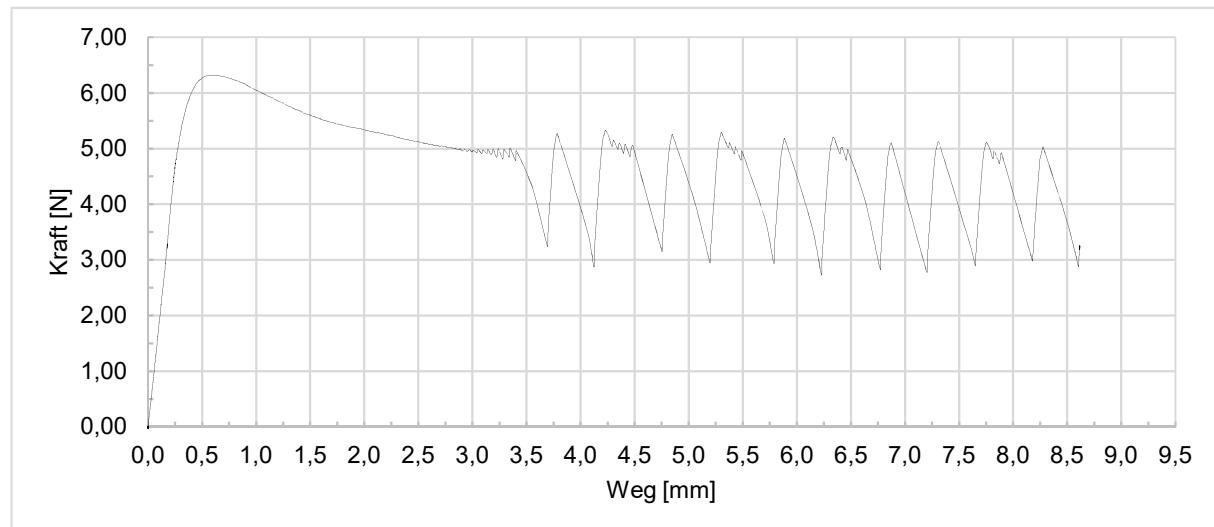
#### Verhalten

Im folgenden Diagramm 3-4 sind beispielhaft Kraft-Weg-Diagramme der Prüfung TV2 abgebildet. Das Verhalten der Prüfkörper zeigt sich insgesamt sehr homogen und unabhängig von der jeweils vorhandenen Holzkombination. Die Prüfkörper erreichen ein Lastmaximum im anfänglich linearen Bereich, das die Tragfähigkeit infolge Formschluss zwischen Holzkeildolle und Bauteil darstellt. In diesem Punkt ist auch die maximale Haftreibung erreicht und beim Verbindungsmittel tritt eine Plastifizierung des verkeilten Bereiches auf. Es folgt „das Komprimieren“ des Verbindungsmittels im Bohrloch, das im Diagramm durch einen mehr oder weniger ebenen Bereich mit stetig abfallender Last gekennzeichnet ist. Dieser Bereich ist abhängig von der Fertigung und der Kontaktfläche zwischen Dolle und Bauteil. In dieser „Plastifizierungsphase“ erfährt die Kontaktfläche des Verbindungsmittels und des Bohrlochs eine Veränderung der Oberflächentopologie mit der Konsequenz des Lastabfalls. Die Plastifizierungsphase ist für H1 tendenziell größer als für H2. Eine Erklärung dafür ist, dass sich in H1 aufgrund des geringeren Widerstands des Bauteils ein „größerer“ Spreizwinkel ausformt. Weiterhin ist aufgrund des niedrigeren Widerstandes des Bauteils und der Gestalt der mikroskopischen Oberfläche von Fichte „das Komprimieren“ des Verbindungsmittels von einem geringeren Widerstand geprägt. Am Ende dieser Phase beginnt die zweite Plastifizierungsphase, welche sich mit dem zackenförmigen Verlauf im Diagramm darstellt. Hier ist die maximale Gleitreibung erreicht und das Verbindungsmittel rutscht im Bohrloch. Dieser plötzliche Lastabfall wird von einer Verzahnung der mikroskopischen Struktur der Holzoberfläche gestoppt und die Verbindung erfährt einen weiteren Lastanstieg bis zur erneuten Plastifizierung der Holzfaser im „neuen“ Lastübertragungsbereich und zum erneuten Erreichen der Gleitreibung. Die Kontaktfläche zwischen Verbindungsmittel und Bohrloch wird aufgrund „des Rutschens“ des Verbindungsmittels daher kontinuierlich verkleinert und die Tragfähigkeit vermindert sich kontinuierlich.

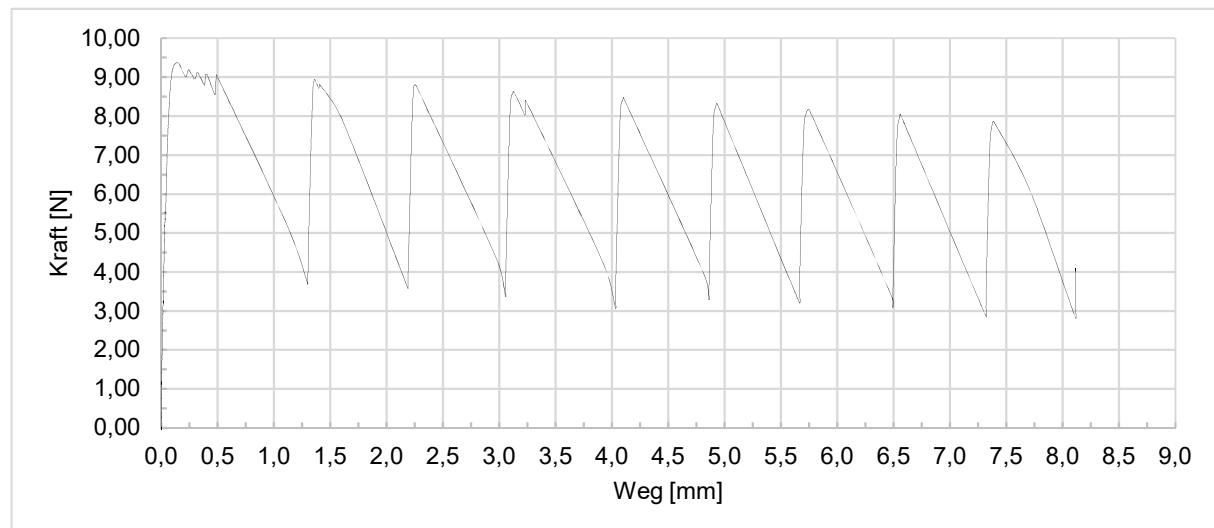
Wie in Diagramm 3-4-d) ersichtlich, wurde hier versucht, eine Tendenz für den Lastabfall anzugeben. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Maxima der „Zacken“ allmählich degressiv verlaufen, abhängig von der quasi linearen Verkleinerung der Kontaktfläche im Bohrloch (Mantelreibung).



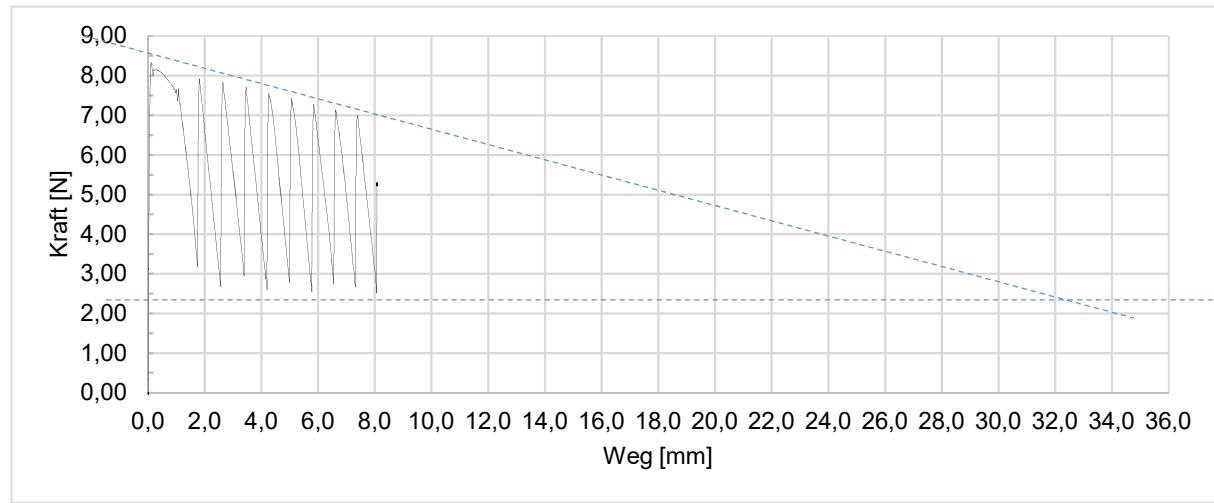
a) H1\_T1-0\_T2-45:a

**Fortsetzung**

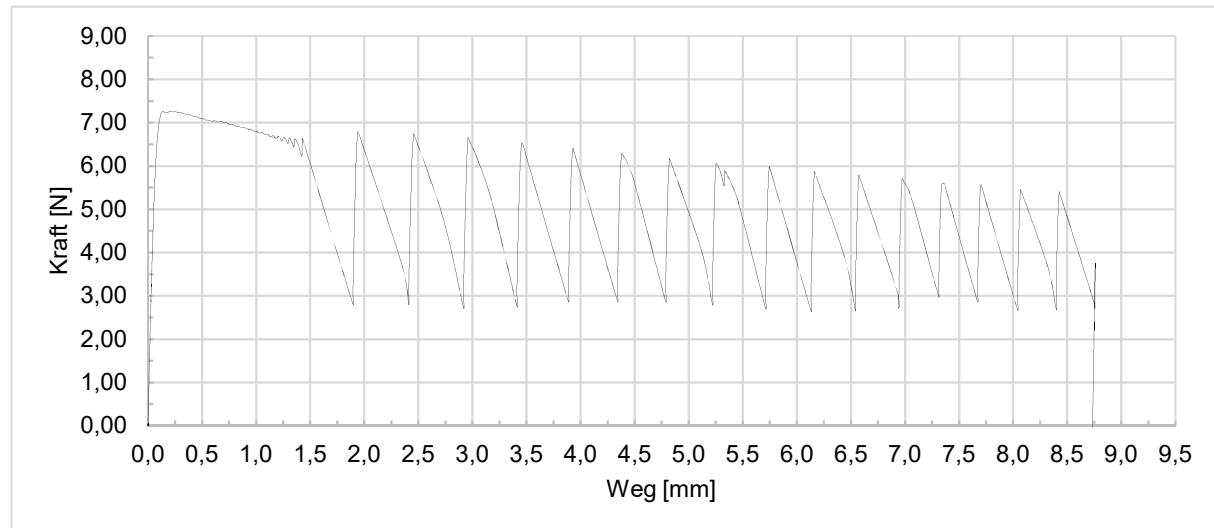
b) H1\_T1-0\_T2-90:a



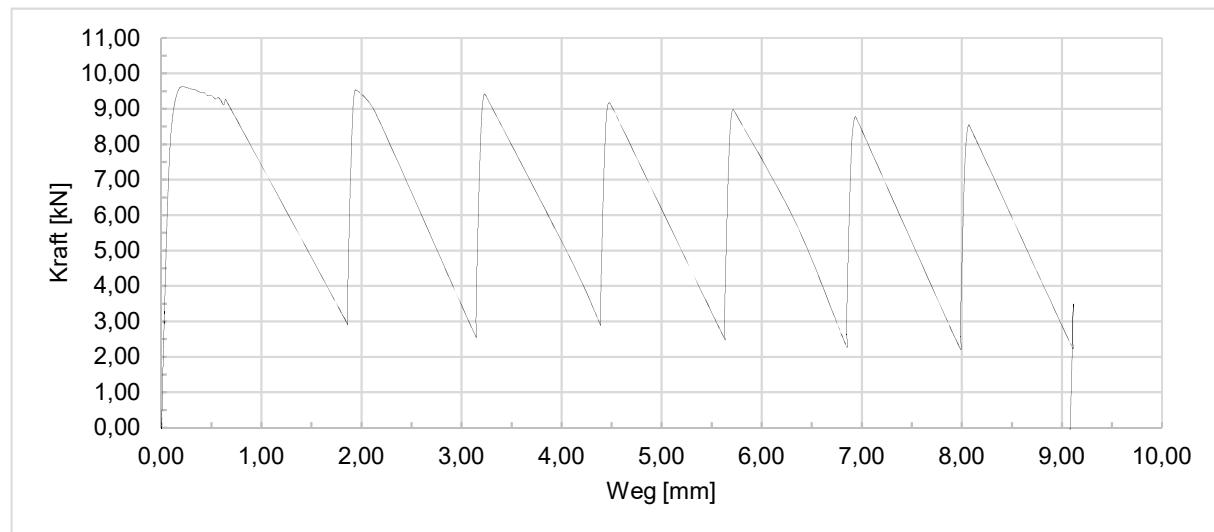
c) H2\_T1-0\_T2-0:e



d) H2\_T1-0\_T2-0:b

**Fortsetzung**

e) H2\_T1-0\_T2-45:d

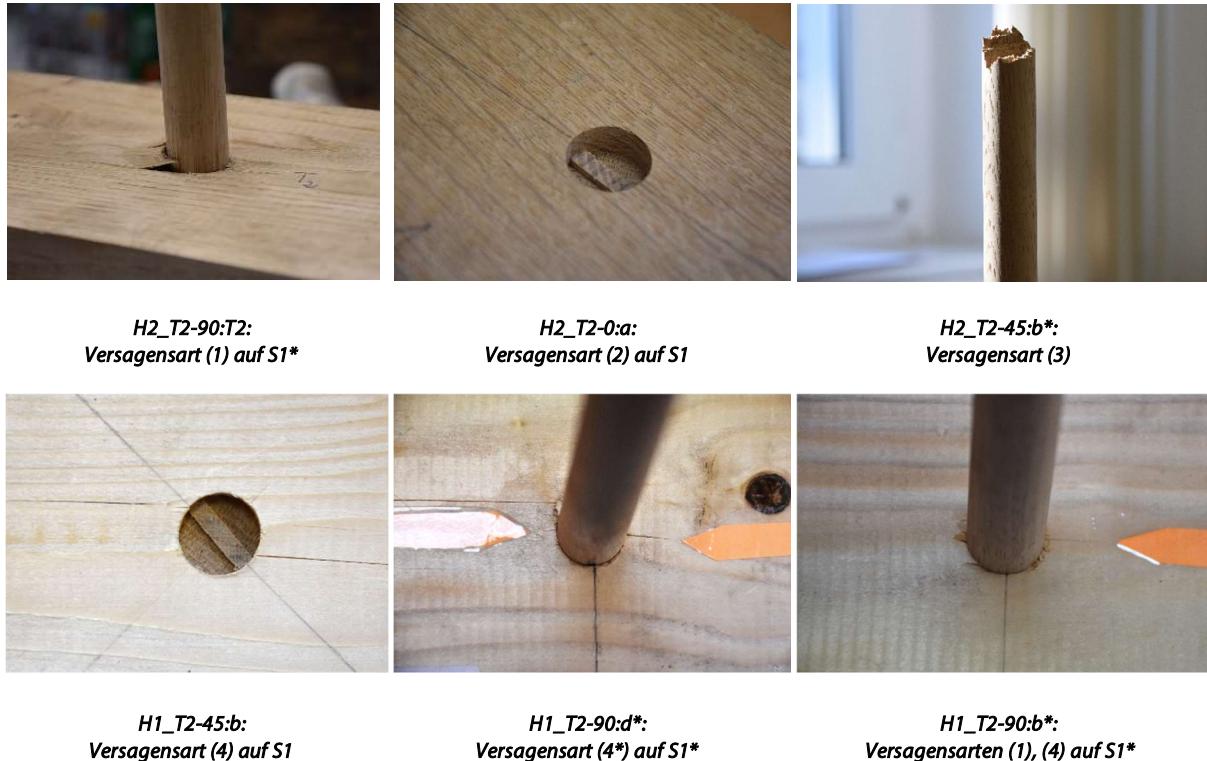


f) H2\_T1-0\_T2-90:b

**Diagramm 3-4 Last-Verformungsdiagramme von TV2****Versagensarten**

Nach dem Schritt 1 und Schritt 2 wurden vier Versagensmechanismen festgestellt (siehe Abbildung 3-10):

- (1) Rissbildung: Querzugversagen im Bauteil parallel zur Oberfläche am Bohrlochrand auf Seite S1\*
- (2) Verschiebung  $\Delta_l$  der Dolle im Bohrloch auf Seite S1
- (3) Zugversagen parallel zur Faser der Dolle
- (4) Rissbildung: Querzugversagen im Bauteil auf Seite S1
- (4\*) Rissbildung: Querzugversagen im Bauteil auf Seite S1\*



**Abbildung 3-10 Versagensarten in TV2 nach Abschluss der Zugversuche**

#### Rissverhalten

Das Rissverhalten auf der Bauteiloberfläche und im Nutboden wurde 1) nach der Installation des Keils und 2) nach der Zugprüfung überprüft.

#### Schlussfolgerungen für H1:

Bei der Konfiguration H1\_T2-45 reißt die Oberfläche bereits beim Eindringen des Keils zu 100% auf S1 und zu 20% auf S1\*. Nach dem Zugversuch liegt insgesamt die Wahrscheinlichkeit der Rissbildung auf den Oberflächen bei 80%. Die Wahrscheinlichkeit der Rissbildung im Nutboden liegt bei 12,5%.

Bei der Konfiguration H1\_T2-90 reißt die Oberfläche bereits beim Eindringen des Keils zu 0% auf S1 und zu 100% auf S1\*. Nach dem Zugversuch liegt die Wahrscheinlichkeit der Rissbildung auf den Oberflächen bei insgesamt 50%. Die gesamte Rissbildung findet auf der nicht sichtbaren Seite S1\* (Innenseite einer Reparaturverbindung) statt. Die Wahrscheinlichkeit der Rissbildung in dem Nutboden liegt bei 0%.

Die größte aufnehmbare Zugkraft für die Konfiguration H1 liefert die Prüfkörpergruppe T2-45. Nichtdestotrotz wird die Konfiguration H1\_T2-45 auf Grund der wahrscheinlichen Rissbildung auf der Oberfläche S1 ausgeschlossen.

Die Risse bilden sich während des Einschlags des Keils (auf den Bauteiloberflächen auf der äußeren Seite S1 und der inneren Seite S1\* der Reparaturverbindung) und bleiben meistens auch nach der Zugprüfung unverändert. Eine Ausnahme ist bei dem Prüfkörper H1\_T2-45:a beobachtet worden (vgl. Abbildung 3-11).

Die Risse sind Querzugsrisse. Auf der äußeren Seite S1 zeigen sich die meisten Risse im Kontaktdruckpunkt zwischen den Keil und der Bauteiloberfläche und weitere Risse auf der Hälfte der HKD in Richtung der Bauteilbreite (vgl. Abbildung 3-12). Auf der inneren Seite S1\* zeigen sich die Risse nur auf der Hälfte der HKD in Richtung der Bauteilbreite.

Schlussfolgerungen für die H2:

Alle Konfigurationen liefern ähnliche Ergebnisse hinsichtlich der Eindringtiefe des Keils und der Rissbildung auf den Bauteiloberflächen und in dem Kernbereich der Dolle, unabhängig vom Parameter T2.

Alle Konfigurationen liefern ähnliche Ergebnisse hinsichtlich der aufnehmbaren Zugkräfte. Auffällig ist, dass die Dolle 12, Versuchskörper T2-0:c, ein geringeres Gewicht / eine geringere Dichte aufwies als die übrigen gewogenen Dollen. Sie liefert eine aufnehmbare Zugkraft, die vom Mittelwert dieser Konfiguration stark abweicht. Die größte aufnehmbare Zugkraft im Mittelwert liefert die Konfiguration H2\_T2-90.

Die wenigen Risse auf der Bauteiloberfläche auf der Seite S1 zeigen sich als Querzugrisse auf der Hälfte der HKD in Richtung der Bauteilbreite. Die Risse bilden sich während des Einschlags des Keils und bleiben nach der Zugprüfung unverändert.

Weitere Informationen über die Wahrscheinlichkeit der Rissbildung in den Prüfkörper und Prüfkörpergruppen befinden sich in der Tabelle 3-8 und der Tabelle 3-9.

**Tabelle 3-8 Wahrscheinlichkeit der Rissbildung der Prüfkörper in TV2**

	Installation Keil			Nach Zugversuch			Gesamt	
	Riss auf Bauteiloberfläche S1	Riss auf Bauteiloberfläche S1*	Wahrscheinlichkeit Riss auf Bauteiloberfläche durch Keileinschlag	Riss auf Bauteiloberfläche S1	Riss auf Bauteiloberfläche S1*	Gesamtwahrscheinlichkeit Riss auf Bauteiloberfläche durch Zugbeanspruchung	Gesamtwahrscheinlichkeit Riss auf Bauteiloberflächen	Wahrscheinlichkeit Riss im Nutboden
H1_T2-45	100%	20%	60%	0%	40%	20%	80%	12,5%
H1_T2-90	0%	100%	50%	0%	0%	0%	50%	0%
H2_T2-0	20%	0%	10%	0%	0%	0%	10%	0%
H2_T2-45	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
H2_T2-90	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%



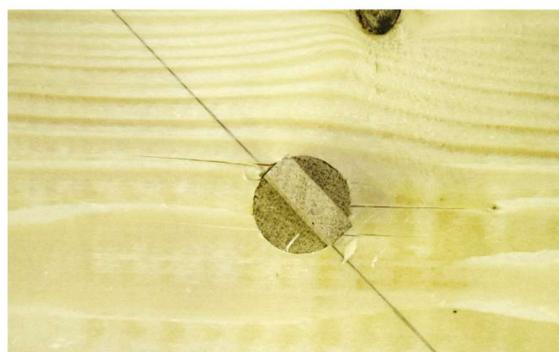
**Abbildung 3-11 Geänderte Rissbildung auf S1\* in den Prüfkörper H1\_T2-45:a nach Zugprüfung (TV2)**



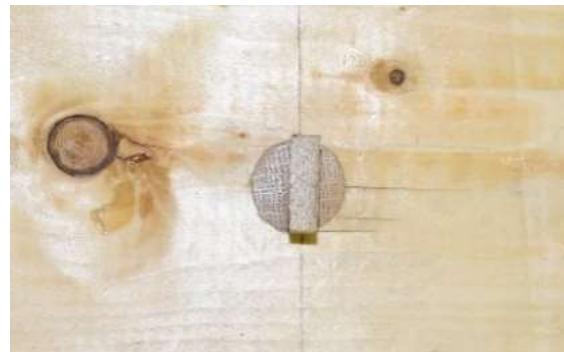
a) H1\_T2-45:a (Riss)



b) H1\_T2-45:b (Riss)



c) H1\_T2-45:c (Riss)



d) H1\_T2-90:d (Riss)



e) H2\_T2-0:a (Riss)



f) H2\_T2-0:c



g) H2\_T2-45:b



h) H2\_T2-90:b

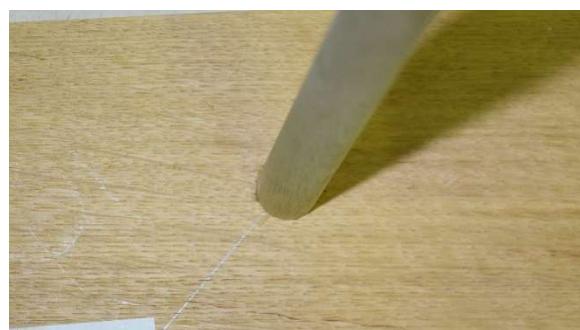
Abbildung 3-12 Rissverhalten auf S1 in den Prüfkörpern nach Einschlag des Keils (TV2)



a) H2\_T2-0:a



b) H2\_T2-0:c



c) H2\_T2-45:b\*



H2\_T2-90:b

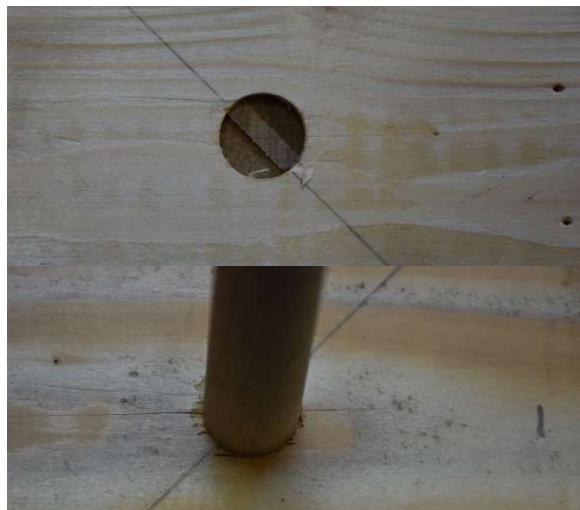
Abbildung 3-13 H2: Rissverhalten auf S1\* in den Prüfkörpern nach Einschlag des Keils (TV2)



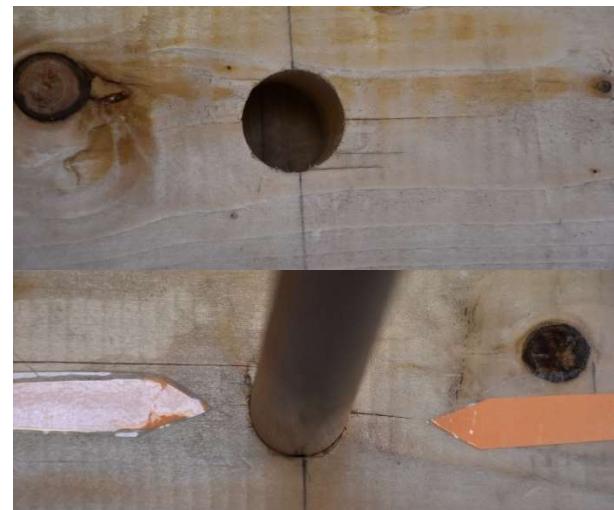
a) H1\_T2-45:a



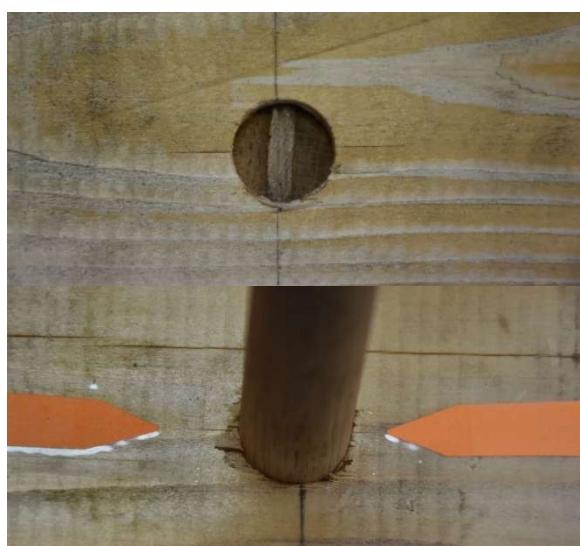
b) H1\_T2-45:b



c) H1\_T2-45:c



d) H1\_T2-90:d



e) H1\_T2-90:e

Abbildung 3-14 H1: Rissverhalten auf S1 und S1\* in den Prüfkörpern nach Zugprüfung TV2



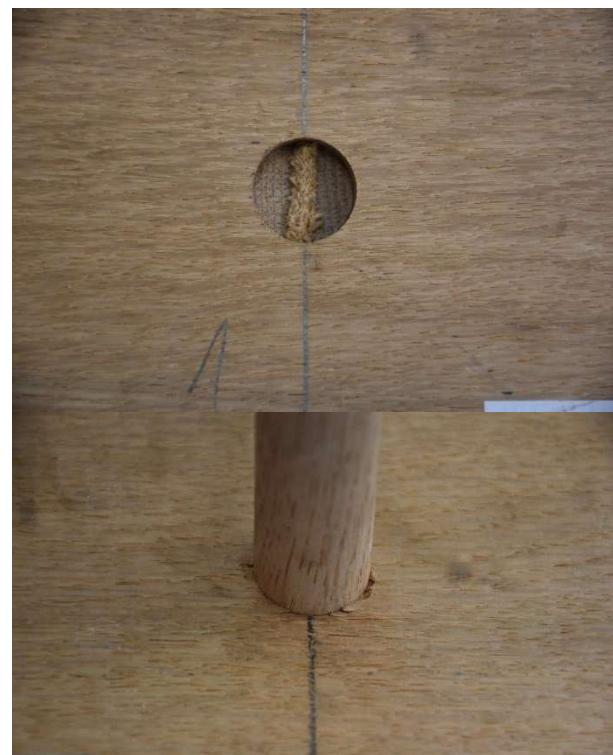
e) H2\_T2-0:a



f) H2\_T2-0:c



g) H2\_T2-45:b



h) H2\_T2-90:b

Abbildung 3-15 H2: Rissverhalten auf S1 und S1\* in den Prüfkörpern nach Zugprüfung TV2

Tabelle 3-9 Ergebnisse der TV2

Geometrie der Versuchs-körper	Nach Eintreiben des Keils					Nach Zugversuch					
	Versagen Mechanismus	E. T. [mm]	E. T. Mean [mm]	$t_N$ [mm]	$t_{N,mean}$ [mm]	Versagen Mechanismus	Rissbildung Nutboden	$F_{t,bruch}$ [kN]	$F_{t,bruch,mean}$ [kN]		
H1_T2-45:a	S1: 1 Riss X S1*: kein	29,0	29,8	4,5	4,5	1+2+4+4*	v: - h: -	7,27	7,15		
H1_T2-45:b	S1: 2 Riss X S1*: kein	30,0				1+2+4	v: nein h: nein	6,97			
H1_T2-45:c	S1: 3 Riss X S1*: 2 Riss -	30,0				2+4+4*	v: nein h: nein	8,76			
H1_T2-45:d	S1: 1 Riss X S1*: 1 Riss -	30,0				1+2+4+4*	v: nein h: Beschäd.	6,44			
H1_T2-45:e	S1: 2 Riss X S1*: kein	29,0				2+4	v: nein h: nein	6,29			
H1_T2-90:a	S1: kein S1*: 2 Riss -	28,0	29,0	4,0	4,3	1+2+4*	v: nein h: Beschäd.	6,32	5,90		
H1_T2-90:b	S1: kein S1*: 1 Riss -	29,5				1+2+4*	v: nein h: nein	6,58			
H1_T2-90:c	S1: kein S1*: 2 Riss -	29,5				1+2+4*	v: nein h: nein	5,89			
H1_T2-90:d	S1: 1 Riss X S1*: 2 Riss -	29,5				1+2+4*	v: nein h: nein	4,81			
H1_T2-90:e	S1: 2 Riss - S1*: 2 Riss -	28,5				1+2+4*	v: nein h: nein				
H2_T2-0:a	S1: 3 Riss X S1*: kein	29,5	28,2	4,0	3,7	1+2	v: nein h: nein	10,92	8,96		
H2_T2-0:b	S1: kein S1*: kein	24,5				2	v: nein h: nein	8,33			
H2_T2-0:c	S1: kein S1*: kein	30,0				1+2	r: nein l: Beschäd.	6,24			
H2_T2-0:d	S1: kein S1*: kein	28,0				2	v: nein h: nein	9,17			
H2_T2-0:e	S1: kein S1*: kein	29,5				1+2	v: nein h: nein	9,37			
H2_T2-0_T3	S1: kein S1*: kein	30,0				2	v: nein h: nein	7,88			
H2_T2-0_T4	S1: kein S1*: kein	28,0				2	v: nein h: nein	10,87			
H2_T2-45:a	S1: kein S1*: kein	28,5	28,7	3,5	3,3	1+2	v: nein h: nein	8,68	8,17		
H2_T2-45:b	S1: kein S1*: kein	29,0				1+2+3	v: nein h: nein	8,99			
H2_T2-45:c	S1: kein S1*: kein	28,5				2	v: nein h: nein	8,61			
H2_T2-45:d	S1: Abschälen X S1*: kein	29,0				2	v: nein h: nein	7,27			
H2_T2-45:e	S1: Abschälen X S1*: kein	28,5				1+2	v: nein h: nein	7,32			
H2_T2-90:a	S1: kein S1*: kein	23,0	25,1	2,5	3,5	1+2	v: nein h: nein	8,74	9,23		
H2_T2-90:b	S1: kein S1*: kein	19,0				1+2	v: nein h: nein	9,63			
H2_T2-90:c	S1: kein S1*: kein	28,0				1+2	v: nein h: nein	8,47			
H2_T2-90:d	S1: kein S1*: kein	28,0				2	v: nein h: nein	11,5			
H2_T2-90:e	S1: kein S1*: kein	27,5				1+2	v: nein h: nein	10,28			
H2_T2-90_T1	S1: kein S1*: kein	30,0				1+2	v: nein h: nein	9,47			
H2_T2-90_T2	S1: kein S1*: kein	22,0				1+2	v: nein h: nein	6,5			
Legende:	X = vgl. Abbildung 3-16-a ; * = vgl. Abbildung 3-16-b ; - = vgl. Abbildung 3-16-c						1; 2; 3; 4; 4* = vgl. Abbildung 3-10; Beschäd. = Beschädigung vgl. Abbildung 3-16 und Abbildung 3-17				

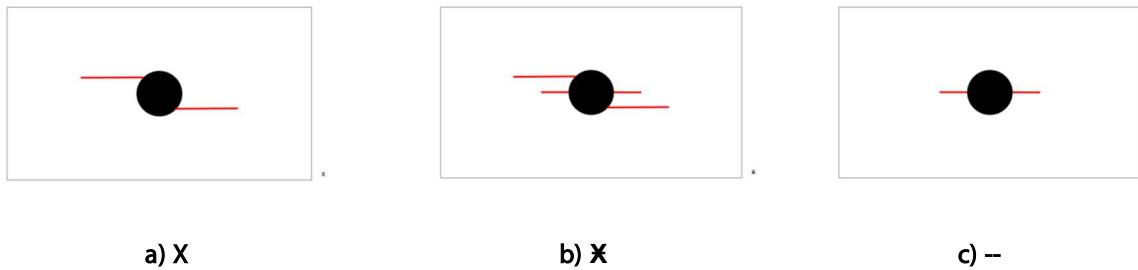


Abbildung 3-16 Versagensmechanismus / Rissbildung der Bauteiloberfläche. Legende für die Tabelle 3-9

Das Rissverhalten im Nutboden der Dolle wurde nach dem Test überprüft. Im Nutboden der Dolle wurden nur 6% (H1) und 0% (H2) Wahrscheinlichkeit des Rissversagens in den Prüfkörpern festgestellt. Zusätzlich sind Beschädigungen, Druckstellen im Nutboden oder auf den Nutwänden mit 10% (H1) und 3% (H2) der Prüfkörper [11] festgestellt worden. Für die Konfiguration G1 wurde ein geringeres Risiko für die Ausbildung von Rissen im Nutboden als Konfiguration G2 (vgl. Tabelle 3-9 und Abbildung 3-17).

### 3.5.6 Schlussfolgerung

In TV1 wurde der Keil maschinell eingetrieben; dagegen wurde in TV2 der Keil in die Nut händisch eingeführt. Die TV2 haben hinsichtlich  $\varphi$  ein unterschiedliches Ergebnis zu den TV1 geliefert. Das händische Eintreiben des Keils in TV2 zeigt, dass auch eine tiefere Eindringtiefe für die Orientierung der Nut  $\varphi = 90^\circ$  erreicht werden kann. In TV2 liefern alle T2-Orientierungen, unabhängig von  $\varphi$ , ähnliche Ergebnisse hinsichtlich der Eindringtiefe des Keils in die Nut. Durch händisches Eintreiben des Keils kann die Eindringtiefe  $E.T. = l_N = 30mm$  auch von H2\_T2-90 erreicht werden. In dem Fall einer niedrigeren Eindringtiefe, wie z.B. bei den Prüfkörpern H2\_T2-90:a, H2\_T2-90:b; H2\_T2-90:T2, wurde mit einem  $E.T._{mean} = 21,33mm$  eine  $F_{max,mean} = 8,29kN$  erreicht, welche annähernd dem Mittelwert der Tragfähigkeit für H2\_T2-45 (mit Eindringtiefe  $E.T. = l_N = 28,7mm$ ) entspricht. Die Schlussfolgerung ist, dass eine geringere Eindringtiefe des Keils, welche eine Reduzierung der Spreizung zur Folge hat, die Tragfähigkeit nur teilweise verringert. Die Hypothese lautet, dass solange sich durch den Einschlag des Keils ein Formschluss zwischen Holzkeildolle und Bauteil etabliert hat und beim Verbindungsmittel eine Plastifizierung des verkeilten Bereiches auftritt, wird bei einer geringeren Spreizung eine höhere Spreizwirkung erzielt wird.

Die Ergebnisse der Tragfähigkeit von T2-45 und T2-90 sind sehr gut. Auf der anderen Seite ist die Tragfähigkeit der Konfiguration T2-0 niedriger. Dazu bringt die Konfiguration T2-0 große Nachteile mit sich: eine relevante Rissbildung. Die Rissbildung auf der Bauteiloberfläche der äußeren Seite S1 und der inneren Seite S1\* der Reparaturverbindung bildet sich (für jede Konfiguration) schon während des Einschlags des Keils. Diese blieb bis auf eine Ausnahme nach der Zugprüfung unverändert.

Des Weiteren zeigte sich beim Einschlag der Dolle in das Bauteil eine Verdrehung der Stellung der Nut für all diese Konfigurationen. Eine Verdrehung  $\varphi = \mp 45^\circ$  der HKD in der Konfiguration T2-90 (mit dem Erreichen der Konfiguration T2-45) ist unbedenklich. Andererseits wirkt eine Verdrehung  $\varphi = \mp 45^\circ$  der HKD in der Konfiguration T2-45 (mit dem Erreichen der Konfiguration T2-0) für die Rissbildung (vgl. 3.4) ungünstig.

Die Konfiguration H2\_T2-90 zeigt die besseren Ergebnisse hinsichtlich der Mittelwerte der Tragfähigkeit. Die Konfiguration H1\_T2-90 zeigt die zweitbesten Ergebnisse hinsichtlich der Mittelwerte der Tragfähigkeit. Die Konfiguration T2-90 allgemein wirkt auch anhand der Verdrehung der HKD im Bohrloch unbedenklich. Aufgrund der Schlussfolgerungen aus TV1 und TV2 ist abzuleiten, dass die Konfiguration T2-90 die beste Einbau-Geometrie darstellt. Sie zeigt erstens eine minimierte Rissbildung auf den Holzoberflächen (H1 und H2) und zweitens bessere Mittelwerte bezüglich der Tragfähigkeit. Aus diesem Grund wird die Geometrie T2-90 als Einbau-Geometrie für alle Holzkombinationen festgelegt.



Abbildung 3-17 Rissbildung der Nutboden nach der Zugprüfung: a) H1\_T2-45:d ; c) H1\_T2-90:a; c) H1\_T2-90:e; d) H2\_T2-0.

## 3.6 FE-Simulationen

### 3.6.1 Ziele

Weitere Ergebnisse wurden in den FE-Simulationen erzeugt. Ziel der Simulationen ist die Bestätigung der Ergebnisse der Tastversuche TV1, mit Hilfe theoretischer und numerischer Ansätze, basierend auf der Finite-Elemente-Methode. Die Simulationen wurden in zwei Phasen entwickelt, nach dem TV1 und nach dem TV2. Diese Phasen stellen eine Verfeinerung des FE-Modells dar und liefern schrittweise realitätsnahe Ergebnisse.

### 3.6.2 Frühere Simulationen

Zweck der ersten FE-Simulation war die Konzeption eines FE-Modells der Reparaturverbindung mit Holzkeildolle. Das zu ergebenden geometrisches Modell wurde nach realen Prüfungsergebnissen kalibriert, um verschiedene Materialkombinationen und darauffolgendes Tragverhalten darstellen zu können.

#### 3.6.2.1 Materialien

Die Materialeigenschaften für Bauteil und Dolle im Modell wurden durch einen iterativen Prozess, auf Basis von *Material-Bekannten*, aus experimentellen Versuchen und optischen Messergebnissen kalibriert. Die Tabelle 3-11 enthält die tatsächlichen Materialeigenschaften  $E_{m,0}$  und  $\rho$  der Prüfkörper.

*Material-Unbekannte* wurden in dieser ersten Simulationsreihe auf Basis von Literaturquellen ausgewählt, wie Poissonzahlen ( $\mu_{12}$ ;  $\mu_{23}$ ;  $\mu_{13}$ ) aus [30] (S. 585) und das Verhältnis von den Schubmodulen ( $G_{12}$ ;  $G_{23}$ ;  $G_{13}$ ) aus [31] (S. 275). Basierend auf den experimentell ermittelten Biege-E-Moduli ( $E_{m,0}$ ) und Rohdichten ( $\rho$ ) für Bauteil und Dolle wurden die entsprechenden Holzklassen nach DIN EN 338 [23] zugeordnet.

In der Tabelle 3-12 sind die übernommenen Eigenschaften für die Materialien des FE-Modells zu finden. Für das Verhalten des Materials wurde ein linear elasto-plastisches Verhalten (vgl. Abbildung 3-18) nach [31] angenommen.

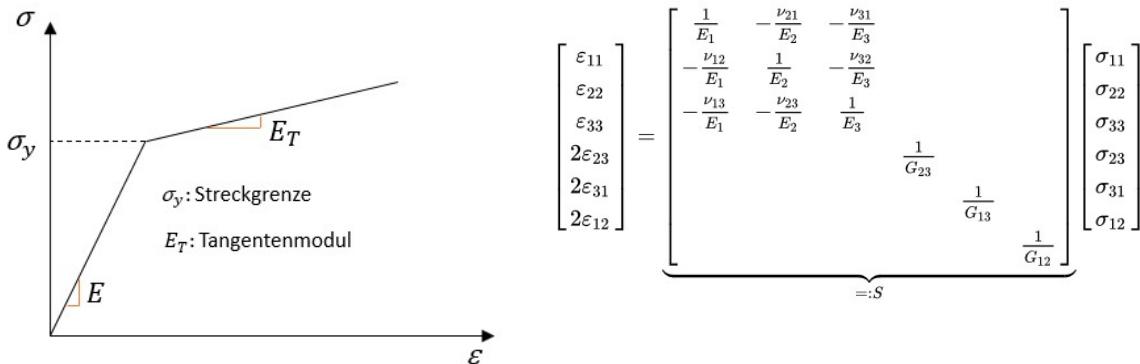


Abbildung 3-18 Ideales elasto-plastisches Materialmodell nach [31]

Abbildung 3-19 Das orthotrope elastische Materialmodell

Das Materialverhalten im FE-Modell wurde nach den optischen Messergebnissen TV1 des Probekörpers H2\_T1-0\_T2-90\_G1:d kalibriert (vgl. und Abbildung 3-3 und Diagramm 3-5):

1. Verformung / Einwirkung im Bauteil quer zur Faser (BQ).
2. Verformung / Einwirkung im Bauteil unter einem Winkel zur Faser, senkrecht zur Keilspreizung (BS) (hier  $\alpha=0^\circ$ ).
3. Verformung / Einwirkung in der Dolle senkrecht zur Keilspreizung (D05).

### 3.6.2.2 Geometrie der Prüfkörper (Modell)

Die Geometrie des Modells wurde nach den geometrischen Eigenschaften der realen Prüfkörper TV1 modelliert (siehe 3.4.2). Der Keil wurde vereinfacht als Festkörper simuliert, sein Eintreiben durch eine Volumenänderung in der Nut.

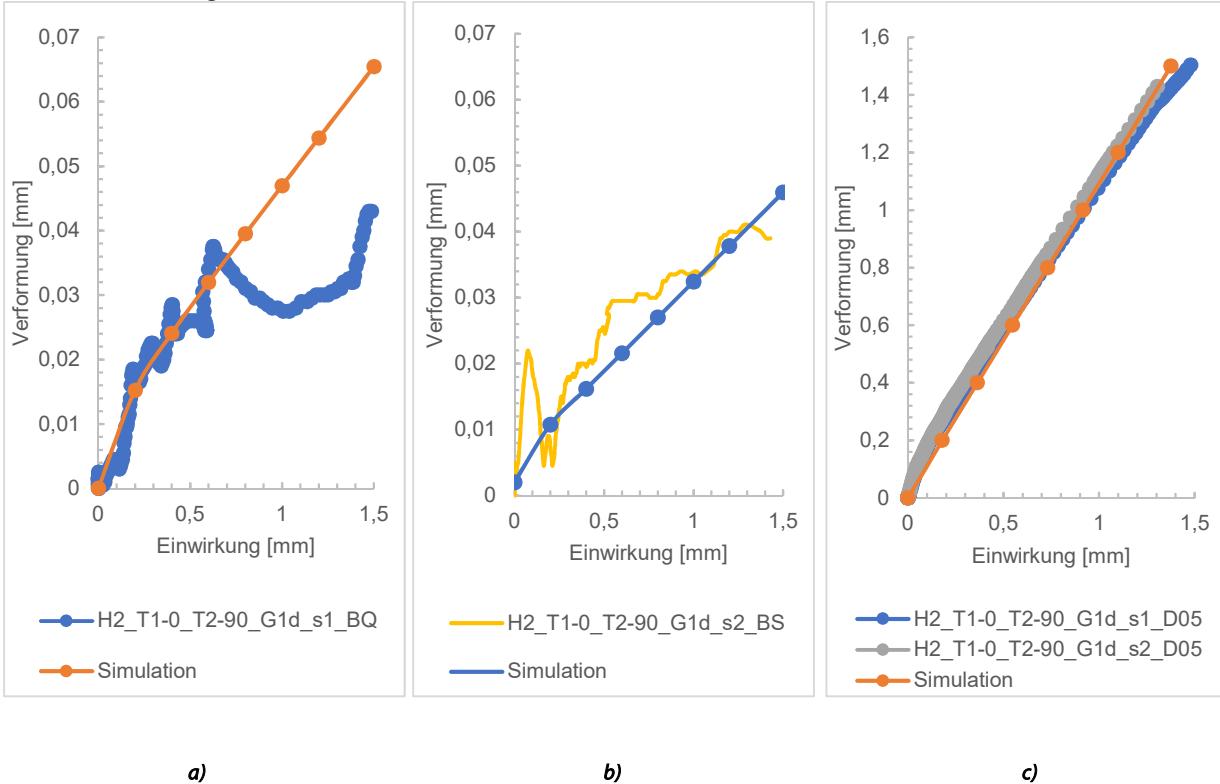


Diagramm 3-5 Optische Messergebnisse für den Probekörper H2\_T1-0\_T2-90\_G1d. a)BQ; b)BS; c)D05

### 3.6.2.3 Methoden

Die FE-Simulationen wurden mit der Software COMSOL durchgeführt.

Die Simulationen wurden mit der Annahme einiger Hypothesen durchgeführt:

1. Hypothese 1: Die „Einwirkung“ ist im Modell eine Nachbildung des Keileinschlags durch Volumenverschiebung/-änderung. Die maximale Volumenänderung entspricht der maximalen Verschiebung des Keils in den durchgeföhrten Tests.
2. Hypothese 2: Die „Einwirkung“ vernachlässigt die Präsenz der Reibung und der Imperfektionen auf der Kontaktfläche Keil/ Dolle.
3. Hypothese 3: Die radialen und tangentialen Materialeigenschaften des Holzes sind gleich.

### 3.6.2.4 Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in der Tabelle 3-10 exemplarisch für die Geometrie H2\_T1-0\_T2-90\_G1 dargestellt:

- Spannungsverlauf (Überschreitung der Querzug-Festigkeit  $f_{t,90}$ ) für Dolle und Bauteil.
- Verformung für Dolle und Bauteil.

Aufgrund von Annahmen in der Berechnungsphase und den ingenieurmäßigen Vereinfachungen, die für das Materialmodell Holz verwendet wurden, weichen die Testergebnisse und die Simulationsergebnisse in einigen Aspekten ab. Dennoch sind die Übereinstimmungen der Ergebnisse zwischen den Tests und den Simulationen sehr hoch.

### 3.6.2.5 Fazit

In dem dargestellten Beispiel gibt es eine Abweichung vom tatsächlichen Rohdichte-Unterschied zwischen dem Bauteil und der Dolle. Im FE-Modell ist der theoretische Rohdichte-Unterschied zwischen Bauteil und Dolle circa  $\Delta\rho = 40 \text{ Kg/m}^3$ . Nach Bestimmung der Rohdichte von dem Bauteil und der Dolle im TV1 ist der Unterschied jedoch circa  $\Delta\rho = 100 \text{ Kg/m}^3$ .

Sobald ein Riss in dem Bauteil entsteht, weichen die Ergebnisse ab, da das idealisierte elastisch-plastische Verhältnis des FE-Modells (Navier-Theorie) nicht den Verlust von Energie nach einem Versagen berücksichtigt.

Auf der einen Seite stellen die Verformungs-/ Einwirkungsdiagramme der optischen Aufnahmen die Einwirkung als Maschinenweg (Eintreiben des Keils durch Stempel, als den Stempel-Weg) dar; auf der anderen Seite wird die Einwirkung im FE-Modell als Volumenvergrößerung in der Nut festgelegt.

Die Daten der Bekannten  $E_{m,0}$ ,  $\rho$  und der Unbekannten  $E_{c,0}$ ;  $E_{c,90}$ , sowie das Materialverhalten auf der Oberfläche und das reale elasto-plastische Verhalten wurden für die zweite Simulationsreihe bestimmt und stehen für das zweite Update des FE-Modells bereit.

In dem zweiten Update des FE-Modells werden die Eigenschaften  $\rho$ ,  $E_{m,0}$ ,  $E_{c,0}$ ,  $E_{c,90}$  für Bauteil und Dolle und für die verschiedenen Holzarten nach DIN EN 408 im Labor bestimmt. Diese bekannten Materialeigenschaften, zusammen mit dem realen elasto-plastischen Verhalten des Holzes auf der Oberfläche des Bauteils, werden für die zweite Simulationsreihe benutzt. Somit wird eine zusätzliche Annäherung an dem realen Tragverhalten generiert.

Tabelle 3-10 Ergebnisse der FE-Simulationen für H2\_T1-0\_T2-90\_G1 – Fallbeispiel TV1

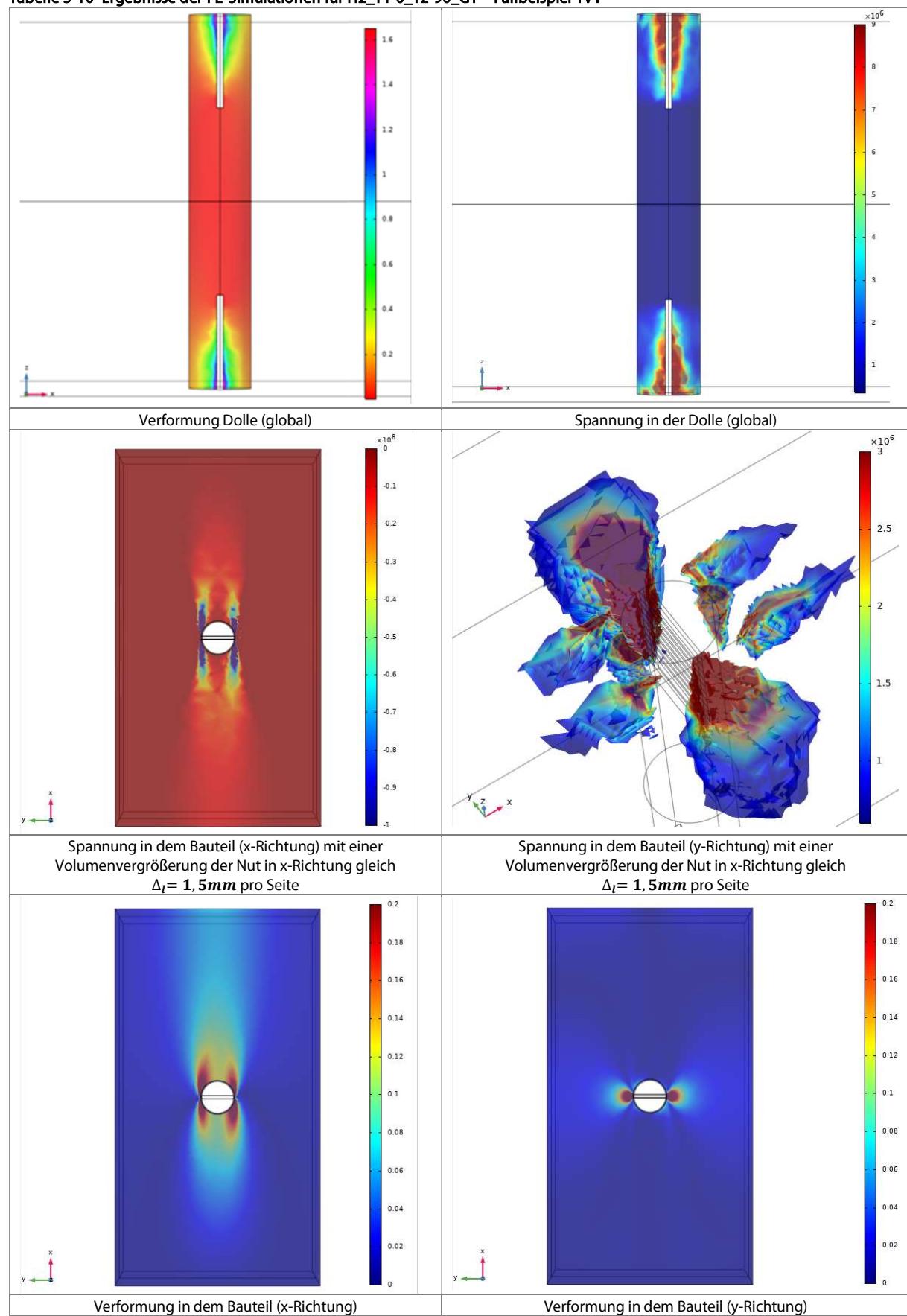


Tabelle 3-11 Ergebnisse zur Bestimmung der Eigenschaften für die Prüfkörper der TV1

			Bauteil			Maße	Holzfeuchte	Rohdichte	E-Modul
Prüfkörper	Eigenschaft	Stück	b [mm]	h [mm]	l [mm]	Um,BAUTEIL [%]	ρm,BAUTEIL [kg/m³]	Ei,BAUTEIL [N/mm²]	
Eiche	E_i	MoE	E_i_a_(MoE)	16	16	320	12,3	0,597	12639
		MoE	E_i_b_(MoE)	11	11	220	14,4	0,666	14892
		MoE	E_i_c_(MoE)	11	11	220	14,4	0,662	12262
		MoE	E_i_d_(MoE)	11	11	220	14,4	0,763	10136
		Rohdichte, Feuchte	E_i_(R)	60	120	20	14,1	0,748	
	<b>MITTELWERTE E_i</b>					<b>13,9</b>	<b>0,687</b>	<b>12482</b>	
Fichte (C24)	F_i	MoE	F_i_a_(MoE)	16	16	320	13,3	0,474	24816
		MoE	F_i_b_(MoE)	16	16	320	13,5	0,515	29495
		MoE	F_i_c_(MoE)	11	11	220			-
		Rohdichte, Feuchte	F_i_(R)	60	120	20	13,5	0,496	
	<b>MITTELWERTE F_i</b>					<b>13,5</b>	<b>0,495</b>	<b>27156</b>	
	F_ii	MoE	F_ii_a_(MoE)	16	16	320	12,8	0,410	19015
		MoE	F_ii_b_(MoE)	16	16	320	13,0	0,376	15871
		MoE	F_ii_c_(MoE)	11	11	220	14,2	0,395	15450
		Rohdichte, Feuchte	F_ii_(R)	60	120	20	13,4	0,414	
		<b>MITTELWERTE F_ii</b>					<b>13,4</b>	<b>0,399</b>	<b>16779</b>
Dolle									
Eiche (D30)	1	Rohdichte, Feuchte	G1:1_(R)	d=20mm	20	10,0	0,546		
		MoE	G1:1_(MoE)	14	14	280	10,2	0,590	12233
		Rohdichte, Feuchte	G2:1_(R)	d=20mm	20	10,4	0,530		
		MoE	G2:1_(MoE)	14	14	280	10,4	0,502	13183
	<b>MITTELWERTE Dolle 1</b>					<b>10,3</b>	<b>0,542</b>	<b>12708</b>	
2	2	Rohdichte, Feuchte	G1:2_(R)	d=20mm	20	10,3	0,603		
		MoE	G1:2_(MoE)	14	14	280	10,4	0,575	9529
		Rohdichte, Feuchte	G2:2_(R)	d=20mm	20	10,5	0,585		
		MoE	G2:2_(MoE)	14	14	280	10,2	0,633	11565
	<b>MITTELWERTE Dolle 2</b>					<b>10,3</b>	<b>0,599</b>	<b>10547</b>	
3	3	Rohdichte, Feuchte	G1:3_(R)	d=20mm	20	11,2	0,517		
		MoE	G1:3_(MoE)	14	14	280	10,4	0,529	20405
		Rohdichte, Feuchte	G2:3_(R)	d=20mm	20	10,3	0,613		
		MoE	G2:3_(MoE)	14	14	280	9,8	0,616	14185
	<b>MITTELWERTE Dolle 3</b>					<b>10,4</b>	<b>0,569</b>	<b>17295</b>	

Tabelle 3-12 Eigenschaften von Laubholz für Bauteil und Dolle für die FEM Berechnung

		Bauteil	Dolle
	Klasse	D35	D27
<b>Festigkeitseigenschaften, in N/mm²</b>			
Biegung	$f_{m,k}$	35	27
Zug in Faserrichtung	$f_{t,0,k}$	21	16
Zug rechtwinklig zur Faserrichtung	$f_{t,90,k}$	0,6	0,6
Druck in Faserrichtung	$f_{c,0,k}$	25	22
Druck rechtwinklig zur Faserrichtung	$f_{c,90,k}$	5,4	5,1
Schub	$f_{y,k}$	4,1	3,8
<b>Steifigkeitseigenschaften, in kN/mm²</b>			
Mittelwert des Elastizitätsmoduls bei Biegung in Faserrichtung	$E_{m,0,mean}$	12	10,5
5%-Quantil des Elastizitätsmoduls bei Biegung in Faserrichtung	$E_{m,0,k}$	10,1	8,8
Mittelwert des Elastizitätsmoduls bei Biegung rechtwinklig zur Faserrichtung	$E_{m,90,mean}$	0,8	0,70
Mittelwert des Schubmoduls	$G_{mean}$	0,75	0,66
<b>Rohdichte, in kg/m³</b>			
5%-Quantil der Rohdichte	$\rho_k$	540	510
Mittelwert der Rohdichte	$\rho_{mean}$	650	610

### 3.6.3 Update der Simulationen

Zweck des zweiten Updates der FE-Simulationen war eine genauere Darstellung des Tragverhaltens der Reparaturverbindung mittels der Holzkeildolle. Mit diesem Zweck wurde die Spannungsverteilung an der

Grenzfläche zwischen der Holzkeildolle und dem Bauteil genauer untersucht. Hier ist durch die erzeugte Tragwirkung, durch Spreizung, dank Verkeilung (der Spreizwirkung) das Tragverhalten der Holzkeildolle auf axialen Zug sichergestellt.

### 3.6.3.1 Materialien

Für die Bauteile und die Dolle wird das orthotrope elastische Materialmodell (vgl. Abbildung 3-18) gewählt. Da in der Praxis aufgrund der Pressung von Keilen eine plastische Verformung der Dolle auftritt, wird zusätzlich ein linear elasto-plastisches Materialmodell (Abbildung 3-19) für die Dolle ausgewählt. Die Faserorientierung der Bauteile wurde durch die Eingabe der Holzeigenschaften entlang der lokalen Bauteilrichtungen definiert. Die im Modell eingesetzten E-Module ( $E_{c,0}$ ;  $E_{c,90}$ ) und die Dichte ( $\rho$ ) von dem Bauteil und der Dolle wurden für die elastischen und plastischen Bereiche experimentell ermittelt. Die Poissonzahlen ( $\mu_{12,23,13}$ ) [30] und das Verhältnis von den Schubmodulen ( $G_{12}$ ;  $G_{23}$ ;  $G_{13}$ ) [31] wurden aus der Literatur entnommen. Das Schubmodul ( $G_{12}$ ), Streckgrenze ( $\sigma_y$ ) und Tangentenmodul ( $E_T$ ) wurden mittels FEM-Updating bestimmt. In der Tabelle 2 sind alle Materialparameter zusammengefasst.

Tabelle 3-13 Materialparameter für den FE-Modell (1=longitudinal, 2=tangential, 3= radial)

	Fichte	Eiche	Esche
Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	350	570	690
$E_{c,0}$ [MPa]	3890	7440	8210
$E_{c,90}$ [MPa]	89	642	511
$G_{12}$ [MPa]	25	40	40
$G_{12}$ ; $G_{23}$ ; $G_{13}$	1:1;3:0,4	1:1;0,1	1:1;0,1
$\mu_{12,13}$	0,5	0,5	0,5
$\mu_{23}$	0,05	0,05	0,05
$\sigma_y$ [MPa]	1,78	12,8	10,2
$E_T$ [MPa]	8,9	64,2	51,1

### 3.6.3.2 Geometrie der Prüfkörper

Mit der Software COMSOL wurde ein 3D-Modell für die Reparaturverbindung erstellt (Abbildung 3-20). Zwei Bauteilhälften sind durch eine HKD verbunden. Die beiden Seiten des Bauteils sind eingespannt. Zwischen der Dolle und dem Bauteil wurde ein Kontaktfläche mit Vollkontakt simuliert. Hier können alle Spannungen der Dolle an dem Bauteil übertragen werden, während eine Verschiebung zwischen der Dolle und dem Bauteil nicht möglich ist. Das vorgeschlagene Simulationsmodell ist deswegen nur für den gegebenen Lastfall „seitliche Pressung der Keile“ geeignet. Aufgrund der fehlenden Kenntnisse wurden die Keile nicht geometrisch, sondern als Einwirkung des Keils auf die Nutwände simuliert.

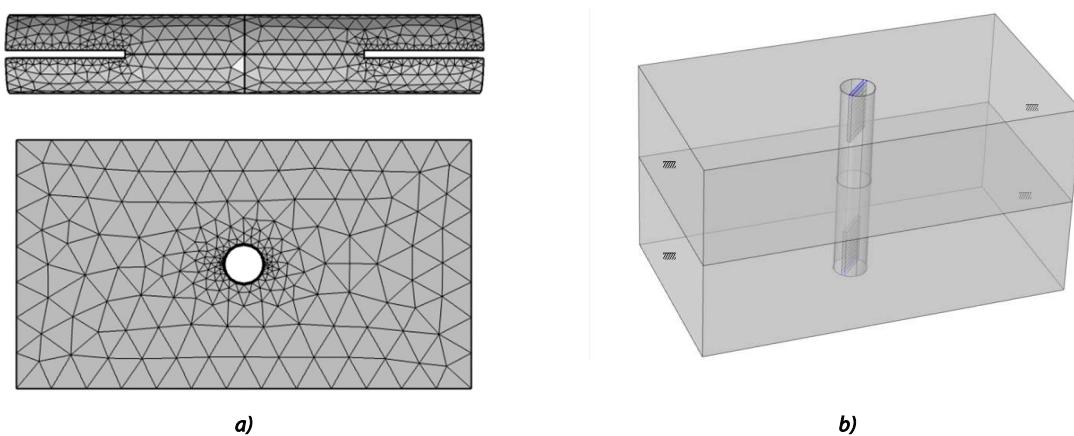
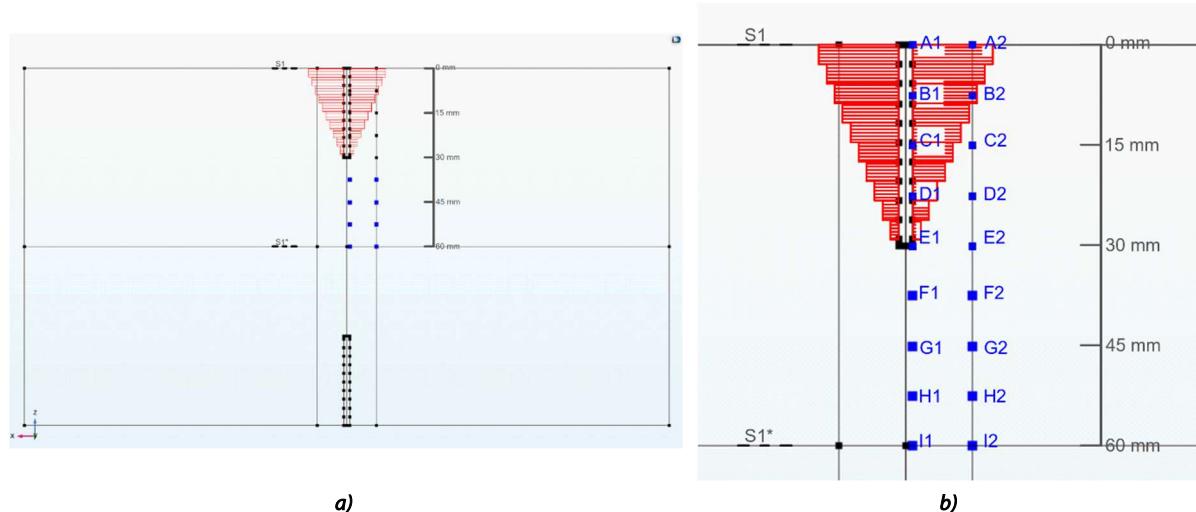


Abbildung 3-20 a) Ausgewählte Mesh für die Dolle und das Bauteil; b) Geometrisches 3D-Modell



### 3.6.3.3 Methoden

Die FE-Simulationen wurden mit der Software COMSOL durchgeführt.

Die Simulationen wurden mit der Annahme folgenden Hypothesen durchgeführt:

1. Das Eintreiben des Keils in der Nut verursacht eine dreieckige Verformung der Nutwände
2. Die Einwirkung des Keils auf die Nutwände ist im FE-Modell als dreieckige Flächenlast (vgl. Tabelle 3-22) simuliert.
3. Die dreieckige Flächenlast ist als Stufenlast (10 Stufen) entlang der Nutlänge angebracht. Die Stufen sind eine Annäherung an die dreieckige Last, repräsentiert durch das Integral der Normalspannung auf der Oberflächenlänge.
4. Die Flächenlasten jedes Modells sind nach dem realen Verformungsverhalten der jeweiligen Probekörper kalibriert. Die Lasteinwirkung stellt das reale Verformungsverhalten dar.

Die FE-Simulationen wurden für die drei Holzkombinationen H1, H2 und H3 hergestellt. Für die Kalibrierung der Flächenlast wurden die experimentell bemessenen Werte der Spreizung, wie in der Tabelle 3-14 dargestellt, angewandt. In der Tabelle 3-15 sind beispielweise die Lasten vom FE-Modell für H1\_T2-0 aufgezeigt.

Tabelle 3-14 Experimentell bemessene Werte der Spreizung für  $b_N = 2\text{mm}$

Geometrie	Nutbreite $b_N$	Breite Keil im Nut nach Eintreiben $b'_{K,mean}$	Gesamte Spreizung $b_{Spreizung,gesamt,mean}$	Spreizung pro Seite $b_{Spreizung,mean}$	Spreizung pro Seite, Einwirkung Modell $w_{Spreizung,mean}$
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
H1_T2-0	2,0	4,5	2,5	1,3	0,9
H1_T2-45	2,0	3,5	1,5	0,75	0,8
H1_T2-90	2,0	3,6	1,6	0,81	
H2_T2-0	2,0	2,5	0,5	0,2	0,2
H2_T2-45	2,0	2,4	0,4	0,2	
H2_T2-90	2,0	2,5	0,5	0,2	

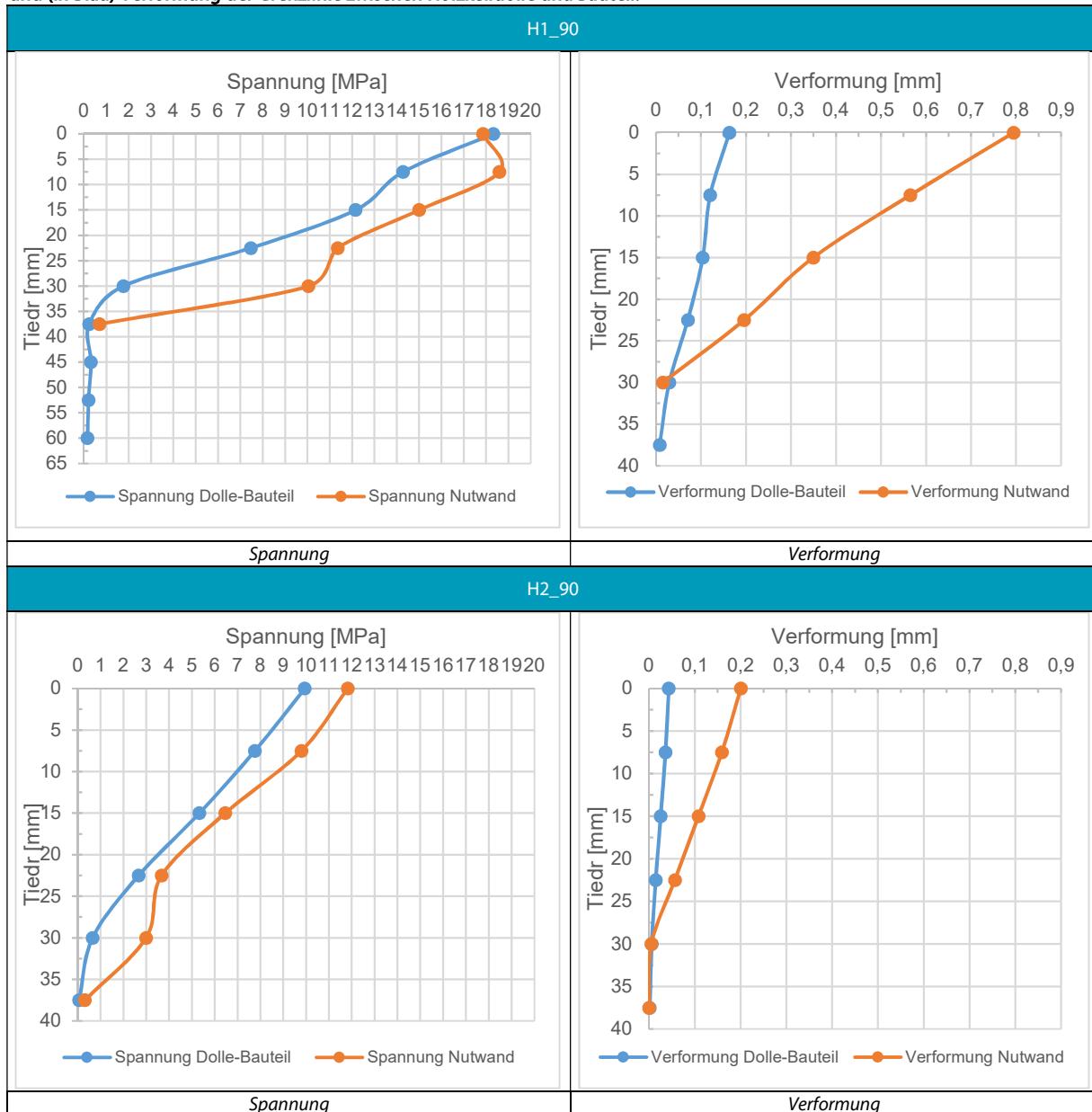
Tabelle 3-15 Lasteingabe bei Modell H1\_0

Stufe (je 3 mm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Last [N]	874	1846	1372	1134	880	732	646	488	221	176

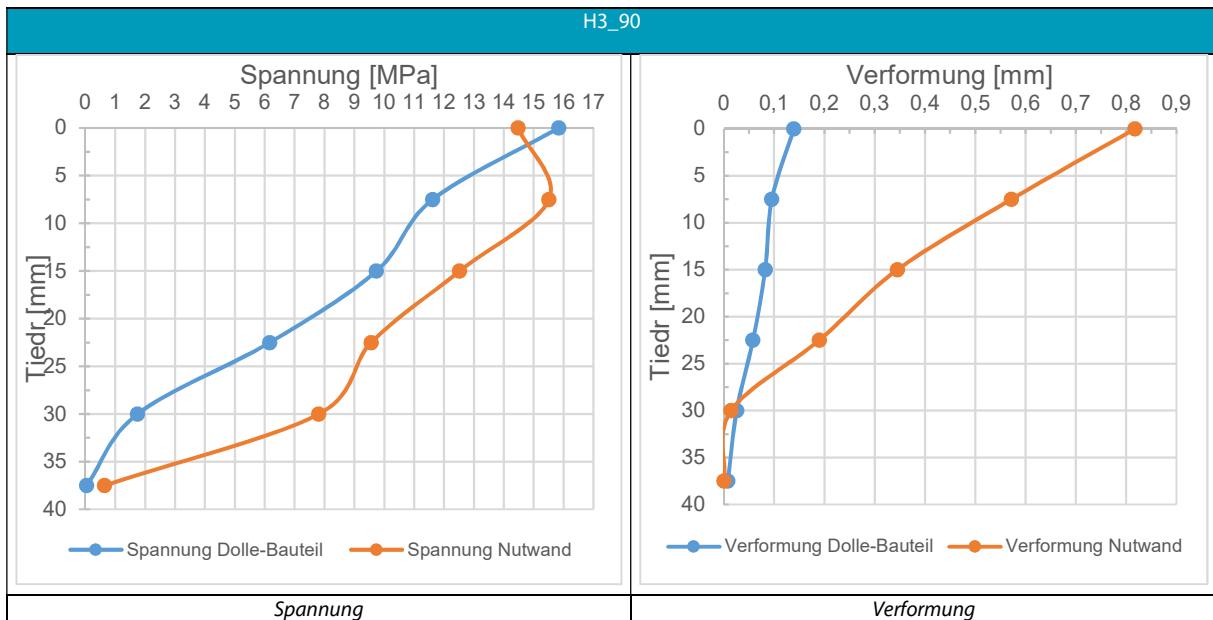
### 3.6.3.4 Ergebnisse

Mithilfe der Modellierung wurde es möglich, die Spreizwirkung der Holzkeildolle auf dem Bauteil zu quantifizieren. Die Quantifizierung des Einflusses der Verkeilung auf die Nutwände wurde in Form von Spannungswerten gegeben. Ebenso wurde die Quantifizierung der zu übertragenden Spreizung auf den Bauteil in Form von Spannungswerten gegeben. Die Ergebnisse der Simulationen sind für die drei Holzkombinationen in der Tabelle 3-16 visualisiert.

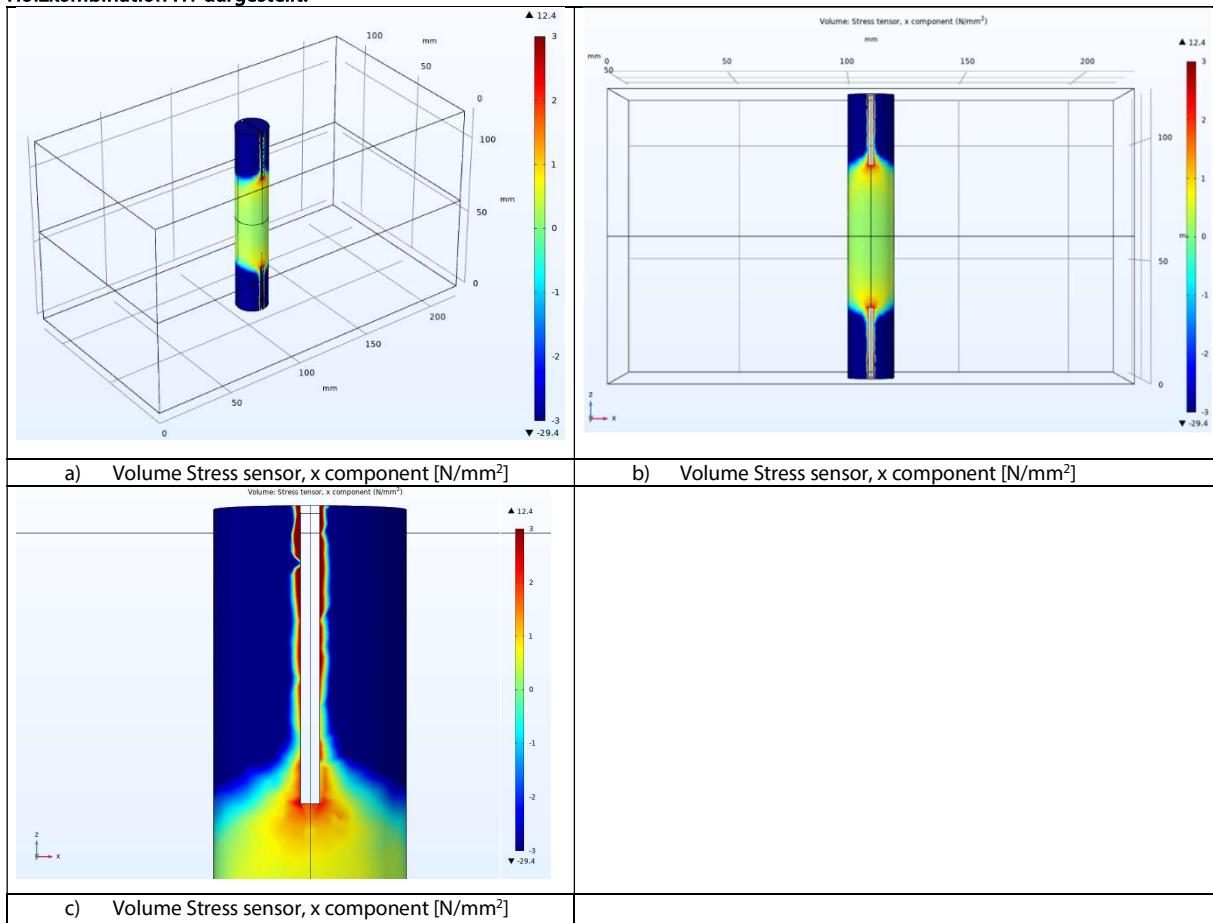
Tabelle 3-16 Pro Holzkombination: Auf der linken Seite: Spannungsverteilung (in Orange) auf die Nutwand; (in Blau) entlang der Grenzlinie zwischen Holzkeildolle und Bauteil. Auf der rechten Seite: (in Orange) Verformung der Nutwand nach Keileinführung und (in Blau) Verformung der Grenzlinie zwischen Holzkeildolle und Bauteil.



## Fortsetzung Tabelle 3-16



**Tabelle 3-17 Ergebnisse der Stressanalyse der Reparaturverbindung.** In Blau die druckbelasteten Flächenanteile der Holzkeildolle infolge Spreizung der Nut im Bohrloch. In diesem Beispiel ist der Mittelwert der Tiefe der Einwirkung von ca.  $t_w = 37,5 \text{ mm}$  in der Holzkomposition H1 dargestellt.



### 3.6.3.5 Fazit

Dank der FEM-Simulationen wurde ermöglicht, eine genauere Tiefe der Einwirkung aus der Spreizung im Bauteil für die drei Holzkombinationen zu quantifizieren. In Mittelwert ist die Tiefe der Einwirkung als  $t_w = 37,5 \text{ mm}$  festgelegt. Dieser Wert wurde als Konstante in der rechnerischen Nachweismethode (vgl. Abschnitt 5.1) definiert.

## 3.7 Tastversuche TV3: Zugtragfähigkeit nicht gekeilte Holzdolle

### 3.7.1 Ziele

- Analyse der Zugtragfähigkeit nicht gekeilter Holzdolle für H1, H2, H3
- Erzeugung von charakteristischen Werten der axialen Zugtragfähigkeit für die Holzdolle ohne Verkeilung (HD) als Vergleichswerte für die axialen Zugtragfähigkeit für die Holzkeildolle (HKD)
- Bestimmung der Anteile der Reibung an der Tragfähigkeit nach Holzart
- Im Laufe des Projektes werden diese Prüfergebnisse mit den Ergebnissen der Tragfähigkeit der Holzkeildolle verglichen, um die reine Tragfähigkeit der Spreizwirkung zu definieren.

### 3.7.2 Materialien

Die Probekörper wurden vor der Prüfung in der Klimakammer auf  $T = 20^\circ$  und  $LF = 65\%$  klimatisiert, nach EN 408 [34]. Die Bestimmung der lokalen Rohdichte der Prüfkörper wurde sowohl für die Bauteile als auch für die Dolle aus den Maßen und dem Volumen des Prüfstücks ermittelt (vgl. Tabelle 3-18 und Tabelle 3-19). In der Tabelle 3-20 sind der Rohdichteunterschied zwischen Bauteil und zugehöriger Rolle aufgeführt. Die Werte der Rohdichten wurden nach EN 14358:2006 [35] berechnet.

Tabelle 3-18 Geometrische Angaben und Rohdichte der Prüfkörper (Bauteil)

Durchmesser	Holzkombination	Prüfkörper/ Bauteil	Holz- stück	$l_B$	$b_B$	$h_B$	$m_B$	$l_{B,LOCH}$	$d_{B,LOCH}$	$V_{B,LOCH}$	$\rho_{20,65}$
				[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[mm]	[mm]	[mm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]
20	H1	TV3_20_H1_1	F8	220,25	119,70	59,99	583,60	59,99	19,94	1562838,36	0,373
		TV3_20_H1_2	F8	220,16	119,74	59,72	591,70	59,72	20,12	1555348,75	0,380
		TV3_20_H1_3	F8	220,18	119,71	59,64	643,60	59,64	19,55	1554073,28	0,414
		TV3_20_H1_4	F8	220,34	119,92	59,70	594,10	59,70	19,63	1559395,64	0,381
		TV3_20_H1_5	F8	220,11	119,83	59,74	580,80	59,74	19,35	1558121,39	0,373
	H2	TV3_20_H2_1	E3	220,44	120,20	59,66	1112,90	59,66	19,15	1563620,88	0,712
		TV3_20_H2_2	E3	220,08	120,11	59,40	1122,20	59,40	19,40	1552610,05	0,723
		TV3_20_H2_3	E3	220,33	119,97	59,93	1117,10	59,93	19,84	1565601,57	0,714
		TV3_20_H2_4	E3	220,16	120,42	59,65	1124,80	59,65	19,29	1563988,24	0,719
		TV3_20_H2_5	E3	220,07	120,20	59,58	1122,50	59,58	19,52	1558204,88	0,720
	H3	TV3_20_H3_1	F5	220,88	119,68	60,00	609,10	60,00	19,78	1567657,96	0,389
		TV3_20_H3_2	F5	220,84	119,85	59,71	611,30	59,71	19,61	1562350,81	0,391
		TV3_20_H3_3	F5	220,76	119,76	59,82	610,70	59,82	19,64	1563411,63	0,391
		TV3_20_H3_4	F5	220,55	119,92	59,62	603,10	59,62	19,70	1558678,50	0,387
		TV3_20_H3_5	F5	220,66	119,98	59,54	627,40	59,54	19,80	1557975,99	0,403

Tabelle 3-19 Geometrische Angaben und Rohdichte der Prüfkörper (Dolle)

Durchmesser	Holzkombination	Prüfkörper	Dolle	Holzart	$d_D$	$l_D$	$m_D$	$V_{TOT}$	$\rho_{20,65}$
					[mm]	[mm]	[g]	[mm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]
20	H1	TV3_20_H1_1	a	Eiche (E)	20,00	500,00	102	157079,63	0,649
		TV3_20_H1_2	b		20,00	500,00	104,4	157079,63	0,665
		TV3_20_H1_3	c		20,00	500,00	82,5	157079,63	0,525
		TV3_20_H1_4	d		20,00	500,00	83,6	157079,63	0,532
		TV3_20_H1_5	e		20,00	500,00	102,4	157079,63	0,652
	H2	TV3_20_H2_1	f		20,00	500,00	105,2	157079,63	0,670
		TV3_20_H2_2	g		20,00	500,00	106,7	157079,63	0,679
		TV3_20_H2_3	h		20,00	500,00	95,9	157079,63	0,611
		TV3_20_H2_4	i		20,00	500,00	107,2	157079,63	0,682
		TV3_20_H2_5	elle		20,00	500,00	108,8	157079,63	0,693
	H3	TV3_20_H3_1	sa	Esche (ES)	20,00	500,00	92,9	157079,63	0,591
		TV3_20_H3_2	sb		20,00	500,00	102	157079,63	0,649
		TV3_20_H3_3	sc		20,00	500,00	101,2	157079,63	0,644
		TV3_20_H3_4	sd		20,00	500,00	102,1	157079,63	0,650
		TV3_20_H3_5	se		20,00	500,00	91,7	157079,63	0,584

Tabelle 3-20 Rohdichteunterschied zwischen Bauteil und assignierter Dolle und charakteristische Mittelwerte.

Holzkombination	Prüfkörper	Bauteil (B) $\rho_B$	Mittelwert B $\rho_{B,mean}$	5% Quantil B $\rho_{B,k}$	Dolle (D) $\rho_D$	Mittelwert D $\rho_{D,mean}$	5% Quantil D $\rho_{D,k}$	$\Delta\rho_{B-D}$
		[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]
H1	TV3_20_H1_1	373	384	342	649	605	431	276
	TV3_20_H1_2	380			665			285
	TV3_20_H1_3	414			525			111
	TV3_20_H1_4	381			532			151
	TV3_20_H1_5	373			652			279
H2	TV3_20_H2_1	712	718	706	670	667	587	42
	TV3_20_H2_2	723			679			44
	TV3_20_H2_3	714			611			103
	TV3_20_H2_4	719			682			37
	TV3_20_H2_5	720			693			27
H3	TV3_20_H3_1	389	392	377	591	624	541	202
	TV3_20_H3_2	391			649			258
	TV3_20_H3_3	391			644			253
	TV3_20_H3_4	387			650			263
	TV3_20_H3_5	403			584			181

### 3.7.3 Geometrie der Prüfkörper

Die Fertigungsmaße und der Aufbau der Prüfkörper sind in der Tabelle 3-21 und in der Abbildung 3-22 zu finden. Die speziellen Maße der einzelnen Prüfkörper und seiner Komponenten sind in der Tabelle 3-18 und Tabelle 3-19 zu finden. Hier sind die Abweichungen zu den vorgegebenen Maßen abzulesen. Bei handgefertigten Verbindungsmitteln sind die Abweichungen oder Imperfektionen nicht zu vermeiden und müssen in den Testergebnissen berücksichtigt werden.

Tabelle 3-21 Geometrische festgelegte Parameter und Holzarten für die TV3

	Holzart	Maße
Bauteil	Fichte C24, Eiche D30	$(b_B \times h_B \times l_B) = 120 \times 60 \times 230 \text{ mm}^3$
Dolle	Eiche D30 Esche D30	$d_D = 20 \text{ mm (rund)}$ $l_D = 500 \text{ mm}$

### 3.7.4 Methoden

In der Versuchsserie TV3 wird die Verbindung mittels nicht gekeilten Holzdolle in axialen Zugbeanspruchung getestet.

Die Zugprüfung ist mit einer universalen mechanischen Prüfmaschine mit einer weggesteuerten Prüfung (Geschwindigkeit  $v = 0,05 \text{ mm/s}$ ) durchgeführt. Abbruchkriterien sind (a) Verschiebung der Holzkeildolle im Bohrloch bis  $\varepsilon = 15 \text{ mm}$  oder (b) das Erreichen einer Last (nach Versagen) von  $F_{exp} \leq 0,5 \text{ kN}$ .

Für die Messung der Verschiebung der Holzdolle in dem Bohrloch des Bauteils wurde ein induktiver Wegaufnehmer zwischen der unteren Bauteiloberfläche auf S1 und der Dolle installiert (vgl. Abbildung 3-22).

Methode des Einbaus und der Prüfung:

- (Schritt 0): Vor dem Test erfolgt das Einbringen der Dolle in das Bohrloch des Bauteils.
- (Schritt 1): Der Prüfkörper ist in der Prüfmaschine positioniert. Die Dolle ist zwischen den Stahlbacken für die Applikation der Zugkraft eingespannt. Das Ausziehen der Holzdolle (vgl. Abbildung 3-22) wird bis zum definierten Abbruchkriterium (a) oder (b) vorgenommen.

Tabelle 3-22 Prüfergebnisse der Zugversuche TV3

$d_D$ [mm]	Holz- kombination	Prüfkörper	Dolle Nummer	$F_{max,exp}$ [kN]	$F_{max,exp,mittelwert}$ [kN]	5% Quantil HD $R_{t,k,0,05,HD}$ [kN]
20	H1	TV3_20_H1_1	a	0,87	1,04	0,65
		TV3_20_H1_2	b	1,07		
		TV3_20_H1_3	c	1,37		
		TV3_20_H1_4	d	1,02		
		TV3_20_H1_5	e	0,89		
	H2	TV3_20_H2_1	f	7,91	9,15	7,01
		TV3_20_H2_2	g	9,56		
		TV3_20_H2_3	h	9,77		
		TV3_20_H2_4	i	8,39		
		TV3_20_H2_5	elle	10,10		
	H3	TV3_20_H3_1	sa	0,38	0,56	0,25
		TV3_20_H3_2	sb	0,43		
		TV3_20_H3_3	sc	0,83		
		TV3_20_H3_4	sd	0,58		
		TV3_20_H3_5	se	0,56		

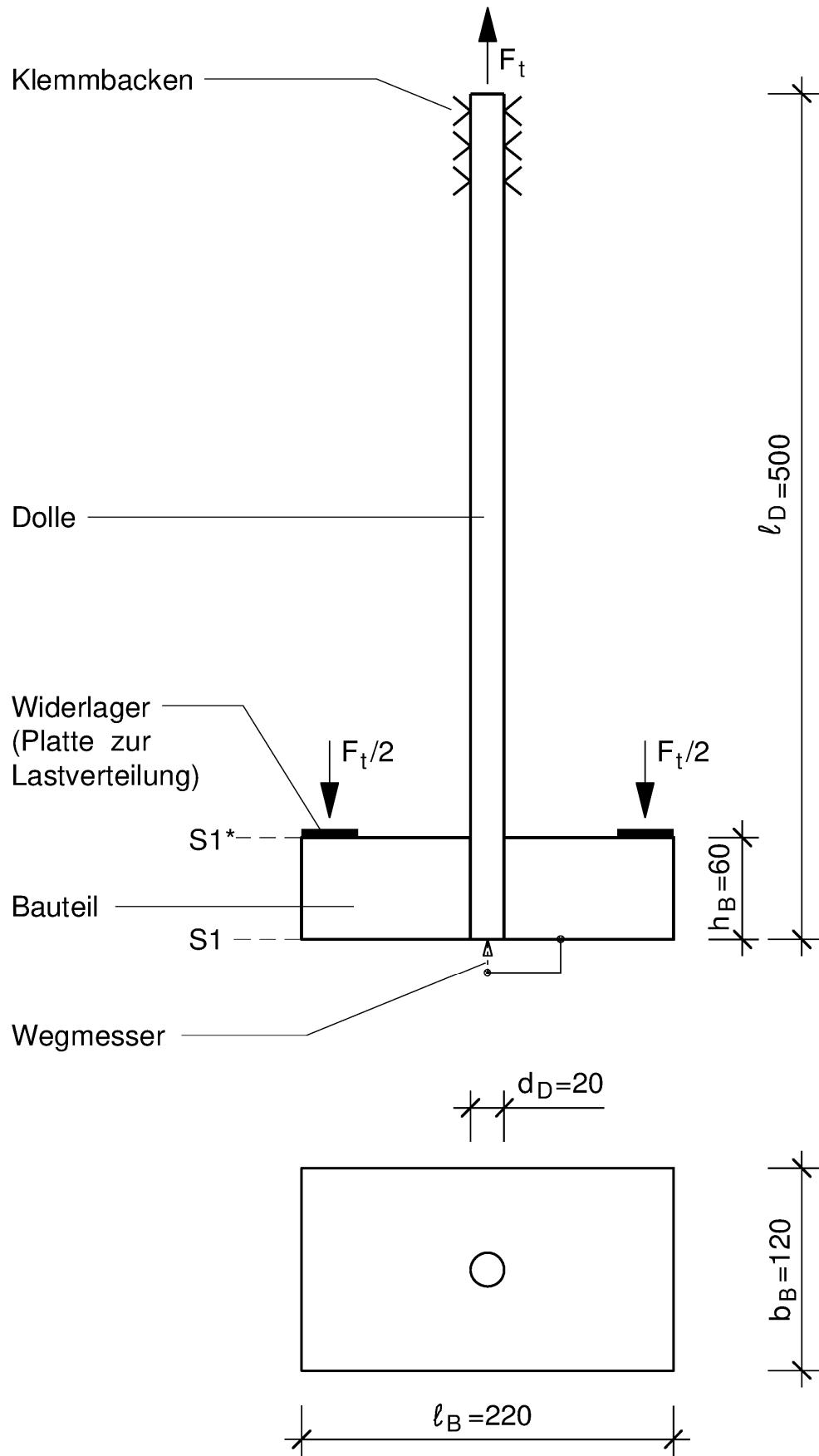


Abbildung 3-22 Prüfkörpergeometrie und Prüfungsaufbau für die Zugprüfung TV3

### 3.7.5 Prüfergebnisse

#### Diagramme

Es folgen drei Beispiele für Last-Verformungsdiagramme der Versuchsreihe TV3. Aus dem Diagramm 3-6 ist zu entnehmen, wie die Reibung zwischen der Kontaktfläche Dolle zu Bohrloch einen großen Einfluss auf dem Tragverhalten hat.

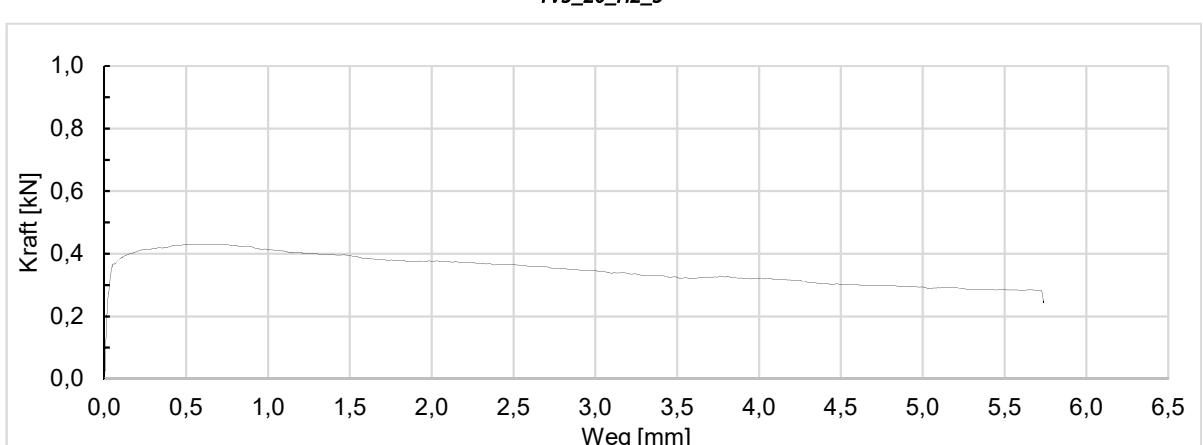
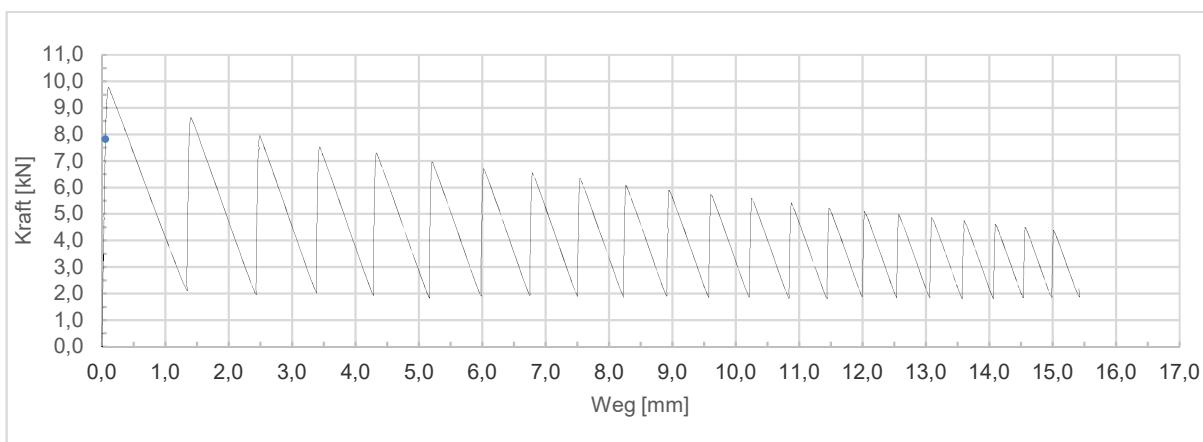
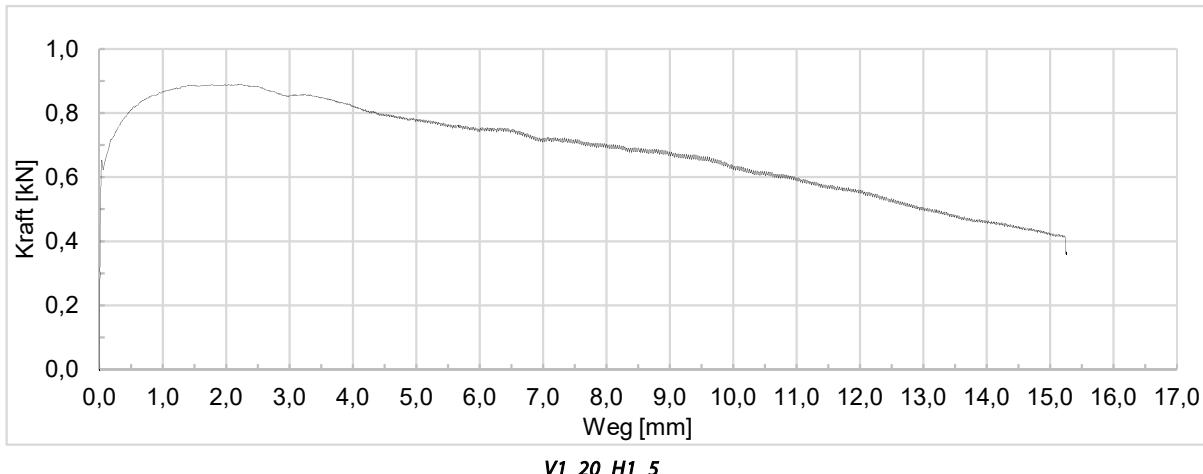


Diagramm 3-6 Last-Verformungsdiagramme von TV3

Die experimentellen Ergebnisse der Bruchlast für jeden Prüfkörper ( $F_{max,exp}$ ), die Mittelwerte, sowie die nach EN 14358:2006 [35] berechneten charakteristischen Werte (5% Quantil der experimentellen Tragfähigkeit) sind in der Tabelle 3-22 zu finden. Im Diagramm 3-7 sind die einzelnen experimentellen Bruchlasten und die charakteristischen Werte der Tragfähigkeit für jede Holzkombination dargestellt.

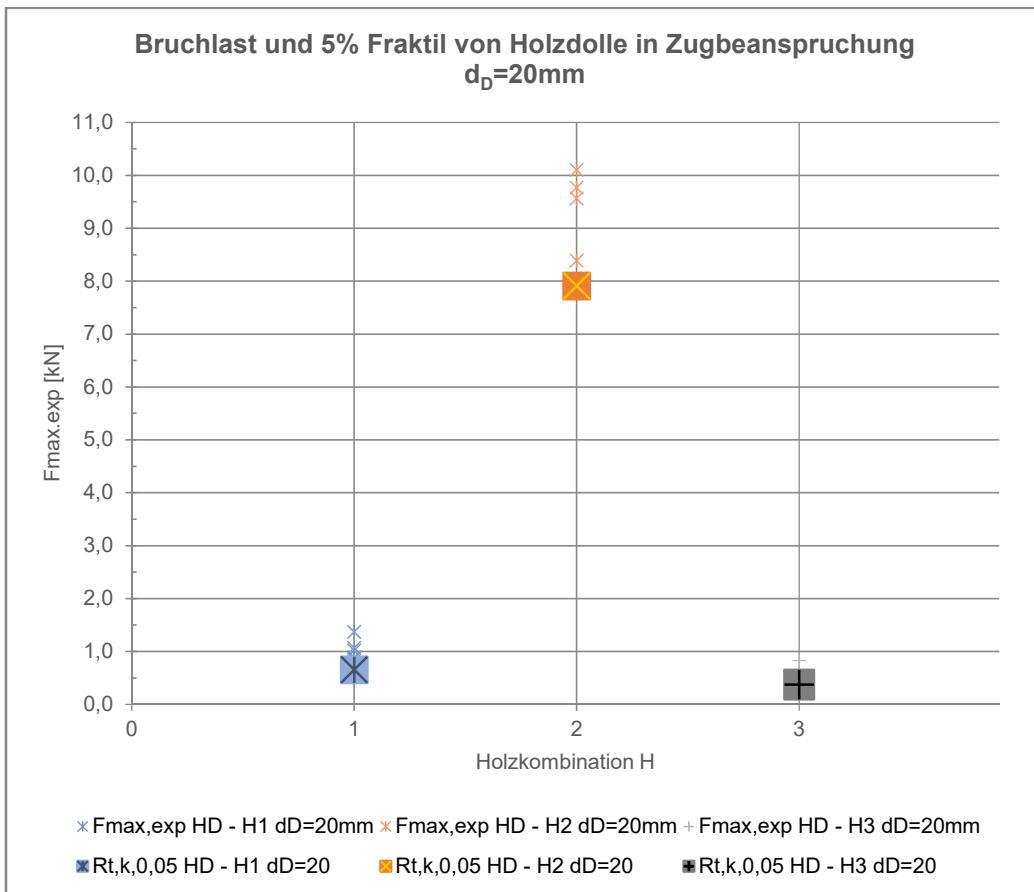


Diagramm 3-7 Prüfergebnisse (Bruchlasten) und charakteristische Werte der Tragfähigkeit auf axialem Zug für H1, H2 und H3 (TV3)

### 3.7.6 Schlussfolgerung

Die Ergebnisse der TV3 zeigen, dass die Zugtragfähigkeit der Dollenverbindungen sehr stark von der Holzkombination bzw. der mikroskopischen Kontaktobерfläche abhängig ist. Für die Holzkombination H1 und H3 ist die Zugtragfähigkeit nahezu Null. Für die Holzkombination H2 sind die Ergebnisse der Zugtragfähigkeit mit einem charakteristischen Wert der Tragfähigkeit  $R_{t,k,0,05,HD} = 7,01\text{ kN}$  erstaunlich hoch. Erklärung: die Dollen (H2) aus Eiche waren im Bohrloch sehr passgenau ( $d_{B,LOCH,mean} = 19,44\text{mm} \ll d_D$ ), dagegen waren die Dollen der Holzkombinationen H1 und H3 im Bohrloch normal passgenau ( $d_{B,LOCH,mean} = 19,75 < d_D$ ) (vgl. Tabelle 3-18). Die höhere Passgenauigkeit der Holzkombination H2, eine zusätzliche mikroskopisch höhere Kontaktfläche und die geringere Nachgiebigkeit eines Eichenbauteils verursachten eine größere Grundspannung zwischen Dolle und Bauteil und daher höhere Werte der Tragfähigkeit.

Die beobachteten Ergebnisse sind stark abhängig von der Genauigkeit der Fertigung des Bohrloches und deswegen nur bedingt kontrollierbar. Die erwarteten Vergleichswerte sind daher nur bedingt verwendbar.

### 3.8 Zusammenfassung

Aus den Tastversuchen wurden neue Erkenntnisse über die Fertigungstechnik, der Einbaugeometrie und der Materialien (Materialkombinationen) gewonnen. Sie liefern die Grundlagen für das Verständnis des Tragverhaltens der Holzkeildolle. Diese Erkenntnisse wurden durch die Prüfung des Tragverhaltens nicht gekeilter Holzdollen unter axialer Zugbeanspruchung erweitert.

Nach dem Beobachten des unterschiedlichen Verhaltens der Holzkombinationen und Einbauwinkel des Keils zur Faser des Bauteils wurde eine „neue“ Einbaugeometrie mit festgelegten Parametern T1, T2 und G für jede Holzkombination H festgelegt.

Diese „neue“ festgelegte Geometrie weicht von denen in den gebauten Beispielen vorgefundenen Geometrien – oftmals dem Zufall überlassen – ab und zielt erstmals auf die Minimierung der Rissbildung, die Vereinfachung der Fertigung und des Einbaus mit Verbesserung des Tragverhaltens der Reparaturverbindung.

Die festgelegten Parameter nach Abschluss der Tastversuchsreihen TV sind in der folgenden Tabelle 3-23 zusammengefasst. Die vollständige, vertiefte Beschreibung der festgelegten Parameter ist im Abschnitt 4.1 zu finden.

**Tabelle 3-23 Festgelegte Parameter für die Reparatur mit Holzkeildollen für jede vorgeschlagene Holzkombination.**

H	T1-	T2-	G
Holzkombination	Winkel $\theta$ zwischen Nutlängsachse und Jahrring-Ausrichtung der Dolle	Winkel $\varphi$ zwischen Nutlängsachse auf der Seite 1 [N,1] und Faserrichtung des Bauteils	Winkel $\beta$ zwischen Nutlängsachse auf der Seite 1 [N,1] und auf der Seite 2 [N,2]
H1 = Dolle: Eiche / Bauteil: Fichte H2 = Dolle: Eiche / Bauteil: Eiche H3 = Dolle Esche/ Bauteil: Fichte	T1-0 $\rightarrow \theta = 0^\circ$	T2-90 $\rightarrow \varphi = 90^\circ$	G1 $\rightarrow$ Anordnung der Nut auf der Seite 2 der Dolle parallel ( $\beta = 0^\circ$ ) zur Anordnung auf der Seite 1

Diese festgelegte Einbaugeometrie dient als Basis für die experimentelle Charakterisierung der Holzkeildolle bei Zugbeanspruchung (vgl. Absatz 4.1) und die Einschätzung der Tragfähigkeit der Holzkeildolle unter axialen Zugbelastung durch ein Nachweiskonzept (vgl. Absatz 5).

## 4 Experimentelle Charakterisierung der HKD

In diesem Abschnitt sind die Ergebnisse der experimentellen Versuche der HKD auf Zug- und Abscherbeanspruchung präsentiert. Ziel ist das Festlegen der charakteristischen Werte der Tragfähigkeit für diese zwei Belastungsfälle mit den identifizierten geometrischen Randbedingungen.

### 4.1 Festgelegte endgültige Parameter und geometrische Randbedingungen

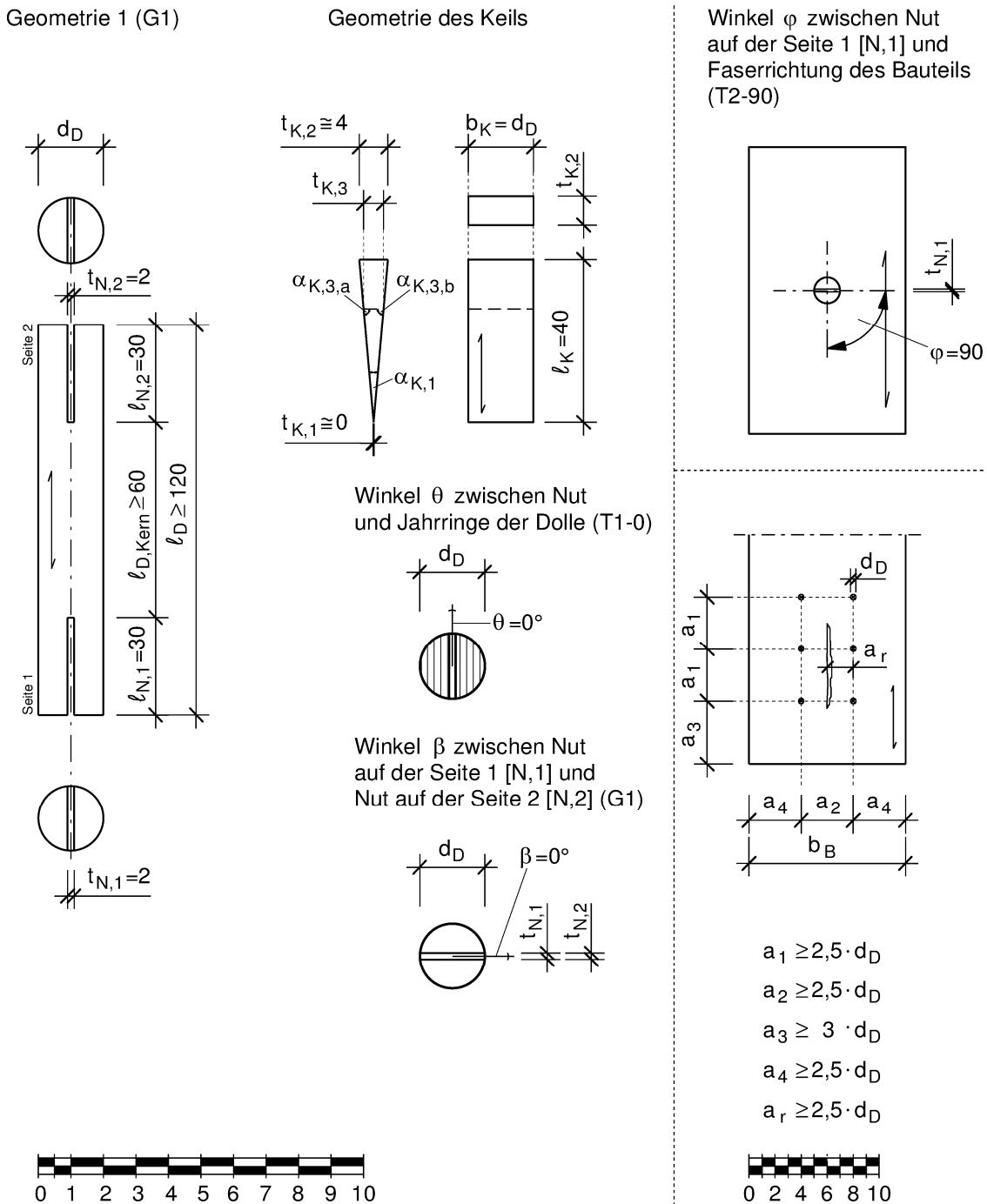


Abbildung 4-1 Darstellung der endgültigen geometrischen Parameter in der Reparaturverbindung durch die Holzkeildolle

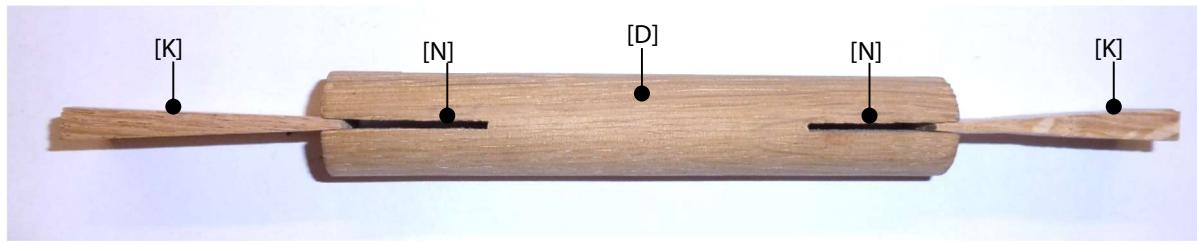


Abbildung 4-2 Abkürzungen der Komponenten einer Holzkeildolle

Basierend auf den Erkenntnissen aus den durchgeführten Tests wurden die folgenden Parameter für die Herstellung und Verwendung der Holzkeildolle allgemein festgelegt. Die schriftliche Beschreibung der Parameter folgt und die Darstellung ist in der Abbildung 4-1 und in der Abbildung 4-2 zu finden.

#### Dolle [D]

- Holzarten Dolle:
  - Primär: Eiche (technisch getrocknet; min. Festigkeit D30 nach [23])
  - Sekundär: Esche (technisch getrocknet; min. Festigkeit D40 nach [23])
- Richtung der Fasern der Dolle: Längsrichtung (Holzdollen langfaserig gewachsen, natürlich entsprechend dem Faserverlauf, industriell gespalten)
- Länge der Dolle [ $l_D$ ]: Variabel, gleich Bauteil-Querschnittshöhe [ $l_D = h_B$ ]
- Durchmesser der Dolle [ $d_D$ ]:  $d_D = 20 \text{ mm}$ ;  $30 \text{ mm}$

#### Nut [N]

- Mittig in der Dolle, entsprechend des Durchmessers ausgewählt
- Länge der Nut 1 [ $l_{N,1}$ ] und Nut 2 [ $l_{N,2}$ ]:  $l_{N,1} = l_{N,2} = 30 \text{ mm}$
- Dicke der Nut [ $t_N$ ]:  $t_N = 2 \text{ mm}$
- Länge des Kerns [ $l_{D,kern}$ ]:  $l_{D,kern} = l_D - l_{N,1} - l_{N,2}$
- Abstand des Nutbodens zur Scherfuge: in einschnittigen Verbindungen:  $\geq 30 \text{ mm}$ ; in zweischnittigen Verbindungen  $\geq 20 \text{ mm}$
- Winkel  $\theta$  zwischen Nutlängsachse und Jahrring-Ausrichtung in dem Dollenquerschnitt:  $\theta = T1 = 0$
- Winkel  $\varphi$  zwischen Nutlängsachse und Faserrichtung des Bauteils:  $\varphi = T2 = 90$
- Winkel  $\beta$  zwischen Nutlängsachse auf Seite 1 [N,1] und Nut auf Seite 2 [N,2]:  $\beta = 0$ , Konfiguration G1

#### Keil [K]

- Holzart Keile: Eiche (technisch getrocknet, min. Festigkeit D30 nach [23]). Keil langfaserig gewachsen, natürlich entsprechend dem Faserverlauf, handisch gespalten, mit Winkel  $\alpha_{K,1}$  symmetrisch zur Faserverlauf
- Länge des Keils in Längsrichtung [ $l_K$ ]:  $l_K = l_N + 10 \text{ mm} = 40 \text{ mm}$
- Breite des Keils [ $b_K$ ]: Durchmesser der Dolle [ $d_D$ ]:  $b_K = d_D$
- Dicke des Keils (Spitze) [ $t_{K,1}$ ]:  $t_{K,1} \cong 0 \text{ mm}$
- Winkel des Keils [ $\alpha_{K,3,a}$ ;  $\alpha_{K,3,b}$ ;  $\alpha_{K,1}$ ] mit  $\alpha_{K,1} = 8 - 10^\circ$

#### Bauteil (Ersatzbauteil) [B]

- Holzart des typischen Ersatzbauteils angepasst an die Holzart des Bauteils im Bestand:
  - Eiche 5 Jahre luftgetrocknet (min. Festigkeit D30 nach [23]), für Gebrauchsklasse GK 0 bis GK 3.2 nach [36; 38; 39] geeignet
  - Fichte technisch getrocknet (min. Festigkeit C24 nach [23]), für Gebrauchsklasse GK 0 bis GK 1 nach [36; 38; 39] geeignet

- Holzfeuchte Ersatzbauteil:  $u = ca. 12\%$  (für Fichte) bis  $u = ca. 17\%$  (für Eiche luftgetrocknet)
- Min. Bauteilbreite [ $b_{B,min}$ ]:  $b_{B,min} = 120mm$  äquivalent zu  $d_{D,min} = 20mm$  mit  $a_{4,min} = 2,5 \cdot d_D$
- Schnittigkeit der Verbindung: ein- und zweischnittig:
  - Einschnittige Verbindung: Min. Bauteilhöhe [ $h_B$ ]:  $h_{B,min} = h_{B,1} + h_{B,2} \geq 120mm$   
mit  $h_{B,1} \geq 60mm$ ;  $h_{B,2} \geq 60mm$
  - Zweischnittige Verbindung: Min. Bauteilhöhe [ $h_B$ ]:  $h_{B,min} = h_{B,1} + h_{B,2} + h_{B,3} \geq 150mm$   
mit  $h_{B,1} \geq 50mm$ ;  $h_{B,2} \geq 50mm$ ;  $h_{B,3} \geq 50mm$

### Bauteil-Holzkeildolle Holzkombination

- Die Holzkombination zwischen Bauteil und Holzkeildolle ist in den gebauten Beispielen variabel. Die häufigsten Bauteile im Bestand sind aus Fichte, Tanne oder Eiche vorzufinden.

#### Allgemeine Regel:

- Der Keil muss immer aus Eiche sein, mindestenfestigkeit D30 nach [23]
- Die Dolle muss eine höhere Rohdichte als das Bauteil im Bestand und das Ersatzbauteil haben:  $\rho_D \geq \rho_B$

Die empfohlenen Holzkonfigurationen sind H1, H2, H3:

- H1: (Ersatz-)Bauteil: Fichte; Dolle: Eiche
- H2: (Ersatz-)Bauteil: Eiche; Dolle: Eiche
- H3: (Ersatz-)Bauteil: Fichte; Dolle: Esche

Die Dollen aus Esche haben ähnlich gute Testergebnisse und ein ähnlich gutes Belastungsniveau wie die Dollen aus Eiche gezeigt. Bei der Verwendung von Holzkombinationen ist auf die richtige Gebrauchsklasse nach [36] zu achten.

#### Mindestabstände in der Verbindung

- Mindestabstand zum Bauteil-Rand [ $a_4$ ]:  $a_{4,min} \geq 2,5 \cdot d_D$  (Ab Mitte des Stiftes)
- Mindestabstand des Verbindungsmittels zu einem Riss [ $a_r$ ]:  $a_r \geq 2,5 \cdot d_D$  (Ab Mitte des Stiftes)
- Mindestabstand zum Hirnholz [ $a_3$ ]:  $a_{3,min} \geq 3 \cdot d_D$  (Ab Mitte des Stiftes)
- Mindestabstand des Verbindungsmittels in der Verbindung [ $a_1 = a_2$ ]:  $a_1 = a_2 \geq 2,5 \cdot d_D$  (Ab Mitte des Stiftes).

## 4.2 Experimentelle Charakterisierung der Holzkeildolle bei Zugbeanspruchung

### 4.2.1 Ziele

Die Ziele der experimentellen Charakterisierung der Holzkeildolle als Reparaturverbindung sind:

- Berechnung der charakteristischen Tragfähigkeit der Holzkeildolle unter axialer Zugbeanspruchung für die Holzkombinationen H1, H2, H3 und Durchmesser der Dolle  $d_D = 20 mm; 30 mm$
- Beschreibung der Versagensmechanismen und des Tragverhaltens der Holzkeildolle unter axialer Zugbeanspruchung
- Grundlagen für ein mechanisches Modell der Holzkeildolle unter axialer Zugbeanspruchung schaffen.

### 4.2.2 Materialien

Die Probekörper wurden vor der Prüfung in der Klimakammer auf  $T = 20^\circ$  und  $LF = 65\%$  nach DIN EN 408 [34] klimatisiert. Die Bestimmung der lokalen Rohdichte der Prüfkörper wurde sowohl für die Bauteile als auch für die Dolle und Keile aus den Maßen und der Volumen des Prüfstückes ermittelt (vgl. Tabelle 4-1, Tabelle 4-2 und Tabelle 4-3 für  $d_D = 20mm$  und Tabelle 4-4, Tabelle 4-5, Tabelle 4-6 für  $d_D = 30 mm$  ).

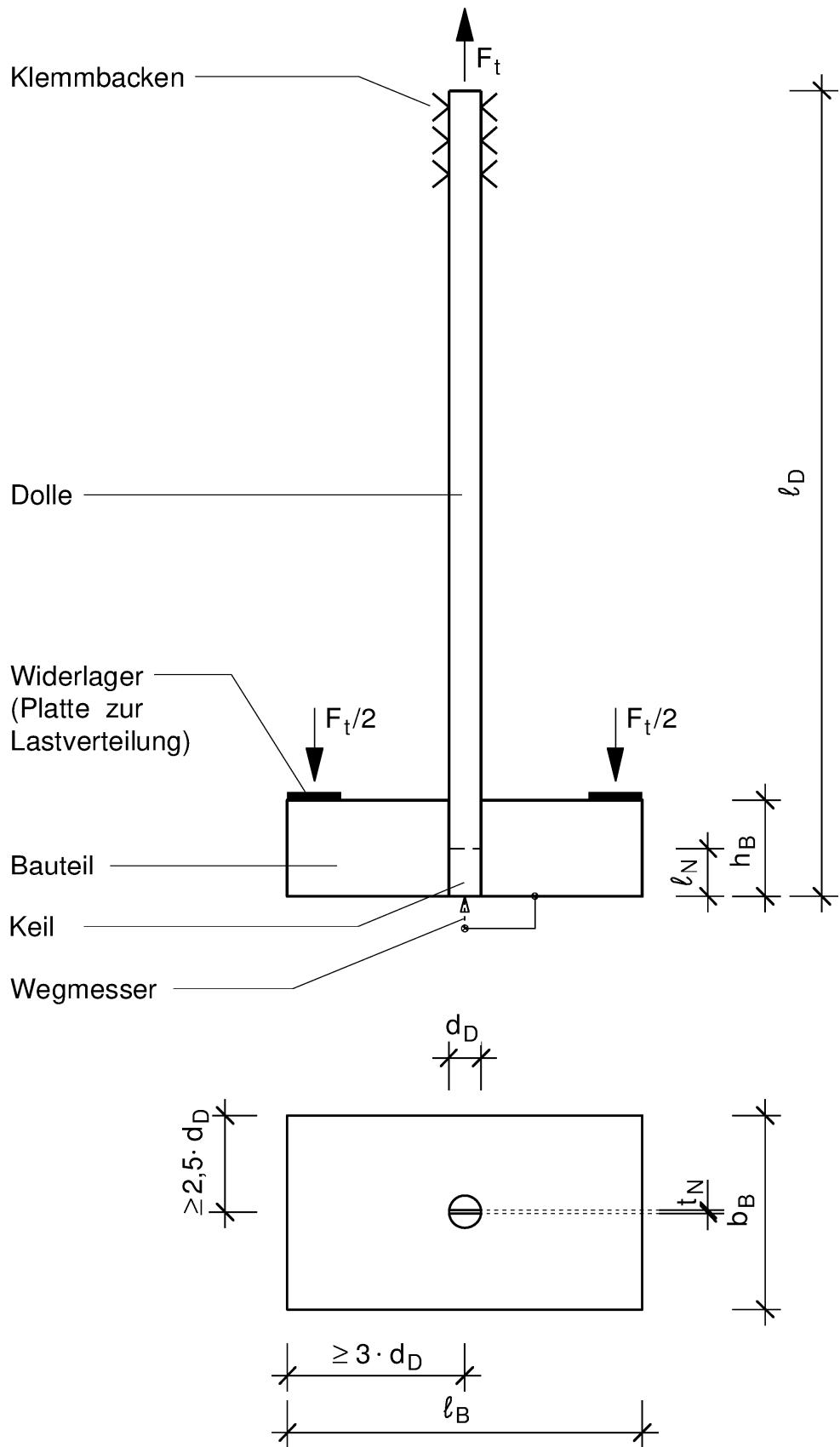


Abbildung 4-3 Prüfkörpergeometrie und Prüfungsaufbau für die Zugprüfung V1

Tabelle 4-1 Geometrische Angaben und Rohdichte der Prüfkörper V1  $d_D = 20\text{mm}$  (Bauteil)

Durch- messer	Holzkom- bination	Prüfkörper / Bauteil	Holz- stück	$l_B$ [mm]	$b_B$ [mm]	$h_B$ [mm]	$m_B$ [g]	$l_{B,LOCH}$ [mm]	$d_{B,LOCH}$ [mm]	$V_{B,LOCH}$ [mm $^3$ ]	$\rho_{20,65}$ [g/cm $^3$ ]
H1		V1_20_H1_T2-90_1	F8	220,24	119,49	59,89	594,9	59,89	19,67	1557894,62	0,382
		V1_20_H1_T2-90_2	F8	219,86	119,67	59,59	578,7	59,59	19,86	1549391,83	0,374
		V1_20_H1_T2-90_3	F8	220,38	119,63	59,69	602,1	59,69	19,96	1554993,47	0,387
		V1_20_H1_T2-90_4	F8	220,21	119,67	59,64	598,0	59,64	20,11	1552721,80	0,385
		V1_20_H1_T2-90_5	F8	220,26	119,52	59,65	594,1	59,65	19,71	1552114,50	0,383
		V1_20_H1_T2-90_6	F8	220,20	119,53	59,74	596,8	59,74	19,91	1553787,68	0,384
		V1_20_H1_T2-90_7	F8	220,22	119,70	59,69	579,4	59,69	20,02	1554658,65	0,373
		V1_20_H1_T2-90_8	F8	220,39	119,67	59,73	621,1	59,73	19,99	1556577,31	0,399
		V1_20_H1_T2-90_9	F8	220,25	119,58	59,75	613,8	59,75	19,83	1555212,06	0,395
		V1_20_H1_T2-90_10	F8	220,11	119,74	59,84	581,5	59,84	19,92	1558492,13	0,373
		V1_20_H1_T2-90_11	F8	220,14	119,48	59,60	614,0	59,60	19,95	1548988,31	0,396
		V1_20_H1_T2-90_12	F8	220,27	119,69	59,65	675,6	59,65	19,79	1554271,40	0,435
		V1_20_H1_T2-90_13	F8	220,25	119,73	59,70	621,4	59,70	19,86	1555827,14	0,399
		V1a_20_H1_T2-90_1	F2	222,11	119,98	59,92	730,8	59,92	19,95	1578063,15	0,463
		V1a_20_H1_T2-90_2	F2	220,14	119,83	59,74	709,3	59,74	19,58	1557916,03	0,455
		V1a_20_H1_T2-90_3	F2	220,28	120,00	59,94	747,9	59,94	20,06	1565486,12	0,478
		V1a_20_H1_T2-90_4	F2	220,25	119,88	59,94	715,8	59,94	19,77	1564229,90	0,458
		V1a_20_H1_T2-90_5	F2	220,21	119,64	59,89	725,4	59,89	19,72	1559565,55	0,465
		V1a_20_H1_T2-90_6	F2	220,16	119,67	59,95	716,6	59,95	19,30	1561936,95	0,459
		V1a_20_H1_T2-90_7	F2	220,24	119,95	59,87	711,6	59,87	19,75	1563291,53	0,455
		V1a_20_H1_T2-90_8	F2	220,10	120,09	60,04	711,5	60,04	19,72	1568628,13	0,454
H2		V1_20_H2_T2-90_1	E1	219,86	120,24	59,79	1020,3	59,79	19,54	1562676,96	0,653
		V1_20_H2_T2-90_2	E1	220,67	119,26	59,52	1005,7	59,52	19,39	1548818,51	0,649
		V1_20_H2_T2-90_3	E1	219,77	120,52	59,66	1024,1	59,66	19,29	1562759,73	0,655
		V1_20_H2_T2-90_4	E1	219,85	120,18	59,62	1026,2	59,62	19,44	1557558,21	0,659
		V1_20_H2_T2-90_5	E5	220,36	120,05	59,68	1218,7	59,68	19,52	1560927,86	0,781
		V1_20_H2_T2-90_6	E5	220,12	120,34	59,53	1208,7	59,53	19,42	1559271,59	0,775
		V1_20_H2_T2-90_7	E5	220,21	120,31	59,61	1194,1	59,61	19,46	1561546,03	0,765
		V1_20_H2_T2-90_8	E5	219,94	119,61	59,74	1117,7	59,74	19,26	1554176,83	0,719
		V1_20_H2_T2-90_9	E5	219,83	119,50	59,73	1140,0	59,73	19,23	1551740,62	0,735
		V1_20_H2_T2-90_10	E5	219,70	119,99	59,70	1197,8	59,70	19,38	1556189,14	0,770
		V1_20_H2_T2-90_11	E5	219,91	120,07	59,81	1172,5	59,81	19,71	1561009,84	0,751
		V1_20_H2_T2-90_12	E5	219,74	119,34	59,48	1187,2	59,48	19,37	1542262,43	0,770
		V1_20_H2_T2-90_13	E5	219,83	120,25	59,81	1102,7	59,81	19,60	1563005,10	0,705
		V1a_20_H2_T2-90_1	E6	220,11	119,86	59,55	1072,0	59,55	19,77	1552790,63	0,690
		V1a_20_H2_T2-90_2	E6	220,10	119,75	59,57	1059,7	59,57	19,17	1552891,60	0,682
		V1a_20_H2_T2-90_3	E6	220,17	119,73	59,66	1047,0	59,66	19,55	1554785,71	0,673
		V1a_20_H2_T2-90_4	E6	220,15	119,50	59,66	1059,4	59,66	19,93	1550919,03	0,683
		V1a_20_H2_T2-90_5	E4	220,15	119,46	60,25	1128,8	60,25	19,18	1567114,11	0,720
		V1a_20_H2_T2-90_6	E4	220,12	120,39	60,05	999,3	60,05	19,28	1573808,41	0,635
		V1a_20_H2_T2-90_7	E4	219,73	119,84	60,49	1100,2	60,49	19,61	1574579,91	0,699
		V1a_20_H2_T2-90_8	E4	220,16	120,30	60,19	1099,5	60,19	18,45	1578055,19	0,697
H3		V1_20_H3_T2-90_1	F6	220,20	119,34	59,69	735,1	59,69	19,82	1550157,55	0,474
		V1_20_H3_T2-90_2	F6	220,13	119,84	59,60	739,1	59,60	19,77	1553974,88	0,476
		V1_20_H3_T2-90_3	F6	220,11	119,83	59,69	736,4	59,69	19,70	1556176,57	0,473
		V1_20_H3_T2-90_4	F6	220,17	119,87	59,64	746,7	59,64	19,81	1555623,48	0,480
		V1_20_H3_T2-90_5	F6	220,05	119,53	59,67	726,9	59,67	19,59	1551489,56	0,469
		V1_20_H3_T2-90_6	F6	220,31	119,92	59,79	739,0	59,79	19,89	1561048,87	0,473
		V1_20_H3_T2-90_7	F6	220,22	119,81	59,60	793,6	59,60	19,48	1554756,76	0,510
		V1_20_H3_T2-90_8	F6	220,14	119,38	59,57	733,3	59,57	19,59	1547563,22	0,474
		V1_20_H3_T2-90_9	F6	220,39	119,50	59,82	743,8	59,82	19,65	1557314,70	0,478
		V1_20_H3_T2-90_10	F6	219,91	119,45	59,63	722,8	59,63	19,64	1548310,73	0,467
		V1_20_H3_T2-90_11	F6	219,89	119,90	59,50	742,9	59,50	19,79	1550404,26	0,479
		V1_20_H3_T2-90_12	F6	220,33	119,87	59,54	774,7	59,54	19,82	1554138,52	0,498
		V1_20_H3_T2-90_13	F6	220,18	119,83	59,53	738,9	59,53	19,84	1552245,74	0,476
		V1a_20_H3_T2-90_1	F6	220,27	120,09	59,67	738,8	59,67	19,53	1560529,04	0,473
		V1a_20_H3_T2-90_2	F6	220,25	119,47	59,70	732,7	59,70	19,97	1552202,99	0,472
		V1a_20_H3_T2-90_3	F6	220,37	119,57	59,88	763,8	59,88	19,50	1559933,48	0,490
		V1a_20_H3_T2-90_4	F6	220,24	119,50	59,71	711,7	59,71	19,91	1552898,38	0,458
		V1a_20_H3_T2-90_5	F6	220,10	119,47	59,68	724,5	59,68	19,67	1551170,90	0,467
		V1a_20_H3_T2-90_6	F6	220,17	119,70	59,70	716,7	59,70	19,56	1555415,48	0,461
		V1a_20_H3_T2-90_7	F6	220,22	119,85	59,85	726,9	59,85	19,62	1561548,29	0,465
		V1a_20_H3_T2-90_8	F6	220,15	119,95	59,81	745,1	59,81	19,64	1561282,70	0,477

Tabelle 4-2 Geometrische Angaben und Rohdichte der Prüfkörper V1  $d_D = 20\text{mm}$  (Dolle)

Durch- messer	Holzkom- bination	Prüfkörper	Dolle	Holzart	$d_D$ [mm]	$l_D$ [mm]	$m_D$ [g]	$V_{ROT}$ [mm $^3$ ]	$\rho_{20,65}$ [g/cm $^3$ ]
20	H1	V1_20_H1_T2-90_1	43	Eiche (E)	20	500	80,3	155398,13	0,517
		V1_20_H1_T2-90_2	12		20	500	102,9	155381,63	0,662
		V1_20_H1_T2-90_3	40		20	500	81,0	155504,63	0,521
		V1_20_H1_T2-90_4	24		20	500	109,6	155350,28	0,706
		V1_20_H1_T2-90_5	2		20	500	111,1	155401,08	0,715
		V1_20_H1_T2-90_6	37		20	500	110,2	155417,63	0,709
		V1_20_H1_T2-90_7	27		20	500	83,2	155309,63	0,536
		V1_20_H1_T2-90_8	22		20	500	101,9	155598,73	0,655
		V1_20_H1_T2-90_9	33		20	500	107,5	155519,63	0,691
		V1_20_H1_T2-90_10	3		20	500	112,5	155548,43	0,723
		V1_20_H1_T2-90_11	16		20	500	99,8	155403,43	0,642
		V1_20_H1_T2-90_12	1		20	500	108,9	155563,33	0,700
		V1_20_H1_T2-90_13	21		20	500	99,9	155464,33	0,643
		V1a_20_H1_T2-90_1	38		20	500	109,5	155681,63	0,703
		V1a_20_H1_T2-90_2	36		20	500	103,8	155725,58	0,667
		V1a_20_H1_T2-90_3	32		20	500	108,0	155705,03	0,694
		V1a_20_H1_T2-90_4	13		20	500	96,0	155630,63	0,617
		V1a_20_H1_T2-90_5	26		20	500	92,2	155252,63	0,594
		V1a_20_H1_T2-90_6	39		20	500	102,8	155180,63	0,662
		V1a_20_H1_T2-90_7	34		20	500	103,5	154991,63	0,668
		V1a_20_H1_T2-90_8	28		20	500	79,6	155354,13	0,512
	H2	V1_20_H2_T2-90_1	18	Eiche (E)	20	500	103,8	155504,63	0,668
		V1_20_H2_T2-90_2	29		20	500	108,9	155623,83	0,700
		V1_20_H2_T2-90_3	31		20	500	109,9	155561,63	0,706
		V1_20_H2_T2-90_4	23		20	500	106,9	155648,88	0,687
		V1_20_H2_T2-90_5	20		20	500	83,6	155477,63	0,538
		V1_20_H2_T2-90_6	17		20	500	92,0	155426,63	0,592
		V1_20_H2_T2-90_7	6		20	500	111,5	155507,28	0,717
		V1_20_H2_T2-90_8	9		20	500	94,9	155606,63	0,610
		V1_20_H2_T2-90_9	14		20	500	107,7	155627,63	0,692
		V1_20_H2_T2-90_10	30		20	500	78,8	155444,63	0,507
		V1_20_H2_T2-90_11	35		20	500	106,7	155532,08	0,686
		V1_20_H2_T2-90_12	15		20	500	99,7	155530,88	0,641
		V1_20_H2_T2-90_13	41		20	500	85,0	155568,73	0,546
		V1a_20_H2_T2-90_1	10		20	500	109,9	155684,28	0,706
		V1a_20_H2_T2-90_2	5		20	500	107,2	155676,03	0,689
		V1a_20_H2_T2-90_3	11		20	500	107,2	155657,73	0,689
		V1a_20_H2_T2-90_4	19		20	500	111,0	155696,33	0,713
		V1a_20_H2_T2-90_5	7		20	500	107,2	155325,13	0,690
		V1a_20_H2_T2-90_6	25		20	500	109,5	155264,23	0,705
		V1a_20_H2_T2-90_7	4		20	500	84,9	155127,93	0,547
		V1a_20_H2_T2-90_8	8		20	500	80,8	155333,23	0,520
	H3	V1_20_H3_T2-90_1	s11	Esche (Es)	20	500	107,1	155572,18	0,688
		V1_20_H3_T2-90_2	s12		20	500	117,0	155669,63	0,752
		V1_20_H3_T2-90_3	s1		20	500	104,2	155713,23	0,669
		V1_20_H3_T2-90_4	s2		20	500	101,5	155473,83	0,653
		V1_20_H3_T2-90_5	s14		20	500	99,5	155655,28	0,639
		V1_20_H3_T2-90_6	s6		20	500	94,2	155748,53	0,605
		V1_20_H3_T2-90_7	s18		20	500	99,5	155572,18	0,640
		V1_20_H3_T2-90_8	s21		20	500	99,6	155678,63	0,640
		V1_20_H3_T2-90_9	s10		20	500	97,0	155627,63	0,623
		V1_20_H3_T2-90_10	s8		20	500	120,4	155672,48	0,773
		V1_20_H3_T2-90_11	s16		20	500	107,3	155600,63	0,690
		V1_20_H3_T2-90_12	s4		20	500	97,3	155645,63	0,625
		V1_20_H3_T2-90_13	s3		20	500	118,6	155742,73	0,762
		V1a_20_H3_T2-90_1	s7		20	500	120,9	155870,33	0,776
		V1a_20_H3_T2-90_2	s17		20	500	99,8	155885,63	0,640
		V1a_20_H3_T2-90_3	s9		20	500	102,1	155996,13	0,655
		V1a_20_H3_T2-90_4	s22		20	500	110,1	155905,13	0,706
		V1a_20_H3_T2-90_5	s19		20	500	99,3	155457,13	0,639
		V1a_20_H3_T2-90_6	s5		20	500	107,2	155415,83	0,690
		V1a_20_H3_T2-90_7	s23		20	500	116,5	155392,98	0,750
		V1a_20_H3_T2-90_8	s15		20	500	120,2	155417,38	0,773

Tabelle 4-3 Geometrische Angaben und Rohdichte der Prüfkörper V1  $d_D = 20\text{mm}$  (Keil)

Durchmesser	Holzkom-bination	Prüfkörper	Keil Nummer	Holz-art	$l_k$ [mm]	$b_k$ [mm]	$t_{k,1,\text{mean}}$ [mm]	$t_{k,3}$ [mm]	$t_{k,2}$ [mm]	$m_k$ [g]	$V_{\text{TOT}}$ [mm $^3$ ]	$\rho_{20,65}$ [g/cm $^3$ ]
20	H1	V1_20_H1_T2-90_1	51	E	40,46	20	1,78	4,99	6,06	2,289	2451,876	0,934
		V1_20_H1_T2-90_2	24	E	40,57	20	1,57	5,08	6,05	2,031	2454,485	0,827
		V1_20_H1_T2-90_3	4	E	40,35	20	2,02	5,08	6,13	2,013	2473,455	0,814
		V1_20_H1_T2-90_4	36	E	40,4	20	1,95	5,24	6,17	2,043	2492,680	0,820
		V1_20_H1_T2-90_5	7	E	40,65	20	1,39	4,85	5,69	2,073	2312,985	0,896
		V1_20_H1_T2-90_6	23	E	40,39	20	2,03	5,24	6,08	2,021	2455,712	0,823
		V1_20_H1_T2-90_7	39	E	40,34	20	1,86	4,99	5,88	1,956	2371,992	0,825
		V1_20_H1_T2-90_8	29	E	40,43	20	1,59	5,21	6,16	2,137	2490,488	0,858
		V1_20_H1_T2-90_9	30	E	40,44	20	1,75	5,22	6,13	2,370	2478,972	0,956
		V1_20_H1_T2-90_10	45	E	40,69	20	1,96	5,23	6,13	2,010	2494,297	0,806
		V1_20_H1_T2-90_11	13	E	40,39	20	1,62	5,14	6,02	1,972	2431,478	0,811
		V1_20_H1_T2-90_12	11	E	40,35	20	2,08	4,91	5,75	1,786	2320,125	0,770
		V1_20_H1_T2-90_13	25	E	40,56	20	1,85	5,20	6,06	2,050	2457,936	0,834
		V1a_20_H1_T2-90_1	120	E	49,81	20	1,18	5,21	7,52	2,434	3745,712	0,650
		V1a_20_H1_T2-90_2	112	E	50,57	20	1,76	5,43	8,01	2,501	4050,657	0,617
		V1a_20_H1_T2-90_3	121	E	50,00	20	1,91	5,80	7,99	2,951	3995,000	0,739
		V1a_20_H1_T2-90_4	113	E	50,12	20	0,42	5,65	7,86	3,581	3939,432	0,909
		V1a_20_H1_T2-90_5	221	E	50,35	20	0,80	4,40	6,58	2,041	3313,030	0,616
		V1a_20_H1_T2-90_6	217	E	51,72	20	0,42	3,65	6,03	1,968	3118,716	0,631
		V1a_20_H1_T2-90_7	224	E	51,12	20	0,66	4,09	5,87	2,045	3000,744	0,681
		V1a_20_H1_T2-90_8	223	E	51,06	20	0,95	4,22	6,52	2,362	3329,112	0,709
	H2	V1_20_H2_T2-90_1	34	E	40,52	20	1,73	5,13	6,10	2,028	2471,720	0,820
		V1_20_H2_T2-90_2	32	E	40,38	20	1,89	5,02	6,16	2,286	2487,408	0,919
		V1_20_H2_T2-90_3	47	E	40,35	20	1,44	5,06	5,82	2,036	2348,370	0,867
		V1_20_H2_T2-90_4	35	E	40,31	20	1,95	4,83	6,07	2,051	2446,817	0,838
		V1_20_H2_T2-90_5	53	E	40,50	20	1,82	5,03	6,12	2,118	2478,600	0,855
		V1_20_H2_T2-90_6	9	E	40,4	20	1,70	5,12	5,96	2,105	2407,840	0,874
		V1_20_H2_T2-90_7	63	E	40,39	20	1,87	5,09	6,05	1,910	2443,595	0,782
		V1_20_H2_T2-90_8	61	E	40,41	20	1,35	4,93	6,17	1,948	2493,297	0,781
		V1_20_H2_T2-90_9	17	E	40,53	20	1,96	5,03	6,15	2,221	2492,595	0,891
		V1_20_H2_T2-90_10	24	E	40,57	20	1,57	5,08	6,05	2,031	2454,485	0,827
		V1_20_H2_T2-90_11	1	E	40,44	20	1,90	5,00	6,05	2,038	2446,620	0,833
		V1_20_H2_T2-90_12	54	E	40,41	20	1,85	5,17	6,13	2,157	2477,133	0,871
		V1_20_H2_T2-90_13	15	E	40,56	20	2,07	4,87	6,09	1,944	2470,104	0,787
		V1a_20_H2_T2-90_1	125	E	50,17	20	0,85	5,52	8,03	2,859	4028,651	0,710
		V1a_20_H2_T2-90_2	110	E	49,80	20	1,60	5,56	8,87	2,586	4417,260	0,585
		V1a_20_H2_T2-90_3	124	E	50,00	20	1,72	6,00	8,51	2,745	4255,000	0,645
		V1a_20_H2_T2-90_4	111	E	49,52	20	1,37	5,21	8,01	2,421	3966,552	0,610
		V1a_20_H2_T2-90_5	220	E	50,89	20	0,59	4,41	6,51	2,219	3312,939	0,670
		V1a_20_H2_T2-90_6	212	E	50,55	20	0,42	4,14	6,66	2,068	3366,630	0,614
		V1a_20_H2_T2-90_7	210	E	50,90	20	0,65	4,16	6,31	2,079	3211,790	0,647
		V1a_20_H2_T2-90_8	222	E	50,13	20	0,54	3,53	5,83	1,850	2922,579	0,633
	H3	V1_20_H3_T2-90_1	31	E	40,64	20	2,19	4,99	6,11	2,092	2483,104	0,842
		V1_20_H3_T2-90_2	37	E	40,50	20	1,92	5,20	6,09	1,996	2466,450	0,809
		V1_20_H3_T2-90_3	28	E	40,67	20	1,82	5,11	6,12	1,975	2489,004	0,793
		V1_20_H3_T2-90_4	57	E	40,49	20	1,64	5,05	6,12	2,076	2477,988	0,838
		V1_20_H3_T2-90_5	21	E	40,36	20	1,99	4,94	6,03	1,972	2433,708	0,810
		V1_20_H3_T2-90_6	41	E	40,54	20	1,94	5,01	6,06	2,028	2456,724	0,825
		V1_20_H3_T2-90_7	6	E	40,31	20	1,78	5,17	6,08	2,080	2450,848	0,849
		V1_20_H3_T2-90_8	12	E	40,52	20	1,92	5,24	6,10	2,089	2471,720	0,845
		V1_20_H3_T2-90_9	62	E	40,54	20	1,44	5,01	6,04	2,327	2448,616	0,950
		V1_20_H3_T2-90_10	60	E	40,45	20	1,89	5,11	6,16	2,068	2491,720	0,830
		V1_20_H3_T2-90_11	14	E	40,32	20	1,84	4,88	6,14	1,972	2475,648	0,797
		V1_20_H3_T2-90_12	50	E	40,31	20	1,90	5,23	6,10	2,074	2458,910	0,843
		V1_20_H3_T2-90_13	52	E	40,50	20	1,48	5,09	6,06	2,107	2454,300	0,858
		V1a_20_H3_T2-90_1	123	E	50,08	20	0,66	5,67	8,30	2,980	4156,640	0,717
		V1a_20_H3_T2-90_2	116	E	49,80	20	0,41	5,30	7,80	2,854	3884,400	0,735
		V1a_20_H3_T2-90_3	119	E	49,27	20	0,85	5,27	7,49	2,148	3690,323	0,582
		V1a_20_H3_T2-90_4	122	E	49,38	20	1,46	5,72	8,16	2,516	4029,408	0,624
		V1a_20_H3_T2-90_5	225	E	51,25	20	0,40	3,97	6,69	1,981	3428,625	0,578
		V1a_20_H3_T2-90_6	211	E	48,86	20	0,52	4,36	6,81	1,766	3327,366	0,531
		V1a_20_H3_T2-90_7	218	E	49,91	20	0,65	4,00	6,11	1,956	3049,501	0,641
		V1a_20_H3_T2-90_8	219	E	48,47	20	0,82	4,27	6,52	2,139	3160,244	0,677

Tabelle 4-4 Geometrische Angaben und Rohdichte der Prüfkörper V1  $d_D = 30\text{mm}$  (Bauteil)

Durch- messer	Holzkom- bination	Prüfkörper / Bauteil	Holz- stück	$l_B$ [mm]	$b_B$ [mm]	$h_B$ [mm]	$m_B$ [g]	$l_{B,LOCH}$ [mm]	$d_{B,LOCH}$ [mm]	$V_{B,LOCH}$ [mm $^3$ ]	$\rho_{20,65}$ [g/cm $^3$ ]
H1		V1_30_H1_T2-90_1	F4	220,34	180,32	58,20	939,9	58,20	30,24	2270585,44	0,414
		V1_30_H1_T2-90_2	F4	220,25	179,63	59,05	973,1	59,05	29,74	2295205,49	0,424
		V1_30_H1_T2-90_3	F4	220,08	179,37	58,68	953,0	58,68	30,11	2274653,81	0,419
		V1_30_H1_T2-90_4	F4	220,19	180,03	58,43	987,3	58,43	29,94	2275075,59	0,434
		V1_30_H1_T2-90_5	F4	220,17	180,26	58,29	928,8	58,29	30,13	2271843,80	0,409
		V1_30_H1_T2-90_6	F4	220,14	180,10	57,82	993,9	57,82	30,13	2251176,38	0,442
		V1_30_H1_T2-90_7	F4	220,28	179,77	58,13	940,1	58,13	30,20	2260293,27	0,416
		V1_30_H1_T2-90_8	F4	220,29	180,05	58,33	918,1	58,33	30,07	2272131,62	0,404
		V1_30_H1_T2-90_9	F4	220,30	179,81	58,29	989,1	58,29	29,90	2268063,27	0,436
		V1_30_H1_T2-90_10	F4	220,20	180,10	58,40	937,4	58,40	30,26	2274029,21	0,412
		V1_30_H1_T2-90_11	F4	220,10	179,84	58,60	941,4	58,60	30,47	2276821,19	0,413
		V1_30_H1_T2-90_12	F4	220,35	179,66	58,34	985,5	58,34	30,13	2267972,36	0,435
		V1_30_H1_T2-90_13	F4	220,21	197,44	58,55	935,6	58,55	29,81	2504788,28	0,374
		V1a_30_H1_T2-90_1	F3	220,52	179,68	59,87	1048,4	59,87	29,59	2331060,24	0,450
		V1a_30_H1_T2-90_2	F3	220,63	180,00	59,31	1019,3	59,31	29,81	2314007,34	0,440
		V1a_30_H1_T2-90_3	F3	220,73	180,36	59,25	1165,7	59,25	29,83	2317385,57	0,503
		V1a_30_H1_T2-90_4	F3	220,40	180,14	60,05	928,4	60,05	30,04	2341596,39	0,396
		V1a_30_H1_T2-90_5	F3	220,73	180,00	59,76	927,2	59,76	30,00	2332106,61	0,398
		V1a_30_H1_T2-90_6	F3	220,52	180,25	59,25	934,4	59,25	29,59	2314367,83	0,404
		V1a_30_H1_T2-90_7	F3	220,59	179,99	59,22	1013,8	59,22	29,88	2309744,59	0,439
		V1a_30_H1_T2-90_8	F3	220,38	179,97	59,41	931,3	59,41	30,16	2313863,27	0,402
H2		V1_30_H2_T2-90_1	E2	219,87	179,97	59,60	1514,4	59,60	29,84	2314546,41	0,654
		V1_30_H2_T2-90_2	E2	220,36	180,24	59,80	1488,1	59,80	29,76	2334598,97	0,637
		V1_30_H2_T2-90_3	E2	220,72	179,52	59,53	1433,0	59,53	29,83	2300841,57	0,623
		V1_30_H2_T2-90_4	E2	219,97	179,33	59,66	1415,9	59,66	29,65	2312763,18	0,612
		V1_30_H2_T2-90_5	E2	220,07	179,31	59,45	1398,0	59,45	29,88	2304041,27	0,607
		V1_30_H2_T2-90_6	E2	219,89	179,37	59,59	1430,3	59,59	30,16	2308825,75	0,619
		V1_30_H2_T2-90_7	E2	220,62	179,66	59,88	1426,9	59,88	30,03	2317687,62	0,616
		V1_30_H2_T2-90_8	E2	220,16	179,39	59,47	1509,4	59,47	29,85	2299119,27	0,657
		V1_30_H2_T2-90_9	E2	220,13	180,08	59,82	1504,3	59,82	29,97	2329125,50	0,646
		V1_30_H2_T2-90_10	E2	220,60	179,75	59,59	1509,5	59,59	29,97	2320875,84	0,650
		V1_30_H2_T2-90_11	E2	219,43	180,18	59,54	1473,7	59,54	30,04	2311828,22	0,637
		V1_30_H2_T2-90_12	E2	220,11	179,29	59,34	1478,8	59,34	29,90	2300099,58	0,643
		V1_30_H2_T2-90_13	E2	220,04	179,29	59,51	1427,0	59,51	30,00	2305662,18	0,619
		V1a_30_H2_T2-90_1	E2	219,67	180,36	59,89	1470,2	59,89	29,97	2330573,59	0,631
		V1a_30_H2_T2-90_2	E2	220,46	179,35	59,67	1463,9	59,67	29,88	2317480,54	0,632
		V1a_30_H2_T2-90_3	E2	219,19	179,84	59,85	1488,5	59,85	30,16	2316476,97	0,643
		V1a_30_H2_T2-90_4	E2	220,02	179,82	59,96	1495,8	59,96	30,14	2329477,50	0,642
		V1a_30_H2_T2-90_5	E2	220,05	179,55	59,64	1437,8	59,64	30,12	2313880,10	0,621
H3		V1a_30_H2_T2-90_6	E2	219,99	179,90	59,68	1476,6	59,68	29,90	2320003,14	0,636
		V1a_30_H2_T2-90_7	E2	219,38	179,93	59,71	1474,3	59,71	29,98	2314785,17	0,637
		V1a_30_H2_T2-90_8	E2	219,41	179,98	59,85	1490,4	59,85	29,84	2321585,88	0,642
		V1_30_H3_T2-90_1	F1	220,37	179,93	59,89	944,1	59,89	29,87	2332741,17	0,405
		V1_30_H3_T2-90_2	F1	220,38	180,14	59,79	908,2	59,79	29,92	2331580,39	0,390
		V1_30_H3_T2-90_3	F1	220,22	180,23	59,73	916,0	59,73	30,04	2328365,36	0,393
		V1_30_H3_T2-90_4	F1	220,34	180,13	59,75	926,7	59,75	30,00	2329233,40	0,398
		V1_30_H3_T2-90_5	F1	220,18	179,88	59,56	927,7	59,56	30,10	2316550,45	0,400
		V1_30_H3_T2-90_6	F1	220,35	179,94	59,68	941,1	59,68	30,06	2323944,59	0,405
		V1_30_H3_T2-90_7	F1	220,19	179,86	59,72	963,4	59,72	30,04	2322787,23	0,415
		V1_30_H3_T2-90_8	F1	220,27	179,94	59,97	907,0	59,97	29,91	2334797,63	0,388
		V1_30_H3_T2-90_9	F1	220,15	180,58	59,63	927,8	59,63	30,27	2327659,91	0,399
		V1_30_H3_T2-90_10	F1	220,31	180,18	59,77	887,3	59,77	29,29	2332324,59	0,380
		V1_30_H3_T2-90_11	F1	220,28	180,00	59,66	912,5	59,66	30,05	2323231,01	0,393
		V1_30_H3_T2-90_12	F1	220,29	180,14	59,74	989,1	59,74	29,99	2328465,27	0,425
		V1_30_H3_T2-90_13	F1	220,25	179,84	59,71	892,8	59,71	29,82	2323397,22	0,384
		V1a_30_H3_T2-90_1	F3	220,01	179,92	59,18	940,3	59,18	30,12	2300425,71	0,409
		V1a_30_H3_T2-90_2	F3	220,11	179,62	59,16	925,6	59,16	30,41	2295990,55	0,403
		V1a_30_H3_T2-90_3	F1	220,17	180,16	59,77	922,2	59,77	30,17	2328097,39	0,396
		V1a_30_H3_T2-90_4	F1	220,00	180,10	59,74	1007,8	59,74	30,27	2324027,04	0,434
		V1a_30_H3_T2-90_5	F1	220,21	179,75	59,51	908,2	59,51	30,37	2312460,16	0,393
		V1a_30_H3_T2-90_6	F1	220,09	179,90	59,63	904,3	59,63	30,11	2318541,98	0,390
		V1a_30_H3_T2-90_7	F1	219,92	180,15	59,69	914,4	59,69	30,25	2321935,01	0,394
		V1a_30_H3_T2-90_8	F1	219,89	180,25	59,71	919,3	59,71	30,31	2323532,86	0,396

Tabelle 4-5 Geometrische Angaben und Rohdichte der Prüfkörper V1  $d_D = 30\text{mm}$  (Dolle)

Durch- messer	Holzkom- bination	Prüfkörper	Dolle	Holzart	$d_D$ [mm]	$l_D$ [mm]	$m_D$ [g]	$V_{TOT}$ [mm $^3$ ]	$\rho_{20,65}$ [g/cm $^3$ ]
30	H1	V1_30_H1_T2-90_1	6	Eiche (E)	30	500	219,9	351274,35	0,626
		V1_30_H1_T2-90_2	7		30	500	231,1	351170,17	0,658
		V1_30_H1_T2-90_3	35		30	500	237,5	351424,65	0,000
		V1_30_H1_T2-90_4	36		30	500	252,5	351249,82	0,719
		V1_30_H1_T2-90_5	2		30	500	229,0	351146,02	0,652
		V1_30_H1_T2-90_6	4		30	500	251,7	351155,32	0,717
		V1_30_H1_T2-90_7	3		30	500	225,2	351206,17	0,641
		V1_30_H1_T2-90_8	8		30	500	254,5	351138,67	0,725
		V1_30_H1_T2-90_9	39		30	500	231,6	351182,85	0,659
		V1_30_H1_T2-90_10	1		30	500	243,2	351181,27	0,693
		V1_30_H1_T2-90_11	33		30	500	231,6	351257,62	0,659
		V1_30_H1_T2-90_12	10		30	500	225,6	351327,67	0,642
		V1_30_H1_T2-90_13	34		30	500	212,4	351161,17	0,605
		V1a_30_H1_T2-90_1	11		30	500	233,4	351480,37	0,664
		V1a_30_H1_T2-90_2	20		30	500	247,1	351399,67	0,703
		V1a_30_H1_T2-90_3	30		30	500	268,2	351361,27	0,763
		V1a_30_H1_T2-90_4	19		30	500	301,6	351615,67	0,858
		V1a_30_H1_T2-90_5	21		30	500	223,0	351141,45	0,635
		V1a_30_H1_T2-90_6	43		30	500	247,0	350992,42	0,704
		V1a_30_H1_T2-90_7	6		30	500	219,9	351274,35	0,626
		V1a_30_H1_T2-90_8	25		30	500	244,2	350940,67	0,696
	H2	V1_30_H2_T2-90_1	23	Eiche (E)	30	500	230,1	351278,17	0,655
		V1_30_H2_T2-90_2	27		30	500	225,5	351372,67	0,642
		V1_30_H2_T2-90_3	29		30	500	306,6	351211,12	0,873
		V1_30_H2_T2-90_4	22		30	500	245,9	351308,77	0,700
		V1_30_H2_T2-90_5	27		30	500	225,5	351372,67	0,642
		V1_30_H2_T2-90_6	32		30	500	282,0	351367,12	0,803
		V1_30_H2_T2-90_7	40		30	500	245,4	351278,17	0,699
		V1_30_H2_T2-90_8	12		30	500	231,4	351260,62	0,659
		V1_30_H2_T2-90_9	42		30	500	312,6	351214,87	0,890
		V1_30_H2_T2-90_10	31		30	500	218,4	351113,47	0,622
		V1_30_H2_T2-90_11	24		30	500	202,6	351073,05	0,577
		V1_30_H2_T2-90_12	16		30	500	230,5	351113,47	0,656
		V1_30_H2_T2-90_13	13		30	500	222,4	351120,67	0,633
		V1a_30_H2_T2-90_1	28		30	500	233,5	351457,35	0,664
		V1a_30_H2_T2-90_2	5		30	500	312,9	351597,67	0,890
		V1a_30_H2_T2-90_3	14		30	500	245,5	351665,17	0,698
		V1a_30_H2_T2-90_4	15		30	500	239,1	351468,90	0,680
		V1a_30_H2_T2-90_5	38		30	500	226,4	350880,37	0,645
		V1a_30_H2_T2-90_6	18		30	500	234,0	350973,97	0,667
		V1a_30_H2_T2-90_7	41		30	500	256,2	351136,72	0,730
		V1a_30_H2_T2-90_8	37		30	500	226,1	350995,42	0,644
	H3	V1_30_H3_T2-90_1	s14	Esche (Es)	30	500	253,9	351350,17	0,723
		V1_30_H3_T2-90_2	s2		30	500	217,9	351332,17	0,620
		V1_30_H3_T2-90_3	s18		30	500	219,6	351384,82	0,625
		V1_30_H3_T2-90_4	s8		30	500	232,7	351188,92	0,663
		V1_30_H3_T2-90_5	s21		30	500	227,4	351480,37	0,647
		V1_30_H3_T2-90_6	s7		30	500	225,8	351300,75	0,643
		V1_30_H3_T2-90_7	s1		30	500	245,8	351127,95	0,700
		V1_30_H3_T2-90_8	s22		30	500	237,5	351219,45	0,676
		V1_30_H3_T2-90_9	s3		30	500	233,4	351274,35	0,664
		V1_30_H3_T2-90_10	s13		30	500	238,5	351471,67	0,679
		V1_30_H3_T2-90_11	s6		30	500	239,8	351221,10	0,683
		V1_30_H3_T2-90_12	s12		30	500	224,9	351381,67	0,640
		V1_30_H3_T2-90_13	s20		30	500	255,5	351305,17	0,727
		V1a_30_H3_T2-90_1	s15		30	500	252,0	351504,30	0,717
		V1a_30_H3_T2-90_2	s19		30	500	229,3	351512,25	0,652
		V1a_30_H3_T2-90_3	s10		30	500	223,8	351417,67	0,637
		V1a_30_H3_T2-90_4	s17		30	500	231,6	351593,47	0,659
		V1a_30_H3_T2-90_5	s16		30	500	231,2	351080,17	0,659
		V1a_30_H3_T2-90_6	s9		30	500	225,9	351128,02	0,643
		V1a_30_H3_T2-90_7	s5		30	500	261,2	350810,17	0,745
		V1a_30_H3_T2-90_8	s11		30	500	253,0	350937,90	0,721

Tabelle 4-6 Geometrische Angaben und Rohdichte der Prüfkörper V1  $d_D = 30\text{mm}$  (Keil)

Durchmesser	Holzkom-bination	Prüfkörper	Keil-Nr.	Holz-art	$l_k$ [mm]	$b_k$ [mm]	$t_{k,1,\text{mean}}$ [mm]	$t_{k,3}$ [mm]	$t_{k,2}$ [mm]	$m_k$ [g]	$V_{\text{TOT}}$ [mm $^3$ ]	$\rho_{20,65}$ [g/cm $^3$ ]
30	H1	V1_30_H1_T2-90_1	16	E	40,76	30	1,71	4,89	5,56	3,015	3399,384	0,887
		V1_30_H1_T2-90_2	21	E	40,60	30	1,90	5,08	5,94	2,944	3617,460	0,814
		V1_30_H1_T2-90_3	10	E	40,32	30	1,85	5,02	6,09	2,600	3683,232	0,706
		V1_30_H1_T2-90_4	22	E	40,22	30	1,86	4,99	5,49	2,859	3312,117	0,863
		V1_30_H1_T2-90_5	44	E	40,72	30	1,68	5,17	6,12	3,084	3738,096	0,825
		V1_30_H1_T2-90_6	42	E	40,52	30	1,68	4,99	5,98	2,880	3634,644	0,792
		V1_30_H1_T2-90_7	14	E	40,51	30	1,73	4,77	5,65	2,941	3433,223	0,857
		V1_30_H1_T2-90_8	32	E	40,51	30	1,85	5,01	5,99	2,996	3639,824	0,823
		V1_30_H1_T2-90_9	46	E	40,37	30	1,86	5,16	6,12	3,142	3705,966	0,848
		V1_30_H1_T2-90_10	5	E	40,45	30	1,91	5,17	6,05	3,021	3670,838	0,823
		V1_30_H1_T2-90_11	28	E	40,53	30	1,92	5,11	6,10	2,916	3708,495	0,786
		V1_30_H1_T2-90_12	12	E	40,60	30	1,60	5,14	6,08	2,878	3702,720	0,777
		V1_30_H1_T2-90_13	43	E	40,78	30	1,84	5,17	5,85	3,102	3578,445	0,867
		V1a_30_H1_T2-90_1	240	E	40,54	30	1,72	5,20	6,15	2,984	3739,815	0,798
		V1a_30_H1_T2-90_2	135	E	40,37	30	2,00	5,10	6,04	2,949	3657,522	0,806
		V1a_30_H1_T2-90_3	137	E	40,44	30	1,64	5,13	6,08	2,836	3688,128	0,769
		V1a_30_H1_T2-90_4	136	E	40,35	30	1,44	5,05	6,01	2,832	3637,553	0,779
		V1a_30_H1_T2-90_5	230	E	40,62	30	2,07	5,03	6,05	3,006	3686,265	0,815
		V1a_30_H1_T2-90_6	241	E	40,01	30	2,02	5,17	6,15	3,010	3690,923	0,816
		V1a_30_H1_T2-90_7	235	E	40,82	30	1,39	5,17	6,24	3,000	3820,752	0,785
		V1a_30_H1_T2-90_8	231	E	40,71	30	2,07	5,31	6,10	3,000	3724,965	0,805
	H2	V1_30_H2_T2-90_1	29	E	40,64	30	1,84	5,19	6,03	2,909	3675,888	0,791
		V1_30_H2_T2-90_2	15	E	40,60	30	1,83	5,20	6,12	2,917	3727,080	0,783
		V1_30_H2_T2-90_3	13	E	40,61	30	1,88	4,97	5,89	2,940	3587,894	0,819
		V1_30_H2_T2-90_4	8	E	40,78	30	1,94	5,16	6,00	3,309	3670,200	0,902
		V1_30_H2_T2-90_5	4	E	40,21	30	1,93	5,08	6,00	2,979	3618,900	0,823
		V1_30_H2_T2-90_6	27	E	40,55	30	1,79	5,16	6,14	3,058	3734,655	0,819
		V1_30_H2_T2-90_7	3	E	40,74	30	1,71	5,10	6,11	2,911	3733,821	0,780
		V1_30_H2_T2-90_8	2	E	40,33	30	1,66	5,11	6,04	3,114	3653,898	0,852
		V1_30_H2_T2-90_9	48	E	40,34	30	1,85	5,25	6,08	3,160	3679,008	0,859
		V1_30_H2_T2-90_10	25	E	40,90	30	1,68	5,27	6,12	2,903	3754,620	0,773
		V1_30_H2_T2-90_11	20	E	40,42	30	1,72	5,27	6,07	2,866	3680,241	0,779
		V1_30_H2_T2-90_12	19	E	40,55	30	1,74	4,90	5,60	2,831	3406,200	0,831
		V1_30_H2_T2-90_13	23	E	40,50	30	1,67	5,11	6,02	3,096	3657,150	0,847
		V1a_30_H2_T2-90_1	133	E	40,46	30	1,91	5,10	5,89	2,998	3574,641	0,839
		V1a_30_H2_T2-90_2	130	E	40,78	30	1,66	4,93	5,89	2,929	3602,913	0,813
		V1a_30_H2_T2-90_3	134	E	40,40	30	1,84	5,07	5,94	3,009	3599,640	0,836
		V1a_30_H2_T2-90_4	131	E	40,56	30	1,78	5,20	5,99	3,025	3644,316	0,830
		V1a_30_H2_T2-90_5	238	E	40,40	30	1,63	5,13	6,19	3,011	3751,140	0,803
		V1a_30_H2_T2-90_6	240	E	40,54	30	1,72	5,20	6,15	2,984	3739,815	0,798
		V1a_30_H2_T2-90_7	237	E	40,69	30	1,57	4,87	5,73	2,819	3497,306	0,806
		V1a_30_H2_T2-90_8	234	E	40,67	30	1,84	5,05	6,07	3,185	3703,004	0,860
	H3	V1_30_H3_T2-90_1	16	E	40,76	30	1,71	4,89	5,56	3,015	3399,384	0,887
		V1_30_H3_T2-90_2	7	E	40,53	30	1,70	5,15	6,05	2,923	3678,098	0,795
		V1_30_H3_T2-90_3	41	E	40,52	30	1,87	5,18	6,04	3,047	3671,112	0,830
		V1_30_H3_T2-90_4	34	E	40,48	30	1,98	5,10	5,98	3,047	3631,056	0,839
		V1_30_H3_T2-90_5	30	E	40,29	30	1,89	4,90	5,67	2,891	3426,665	0,844
		V1_30_H3_T2-90_6	17	E	40,79	30	2,03	4,86	5,66	2,967	3463,071	0,857
		V1_30_H3_T2-90_7	6	E	40,45	30	2,04	5,04	6,02	2,983	3652,635	0,817
		V1_30_H3_T2-90_8	39	E	40,32	30	1,88	5,24	6,09	2,996	3683,232	0,813
		V1_30_H3_T2-90_9	31	E	40,43	30	1,87	5,02	5,99	2,957	3632,636	0,814
		V1_30_H3_T2-90_10	50	E	41,09	30	1,67	4,99	6,08	2,821	3747,408	0,753
		V1_30_H3_T2-90_11	36	E	40,64	30	1,97	5,03	5,89	3,062	3590,544	0,853
		V1_30_H3_T2-90_12	33	E	40,60	30	1,66	5,17	6,11	2,950	3720,990	0,793
		V1_30_H3_T2-90_13	9	E	40,39	30	1,79	5,06	5,62	3,103	3404,877	0,911
		V1a_30_H3_T2-90_1	139	E	40,38	30	1,76	5,22	6,01	3,031	3640,257	0,833
		V1a_30_H3_T2-90_2	138	E	40,49	30	1,81	5,08	6,01	3,018	3650,174	0,827
		V1a_30_H3_T2-90_3	141	E	40,33	30	1,95	4,91	5,64	2,833	3411,918	0,830
		V1a_30_H3_T2-90_4	132	E	40,48	30	1,71	5,08	6,03	2,919	3661,416	0,797
		V1a_30_H3_T2-90_5	239	E	40,43	30	1,54	5,21	6,03	2,806	3656,894	0,767
		V1a_30_H3_T2-90_6	235	E	40,82	30	1,39	5,17	6,24	3,000	3820,752	0,785
		V1a_30_H3_T2-90_7	234	E	40,67	30	1,84	5,05	6,07	3,185	3703,004	0,860
		V1a_30_H3_T2-90_8	232	E	40,48	30	1,33	5,06	6,04	3,002	3667,488	0,819

#### 4.2.3 Geometrie der Prüfkörper

Jeder Prüfkörper besteht aus einem Bauteil, einer Dolle und einem Keil. Hierbei wird der Keil in die Nut eingebbracht. Es entsteht die Holzkeildolle als Verbindungsmitte zwischen den Bauteilen. Die allgemeinen geometrischen Parameter sind im Abschnitt 4.1 zu finden. Die Fertigungsmaße und der Aufbau der Prüfkörper sind in der Tabelle 4-7 und der Abbildung 4-1 zu finden. Spezifische geometrischen Angaben sind in der Tabelle 4-1 bis Tabelle 4-3 für  $d_D = 20\text{mm}$  und Tabelle 4-4 bis Tabelle 4-6 für  $d_D = 30\text{mm}$  aufgeführt.

Für die Prüfungsserie V1 wurde eine spezielle Unterserie V1a vorbereitet. Dabei erhielten die Prüfkörper eine gewollte Abweichung in Nutbreite und Keilbreite, um die evtl. Auswirkungen in den Prüfungsergebnissen zu beobachten. Für beide Dollendurchmesser besitzen die Prüfkörper V1a\_1 bis V1a\_4 eine breite Keilspitze ( $t_{K,1,mean} > 1\text{mm}$ ) in einer schmalen Nut ( $t_N < 2\text{mm}$ ) und die Prüfkörper V1a\_5 bis V1a\_8 besitzen eine schmale Keilspitze ( $t_{K,1,mean} \cong 0\text{mm}$ ) in einer breiten Nut ( $t_N \geq 2\text{mm}$ ).

Eine wichtige Beobachtung, die die Maße der Prüfkörper und seine Komponenten betrifft, ist, dass in 14 von 21 Prüfkörpern mit  $d_D = 30\text{mm}$  und Holzkombination H3 die Bohrlöcher im Bauteil eine Abweichung von  $\Delta_{b_{B,LOCH}} = 0,7\%$  von dem Regelmaß  $d_{B,LOCH} = 30\text{mm}$  aufweisen. Die Dollen gekennzeichnet mit zwei Sternzeichen (\*\*) in der Tabelle 4-9 sind in dem Schritt 0 (vgl. 4.2.4) im Bohrloch nicht kraftschlüssig verbaut. Es besteht aufgrund der schlechten Fertigung kein Kontakt zwischen der Dolle im Bohrloch und der Bohrlochwandung, daher sind sie leicht herauszuziehen.

**Tabelle 4-7 Geometrische festgelegte Parameter und Holzarten für die V1**

	Holzart	$d_D = 20\text{mm}$	$d_D = 30\text{mm}$
		Maße	Maße
Bauteil	Fichte C24, Eiche D30	$(b_B \times h_B \times l_B) = 120 \times 60 \times 220 \text{ mm}^3$	$(b_B \times h_B \times l_B) = 180 \times 60 \times 220 \text{ mm}^3$
Bohrloch	-	$d_{B,LOCH} = d_D = 20 \text{ mm}$ (rund)	$d_{B,LOCH} = d_D = 30 \text{ mm}$ (rund)
Dolle	Eiche D30 Esche D30	$d_D = 20 \text{ mm}$ $l_D = 500 \text{ mm}$	$d_D = 30 \text{ mm}$ $l_D = 500 \text{ mm}$
Nut	-	$t_N = 2 \text{ mm}$ $l_{N,1} = 30 \text{ mm}$	$t_N = 2 \text{ mm}$ $l_{N,1} = 30 \text{ mm}$
Keil	Eiche D30	$b_K = d_D = 20\text{mm}$ $t_{K,1} \cong 0\text{mm}$ $\alpha_{K,S} = 8^\circ - 10^\circ$ $l_K = 30 + 10\text{mm} = 40\text{mm}$	$b_K = d_D = 30\text{mm}$ $t_{K,1} \cong 0\text{mm}$ $\alpha_{K,S} = 8^\circ - 10^\circ$ $l_K = 30 + 10\text{mm} = 40\text{mm}$

#### 4.2.4 Methode

In der Versuchsserie V1 wird die Verbindung mittels Holzkeildolle in axialer Zugbeanspruchung getestet.

Die Zugprüfung ist mit einer universalen mechanischen Prüfmaschine mit einer weggesteuerten Prüfung (Geschwindigkeit  $v = 0,05 \text{ mm/s}$ ) durchgeführt. Abbruchkriterien sind (a) Verschiebung der Holzkeildolle im Bohrloch bis  $\varepsilon = 35\text{mm}$  oder (b) das Erreichen einer Last (nach Versagen) von  $F_{exp} \leq 1,5 \text{ kN}$  oder (c) Zugversagen parallel zur Faser der Dolle.

Für die Messung der Verschiebung der Holzkeildolle im Bohrloch des Bauteils wurde ein induktiver Wegaufnehmer zwischen der unteren Bauteiloberfläche (auf S1) und der Dolle installiert (vgl. Abbildung 4-3 und Abbildung 3-9).

Methode der Einbau und Prüfung:

- (Schritt 0): Vor dem Test erfolgt das Einbringen der Dolle in das Bohrloch der zu verbindenden Bauteile. Die Maße der gespreizten Nut nach dem Einbringen der Dolle in das Bauteil sind in der Tabelle 4-8 (für  $d_D = 20 \text{ mm}$ ) und in der Tabelle 4-9 (für  $d_D = 30 \text{ mm}$ ) zu finden.
- (Schritt 1): Manuelles Eintreiben des Keils in die Nut (mit Hammerschlag) bis zu einer Eindringtiefe in die Nut  $E.T_{S1,max} \leq 30\text{mm}$  ( $E.T_{S1,max} = l_N$ ). Drei Kontrolllinien auf dem Keil führen zu der richtigen Einbautiefe. Die Eindringtiefe (E.T.) ist in der Tabelle 4-8 (für  $d_D = 20\text{mm}$ ) und in der Tabelle 4-9 (für  $d_D = 30\text{mm}$ ) aufgeführt.

- (Schritt 2): Der Prüfkörper ist in der Prüfmaschine positioniert. Die Dolle ist zwischen den Stahlbacken für die Applikation der Zugkraft eingespannt. Das Ausziehen der Holzkeildolle (vgl. Abbildung 4-3) wird bis zum definierten Abbruchkriterium (a), (b) oder (c) vorgenommen.

#### 4.2.5 Prüfergebnisse

##### *Versagensarten*

Die Versagensarten in der Versuchsreihe V1 bestätigten die Versagensarten für die schon beobachteten TV2. Ein Überblick wird in Abschnitt 3.5.5 gegeben.

##### *Rissverhalten*

Das Rissverhalten wurde nach der Installation des Keils (Schritt 1) und nach der Prüfung (Schritt 2) überprüft. Die Ergebnisse des allgemeinen Rissverhaltens sind in der TV2 beobachtet und für diese Versuchsreihe bestätigt worden. Ein Überblick findet sich in Abschnitt 3.5.5.

Eine Zusammenfassung des Rissverhaltens der einzelnen Prüfkörper ist in der Tabelle 4-8 (für  $d_D = 20\text{mm}$ ) und der Tabelle 4-9 ( $d_D = 30\text{mm}$ ) aufgeführt.

Ein neues interessantes Phänomen unter dem Gesichtspunkt der Ausführung einer Reparaturverbindung mit HKD wurde bei den getesteten Prüfkörper mit Dollendurchmesser  $d_D = 30\text{mm}$  beobachtet. Hier, nach dem Schritt 1, Eintreiben des Keils, wurde in vielen Fällen die Ausbildung eines Querzug-Risses, sowohl auf S aber auch auf S\* beobachtet. Nach dem Schritt 2 (Zugprüfung) zeigte sich dieser Riss in 38% der Fälle vergrößert. Dies war für einige Prüfkörper der Holzkombination H1 (vgl. Abbildung 4-4) sogar durchdringlich im Querschnitt. Dieses Phänomen steht in direkter Abhängigkeit mit der Position des Bohrloches in dem Querschnitt und dem Querschnitt selbst. In der Versuchsreihe V1 wurde ein halbierter Vollholz-Querschnitt mit Markröhre getestet. Das mittige Einbringen des Bohrloches in den Bauteilquerschnitt erfolgte im Bereich der Markröhre, die durch die Einführung des Keils eine Spaltzugbeanspruchung erfahren hat. Da Nadelhölzer im Kernbereich die niedrigsten mechanischen Eigenschaften auf Zug quer zur Faser aufweisen, zeigt sich eine frühe Rissbildung und ein erweiterter Riss nach der Prüfung. Bei Reparatur mittels einer Blattverbindung kann die zuvor beschriebene Konstellation zu einem frühzeitigen Aufreißen des Bauteils im Bereich der Holzkeildolle führen. Empfohlen wäre der Einbau einer Reparaturverbindung mit zwei distanzierten Verbindungsmitteln mit kleinerem Durchmesser anstatt nur eines mittig im Querschnitt angeordneten Verbindungsmittels.

Verschiedene Prüfkörper, überwiegend in der Serie mit  $d_D = 30\text{mm}$  und V1a, weisen in 33% der Fälle Risse im Nutboden auf. Davon sind H1 und H3 mit einer Wahrscheinlichkeit einer Rissbildung im Nutboden von 50% am meisten betroffen. Die H2 zeigt dagegen eine Wahrscheinlichkeit von 0%. In der Serie  $d_D = 20\text{mm}$  wurde dagegen eine Stauchung des Keils ohne Rissbildung des Nutbodens beobachtet. Einige Beispiele sind in der Abbildung 4-5 dargestellt.

Tabelle 4-8 Breite der Nut vor und nach dem Einbau des Keils und Eindringtiefe E.T. des Keils für  $d_D = 20\text{mm}$ .

Durch- messer	Holz- kombi- nation	Prüfkörper	Dolle Nr.	Keil Nr.	Schritt 0		Schritt 1			Schritt 2	
					$b'_{N,mean}$ [mm]	$b''_{N,mean}$ [mm]	S* Riss	S Riss	Kommentare	E.T [mm]	Kommentare
H1	20	V1_20_H1_T2-90_1	43	51	2,31	5,27				31,5	
		V1_20_H1_T2-90_2	12	24	2,56	5,55				33,0	Stauchung K
		V1_20_H1_T2-90_3	40	4	2,19	5,44				32,5	Abriss Nutboden (kein R)
		V1_20_H1_T2-90_4	24	36	2,34	6,08				32,0	
		V1_20_H1_T2-90_5	2	7	2,50	5,93				31,5	
		V1_20_H1_T2-90_6	37	23	2,25	6,45				28,0	
		V1_20_H1_T2-90_7	27	39	2,53	5,96				33,0	
		V1_20_H1_T2-90_8	22	29	2,46	6,73				29,0	
		V1_20_H1_T2-90_9	33	30	2,12	6,88				33,0	
		V1_20_H1_T2-90_10	3	45	2,13	5,97				30,5	
		V1_20_H1_T2-90_11	16	13	2,69	5,97				35,0	
		V1_20_H1_T2-90_12	1	11	2,31	7,94				29,0	
		V1_20_H1_T2-90_13	21	25	2,23	5,42				30,0	
		V1a_20_H1_T2-90_1	38	120	2,17	4,50				28,0	
		V1a_20_H1_T2-90_2	36	112	2,03	4,78				19,0	
		V1a_20_H1_T2-90_3	32	121	2,37	5,87				20,0	-
		V1a_20_H1_T2-90_4	13	113	2,08	6,31				35,0	
		V1a_20_H1_T2-90_5	26	221	2,90	6,37				31,0	
		V1a_20_H1_T2-90_6	39	217	3,13	4,52				35,0	
		V1a_20_H1_T2-90_7	34	224	3,25	5,77				30,0	Stauchung K
		V1a_20_H1_T2-90_8	28	223	2,86	5,50				35,0	
H2	20	V1_20_H2_T2-90_1	18	34	1,94	6,58	R	verbreitete R	26,0	-	
		V1_20_H2_T2-90_2	29	32	2,08	5,89	R	verbreitete R	21,5	Druck Keil auf B.loch -	
		V1_20_H2_T2-90_3	31	47	2,15	6,17	R	R	27,0	größere R -	
		V1_20_H2_T2-90_4	23	35	2,11	6,09	R	verbreitete R	10,0	größere R	
		V1_20_H2_T2-90_5	20	53	1,83	6,27	R	R	10,0	Abplatzung Bauteil S*	
		V1_20_H2_T2-90_6	17	9	2,40	6,13			32,0	Abplatz. Nutboden	
		V1_20_H2_T2-90_7	6	63	2,19	4,80			22,0	Abplatzung Bauteil S*	
		V1_20_H2_T2-90_8	9	61	1,84	5,48	R	verbreitete R	34,0	größere R + Abplatzung Bauteil S*	
		V1_20_H2_T2-90_9	14	17	1,96	5,33	R	r	19,5	verbreitete R + Mikro R auf S	
		V1_20_H2_T2-90_10	30	24	1,90	6,34			32,5		
		V1_20_H2_T2-90_11	35	1	2,25	5,66	R	R	30,0		
		V1_20_H2_T2-90_12	15	54	2,02	6,57			30,0	Druck Keil auf B.loch	
		V1_20_H2_T2-90_13	41	15	1,84	6,12	R	verbreitete R	23,0	Druck Keil auf B.loch	
		V1a_20_H2_T2-90_1	10	125	1,98	5,85			28,0	-	
		V1a_20_H2_T2-90_2	5	110	2,27	6,39			20,0		
		V1a_20_H2_T2-90_3	11	124	2,04	6,46			26,0		
		V1a_20_H2_T2-90_4	19	111	2,27	5,96			20,0		
		V1a_20_H2_T2-90_5	7	220	2,59	5,97	R	verbreitete R	35,0		
		V1a_20_H2_T2-90_6	25	212	2,78	5,82	R	verbreitete R	23,5		
		V1a_20_H2_T2-90_7	4	210	2,45	6,13	R	verbreitete R	35,0	Stauchung K	
		V1a_20_H2_T2-90_8	8	222	2,64	5,75	R	R	35,0		
H3	20	V1_20_H3_T2-90_1	s11	31	2,42	5,80			32,0	-	
		V1_20_H3_T2-90_2	s12	37	1,98	5,57			20,0	-	
		V1_20_H3_T2-90_3	s1	28	2,46	6,36			33,0	-	
		V1_20_H3_T2-90_4	s2	57	3,27	7,05			27,0		
		V1_20_H3_T2-90_5	s14	21	2,08	6,98	R	R	30,0		
		V1_20_H3_T2-90_6	s6	41	2,02	5,42			28,0		
		V1_20_H3_T2-90_7	s18	6	2,14	5,56			30,0		
		V1_20_H3_T2-90_8	s21	12	2,02	6,26			25,0		
		V1_20_H3_T2-90_9	s10	62	2,00	6,05			10,0		
		V1_20_H3_T2-90_10	s8	60	2,15	4,75			28,0		
		V1_20_H3_T2-90_11	s16	14	2,16	6,01			35,0		
		V1_20_H3_T2-90_12	s4	50	2,23	5,97			30,0		
		V1_20_H3_T2-90_13	s3	52	1,53	5,29	R		23,0	R -	
		V1a_20_H3_T2-90_1	s7	123	1,86	5,69			28,0	-	
		V1a_20_H3_T2-90_2	s17	116	1,92	6,04			34,0	1 R im Nutboden	
		V1a_20_H3_T2-90_3	s9	119	2,09	6,13			26,5	-	
		V1a_20_H3_T2-90_4	s22	122	1,94	4,19			20,0		
		V1a_20_H3_T2-90_5	s19	225	2,73	5,76			29,0		
		V1a_20_H3_T2-90_6	s5	211	2,89	6,50			35,0		
		V1a_20_H3_T2-90_7	s23	218	2,88	5,12			31,0		
		V1a_20_H3_T2-90_8	s15	219	2,57	4,00	R	R über B.loch	10,0		

**Tabelle 4-9 Breite der Nut vor und nach dem Einbau des Keils und Eindringtiefe E.T. des Keils für  $d_D = 30\text{mm}$ . Die mit \*\* kennzeichneten Dolle lassen sich in dem Schritt 0 leicht herausnehmen.**

Durch-mes-ser	Holz-kombi-nation	Prüfkörper	Dolle Nr.	Keil Nr.	Schritt 0				Schritt 1			Schritt 2	
					b' N_mean [mm]	b'' N_mean [mm]	S* Riss	S Riss	Kommentare	E.T [mm]	Kommentare		
30	H1	V1_30_H1_T2-90_1	6	16	2,32	6,06				28,0	1 Riss im Nutboden		
		V1_30_H1_T2-90_2	7	21	2,37	4,06				35,0			
		V1_30_H1_T2-90_3	35	10	2,23	5,54	R		durchgerissen	32,0	durchgerissen		
		V1_30_H1_T2-90_4	36	22	2,41	5,25		R	R Ast	30,0	Riss Ast – Stauchung K		
		V1_30_H1_T2-90_5	2	44	2,21	5,67	R		Dünne R	32,5	größere R		
		V1_30_H1_T2-90_6	4	42	2,40	5,80			R	30,0	Durchgerissen -		
		V1_30_H1_T2-90_7	3	14	2,39	4,97			versteckte R?	31,0	2 R Nutboden		
		V1_30_H1_T2-90_8	8	32	2,66	5,25			versteckte R?	26,5	durchgerissen + 1 R Nutboden		
		V1_30_H1_T2-90_9	39	46	2,46	5,76			versteckte R?	31,5	2 R Nutboden		
		V1_30_H1_T2-90_10	1	5	2,34	5,24				31,5	versteckte R?		
		V1_30_H1_T2-90_11	33	28	2,30	5,37		R	R über Markrohr	31,0	größere R		
		V1_30_H1_T2-90_12	10	12	2,49	5,32		R	R Ast	33,0			
		V1_30_H1_T2-90_13	34**	43	2,40	5,28			Seitliche R	33,5			
		V1a_30_H1_T2-90_1	11	240	2,27	4,81	R	R	durchgerissen	28,0	Durchgerissen – Sehr lange R Nutboden		
		V1a_30_H1_T2-90_2	20	135	2,20	4,96	R	R	R Ast	20,0			
		V1a_30_H1_T2-90_3	30	137	2,19	5,08		R	R Ast + seitl. R	29,0	größere R		
		V1a_30_H1_T2-90_4	19**	136	2,15	5,33		R	R Durchgängig	33,0	größere R – R Nutboden		
		V1a_30_H1_T2-90_5	21	230	2,57	5,43	R	R	leicht R über Markrohr	30,5	größere R – R Nutboden		
		V1a_30_H1_T2-90_6	43	241	2,56	5,46	R	R	2 R auf S ü Markrohr + R	30,0	größere R		
		V1a_30_H1_T2-90_7	6**	235	2,36	6,10	R	R	R über Markrohr + Ast	32,0	größere R		
		V1a_30_H1_T2-90_8	25	231	2,79	5,44		R	R auf S über Markrohr	31,0	größere R – R Nutboden		
	H2	V1_30_H2_T2-90_1	23	29	2,48	5,15				28,0	-		
		V1_30_H2_T2-90_2	27	15	2,43	4,30	R	R	verbreitete R	22,0			
		V1_30_H2_T2-90_3	29	13	2,51	4,98	R	R	verbreitete R	25,0	größere R		
		V1_30_H2_T2-90_4	22	8	2,35	4,78	R		verbreitete R	25,0			
		V1_30_H2_T2-90_5	27	4	2,44	4,34	R		verbreitete R	22,5	größere R -		
		V1_30_H2_T2-90_6	32	27	1,93	3,69		R	verbreitete R	19,0	größere R -		
		V1_30_H2_T2-90_7	40	3	2,65	6,00			verbreitete R auf S	25,0	-		
		V1_30_H2_T2-90_8	12	2	2,47	4,08			Seitliche tiefe kurze R	24,0	-		
		V1_30_H2_T2-90_9	42	48	2,59	5,32		R	verbreitete R	21,0	Wegaufn. kaputt		
		V1_30_H2_T2-90_10	31	25	2,61	5,72	R		verbreitete mikro R	28,0			
		V1_30_H2_T2-90_11	24	20	2,82	5,31				30,0	2 R Nutboden		
		V1_30_H2_T2-90_12	16	19	2,16	3,75			Seitliche tiefe kurze R auf S*	13,0			
		V1_30_H2_T2-90_13	13	23	2,27	4,38	R	R	R Ast auf S + Mikro R	20,0	größere R		
		V1a_30_H2_T2-90_1	28	133	2,10	4,19				29,0			
		V1a_30_H2_T2-90_2	5	130	2,06	5,09	R		verbreitete R auf S*	29,0	größere R		
		V1a_30_H2_T2-90_3	14	134	2,02	4,28		R	verbreitete R auf S	30,5	größere R		
		V1a_30_H2_T2-90_4	15	131	1,97	4,01		R	verbreitete R + R Ast	18,0	größere R		
		V1a_30_H2_T2-90_5	38	238	2,85	6,58			Seitliche R	23,0			
		V1a_30_H2_T2-90_6	18	240	2,56	5,04		R	verbreitete R + kaputte Keil	32,0			
		V1a_30_H2_T2-90_7	41	237	2,57	5,41		R	R Bohrloch	32,0	größere R		
		V1a_30_H2_T2-90_8	37	234	2,61	5,07			Seitliche R	28,5			
H3	H3	V1_30_H3_T2-90_1	s14	16	1,75	4,78			Kaputte keil	35,0	Abplatzung Bauteil S*		
		V1_30_H3_T2-90_2	s2	7	2,00	2,76	R	R	3 R auf S über Markrohr	35,0	größere R		
		V1_30_H3_T2-90_3	s18	41	2,04	6,84		R	3 R auf S über Markrohr	35,0	größere R -		
		V1_30_H3_T2-90_4	s8**	34	2,20	5,34			kaputte keil	30,5			
		V1_30_H3_T2-90_5	s21**	30	2,11	5,79				31,0	2 R Nutboden		
		V1_30_H3_T2-90_6	s7**	17	2,13	6,06				32,0	1 R Nutboden		
		V1_30_H3_T2-90_7	s1**	6	2,39	6,96				33,0			
		V1_30_H3_T2-90_8	s22	39	2,12	6,00			kaputte keil	27,5	Druck Keil auf B.loch		
		V1_30_H3_T2-90_9	s3	31	2,00	4,73			kaputte Keil	27,0	-		
		V1_30_H3_T2-90_10	s13**	50	2,25	6,65		R	2 R 1 davon tangent B.loch	33,0	durchgerissen		
		V1_30_H3_T2-90_11	s6**	36	2,34	6,92	R	R	R Markrohr S	31,5	größere R		
		V1_30_H3_T2-90_12	s12**	33	2,10	7,52		R	R über Markrohr	33,5	größere R -		
		V1_30_H3_T2-90_13	s20**	9	2,03	6,44				31,5	größere R		
		V1a_30_H3_T2-90_1	s15**	139	2,20	5,23		R	2 R über Markrohr	35,0	größere R – Sehr lange R Nutboden		
		V1a_30_H3_T2-90_2	s19**	138	2,05	5,31		R	R ü Markrohr auf S + R Ast	32,0	größere R		
		V1a_30_H3_T2-90_3	s10**	141	2,08	5,56		R	R über Markrohr	32,5	2 R Nutboden		
		V1a_30_H3_T2-90_4	s17**	132	2,11	5,81		R	R über Markrohr + R Ast	31,5	2 R Nutboden		
		V1a_30_H3_T2-90_5	s16	239	2,32	5,54				32,0			
		V1a_30_H3_T2-90_6	s9**	235	2,63	7,03				31,0	1 R Nutbodenrech		
		V1a_30_H3_T2-90_7	s5	234	2,53	5,31				32,0	Beschäd. B.loch		
		V1a_30_H3_T2-90_8	s11**	232	2,67	5,45				32,0			

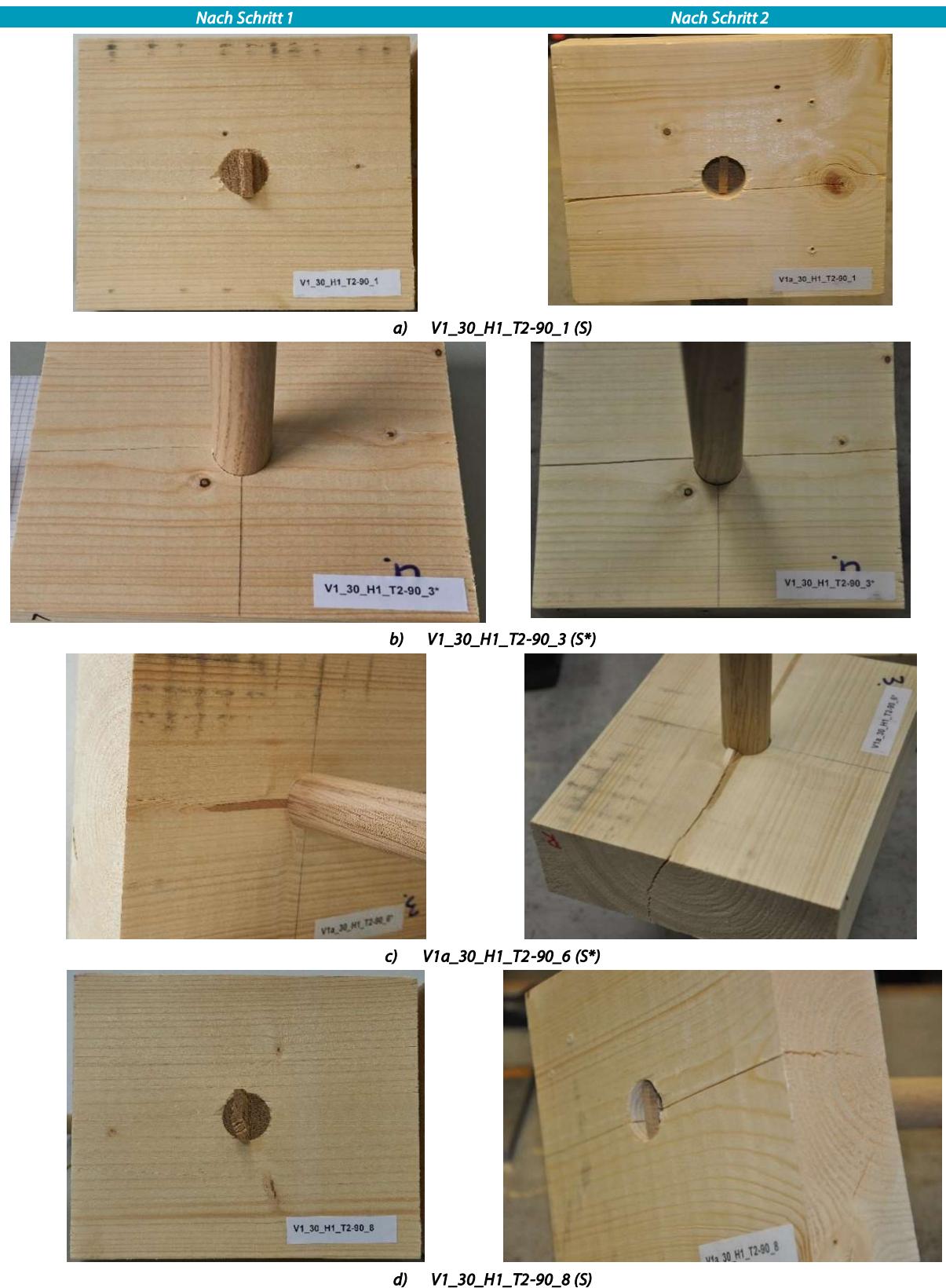
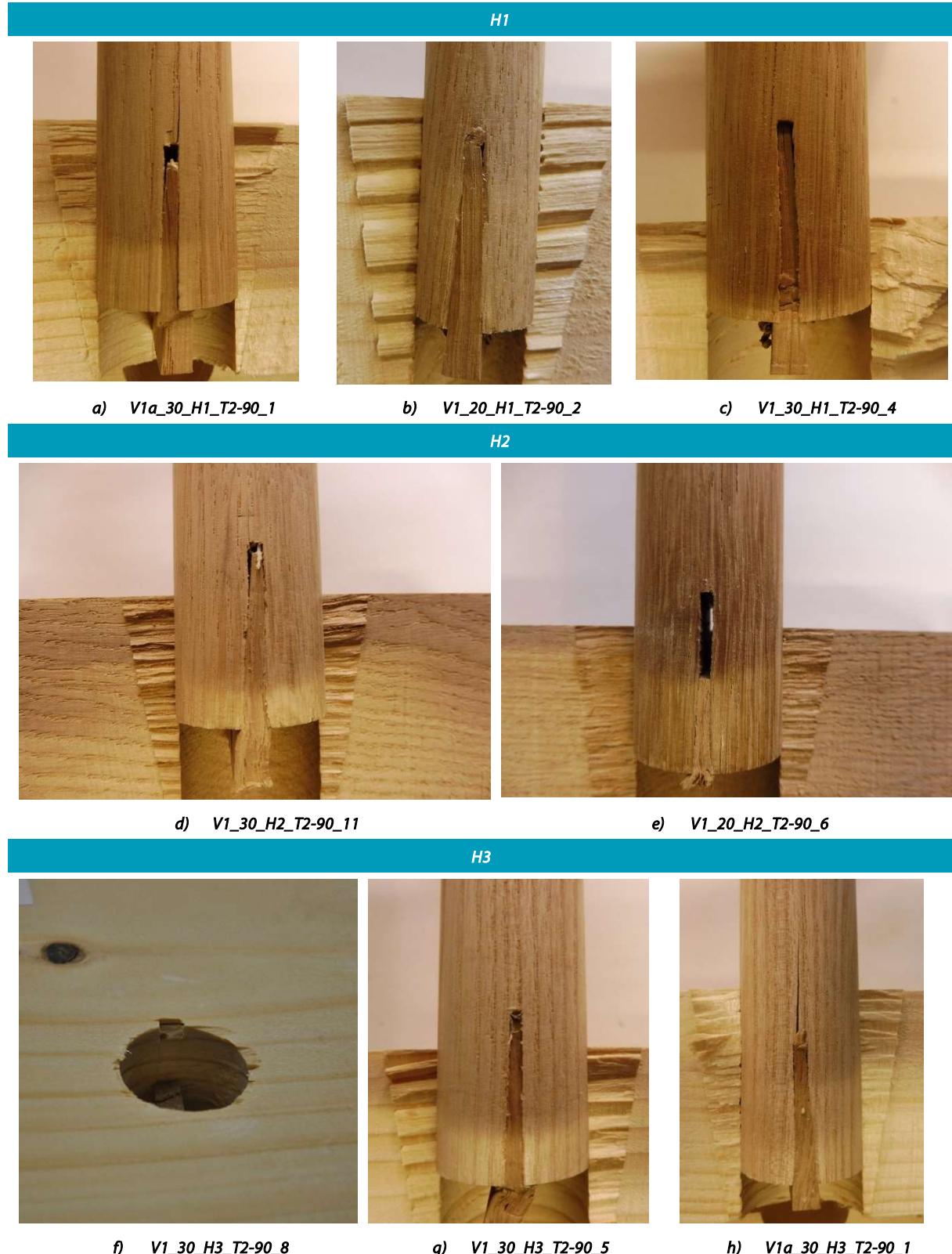


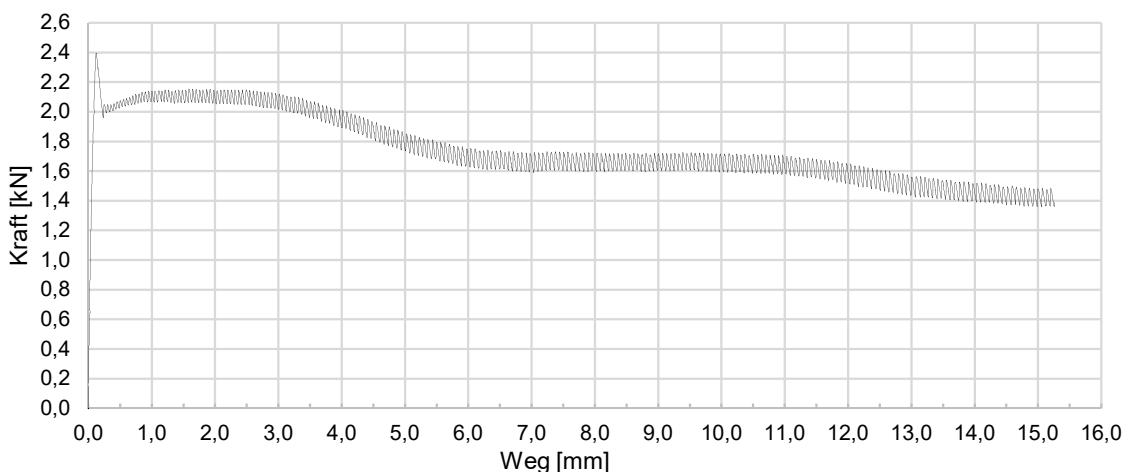
Abbildung 4-4 Rissverhalten der Prüfkörper a) V1\_30\_H1\_T2-90\_1; b) V1\_30\_H1\_T2-90\_3; c) V1a\_30\_H1\_T2-90\_6; d) V1\_30\_H1\_T2-90\_8



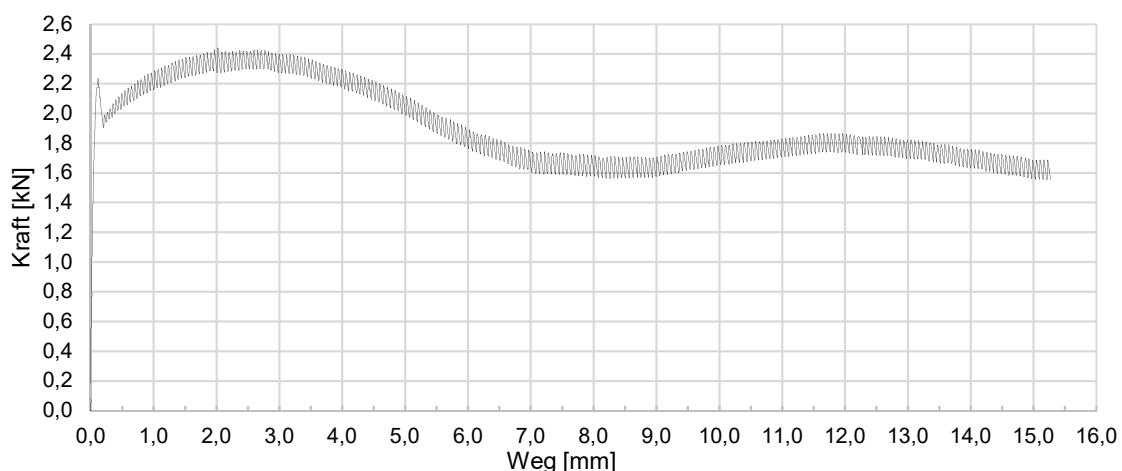
**Abbildung 4-5 Rissverhalten der Nutboden und des Bohrlochs in V1.** a) Langer Riss im Nutboden in der Serie V1a mit  $d_D = 30\text{mm}$ . b) und c) Stauchung des Keils ohne Konsequenz für den Nutboden in der Serie mit  $d_D = 20\text{mm}$ . d) Rissbildung im Nutboden (selten in den Prüfkörper mit H2; e), Niedrige E.T. des Keils. Der Prüfkörper zeigte eine Bruchlast der über den Mittelwert der Serie H2 mit  $d_D = 20\text{mm}$  liegt. f) Druck des Keils auf dem Bohrloch. g) 2 Risse im Nutboden. h) Langer Riss im Nutboden in der Serie V1a mit  $d_D = 30\text{mm}$ .

### Bruchlasten

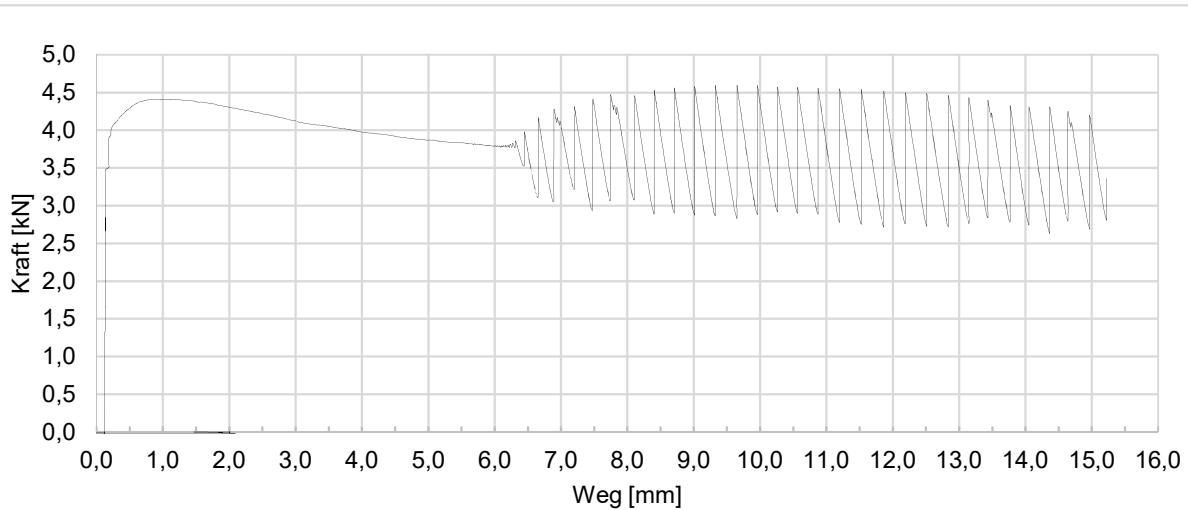
Die Ergebnisse der V1 fokussieren auf die Ermittlung von charakteristischen Werten der Tragfähigkeit der Holzkeildolle bei axialer Zugbeanspruchung. In Diagramm 4-1 und Diagramm 4-2 sind exemplarische Prüfergebnisse als Kraft-Weg-Diagramm dargestellt, deren prinzipieller Verlauf sich jedoch von dem bei TV2 beschriebenen – mit identischer Konstellation – unterscheidet. Es ist deutlich zu sehen, dass einige Prüfkörper erwartungsgemäß nach Erreichen des anfänglichen Lastmaximums eine kontinuierliche Abnahme der aufnehmbaren Last zeigen. Andererseits gibt es verbreitet eine Erholung der Lastkapazität und das Erreichen eines zweiten Lastmaximums innerhalb des Verformungsbereiches von 15 mm oder auch danach. Tendenziell am häufigsten wurde dieses Phänomen in der Holzkombination H3 beobachtet und hierbei in 48% der Versuche mit  $d_D = 20\text{mm}$  und in 32% der Versuche mit  $d_D = 30\text{mm}$ . Es zeigt sich eine Tendenz, dass mit Vergrößerung des Durchmessers eine geringere Lasterholung nach dem ersten Lastmaximum zu verzeichnen ist. Spezifisch wurde Folgendes beobachtet: in den Versuchen mit  $d_D = 20\text{mm}$  in 66% der Fälle von H1, 5% von H2 und 71% von H3, dagegen in den Versuchen mit  $d_D = 30\text{mm}$  in 14% der Fälle von H1, in 19% von H2 und 62% von H3. Die Zusammenfassung der Prüfergebnisse ist der folgenden Tabelle 4-10, der Tabelle 4-8 (für  $d_D = 20\text{mm}$ ) und der Tabelle 4-11 (für  $d_D = 30\text{mm}$ ) zu entnehmen.



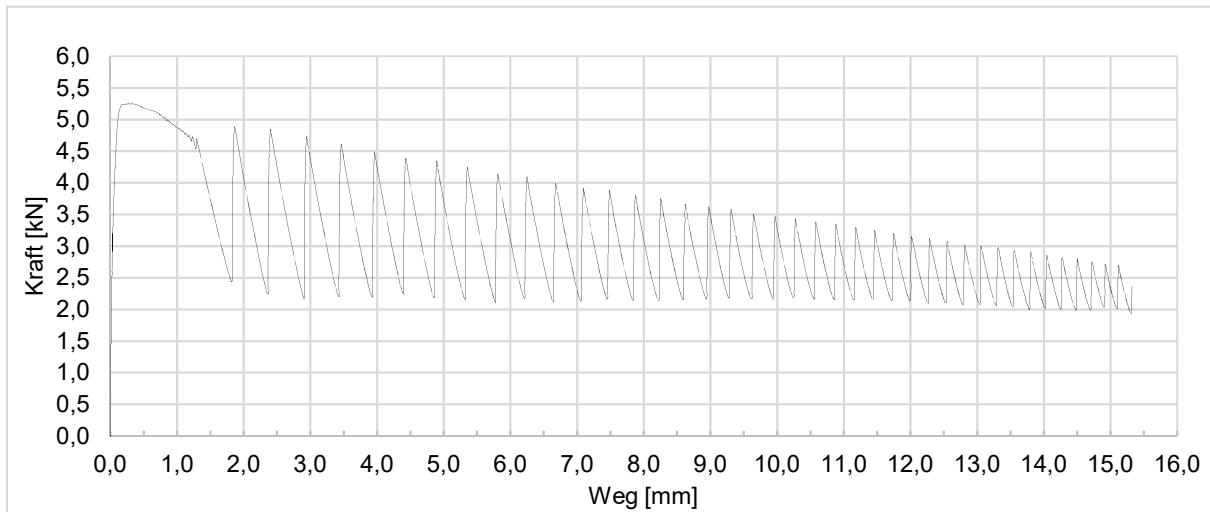
V1\_20\_H1\_T2-90\_1 (1 Peak)



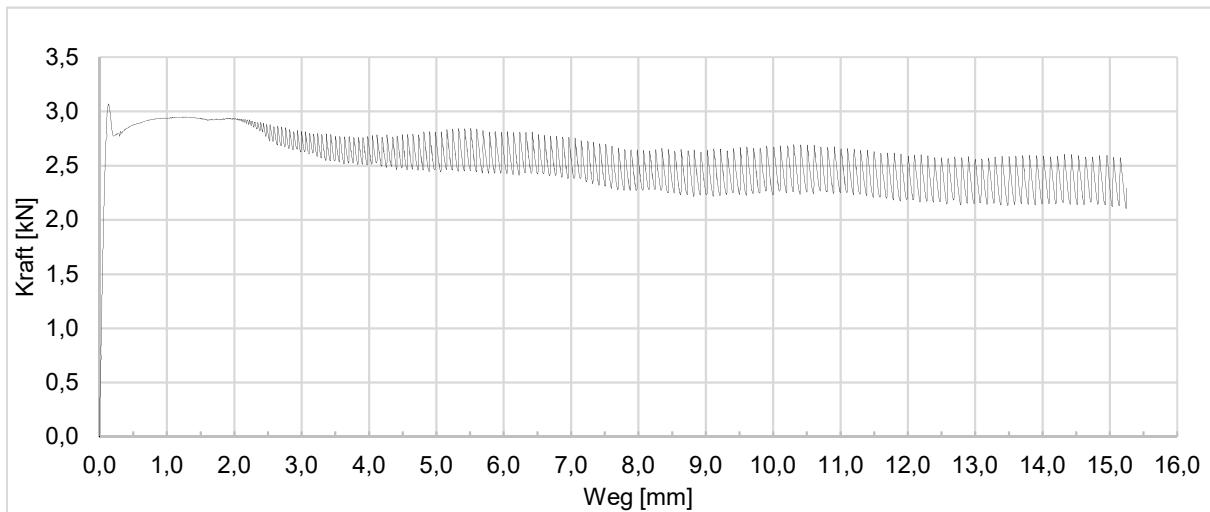
V1\_20\_H1\_T2-90\_2 (2 Peaks)



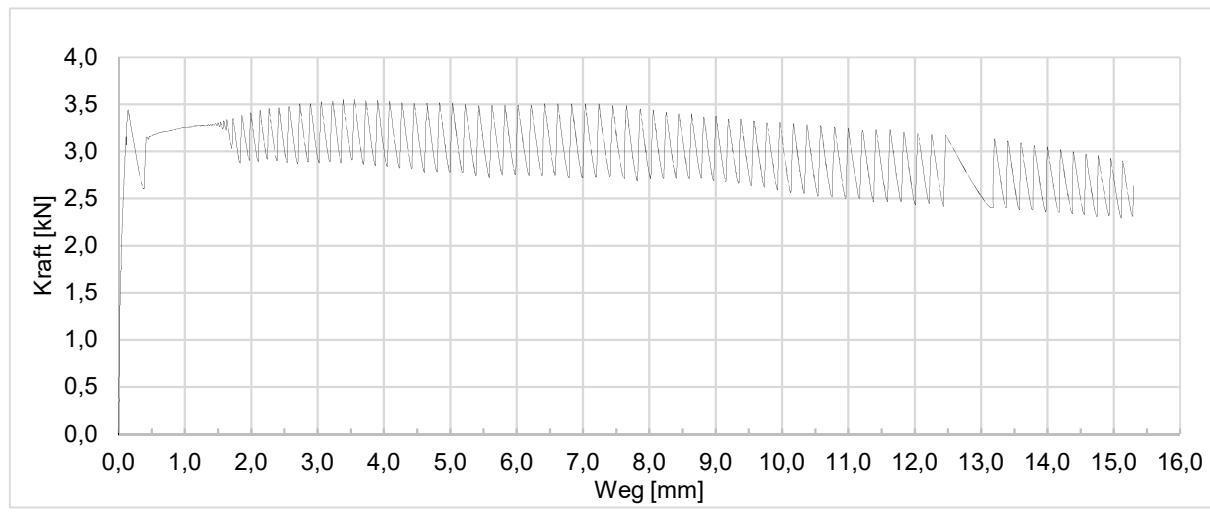
V1\_20\_H2\_T2\_90\_1 (2 Peaks)

**Fortsetzung**

V1\_20\_H2\_T2\_90\_5 (1 Peak)

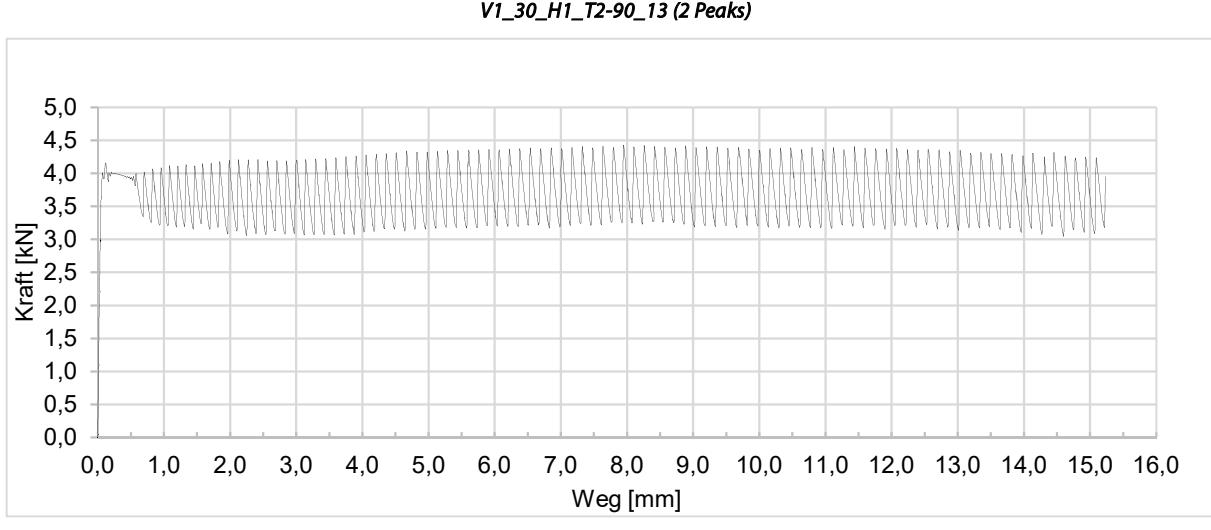
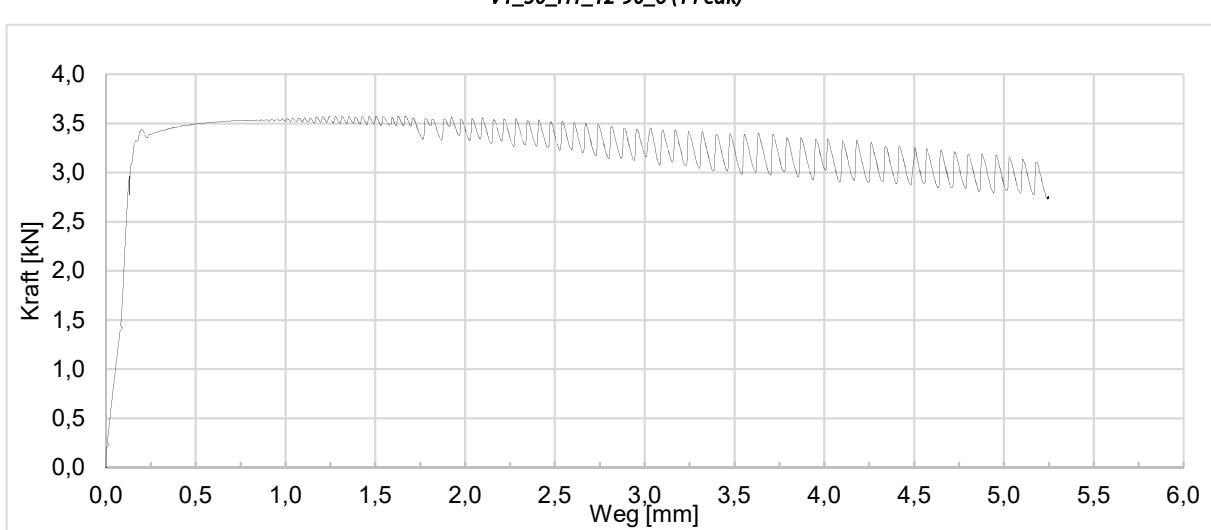
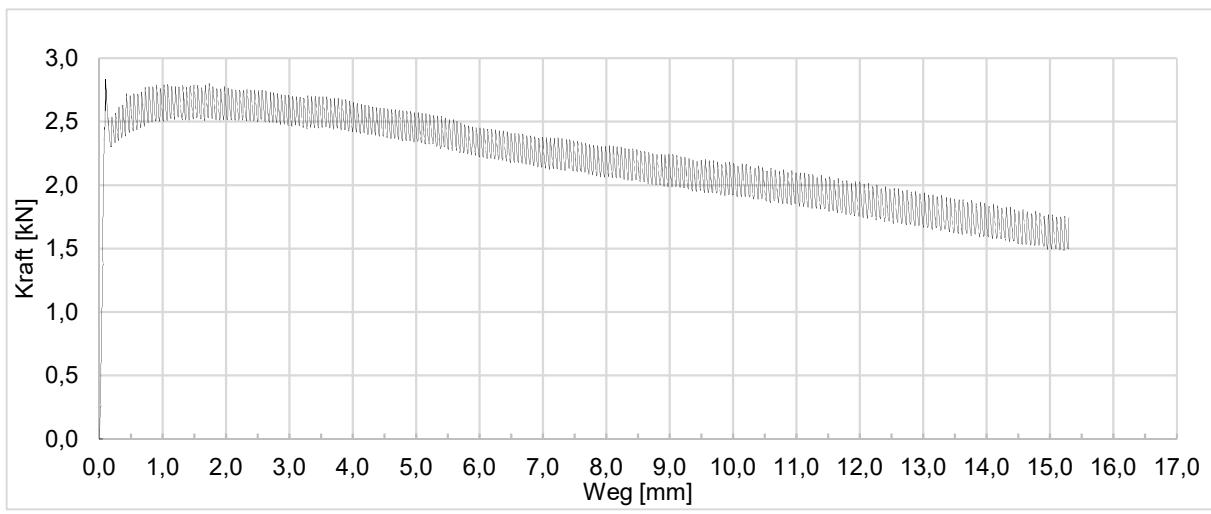


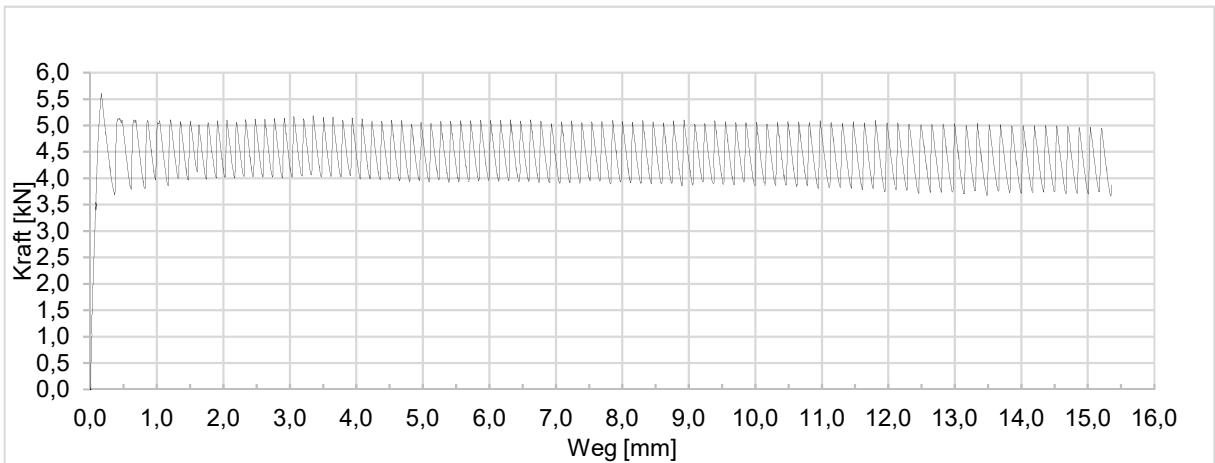
V1\_20\_H3\_T2\_90\_1 (1 Peak)



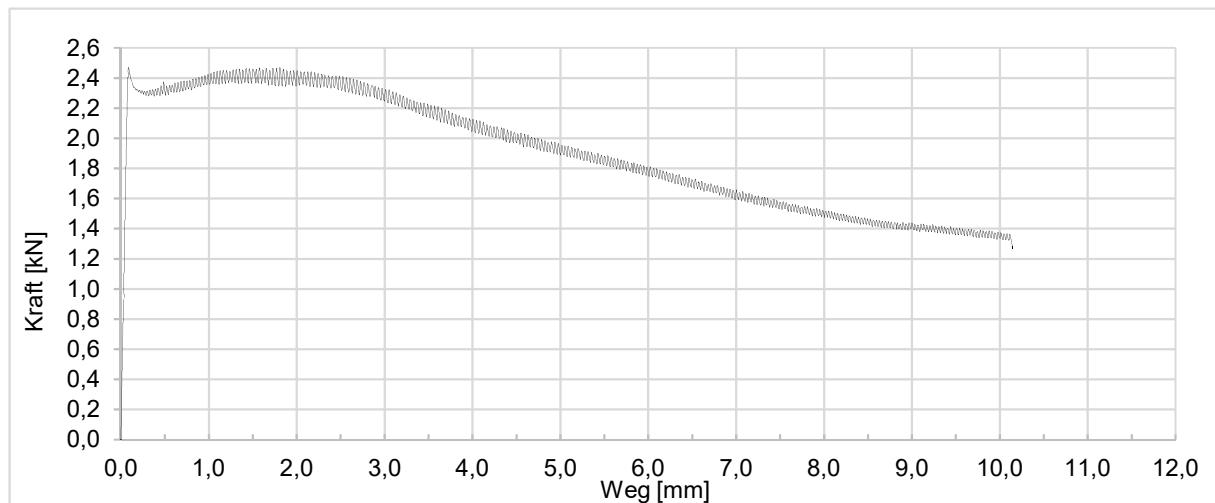
V1\_20\_H3\_T2\_90\_5 (2 Peaks)

Diagramm 4-1 Last-Verformungsdiagramme von V1 für  $d_D = 20\text{mm}$

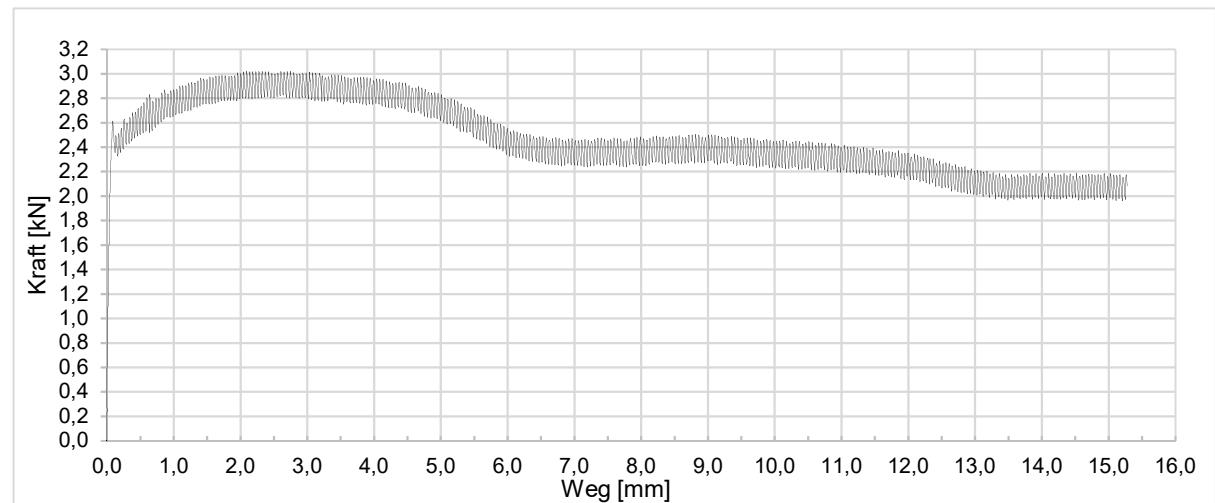


**Fortsetzung**

V1a\_30\_H2\_T2\_90\_3 (1 Peak)



V1\_30\_H3\_T2-90\_12 (1 Peak)



V1\_30\_H3\_T2-90\_8 (2 Peaks)

Diagramm 4-2 Last-Verformungsdiagramme von V1 für  $d_D = 30\text{cm}$

Tabelle 4-10 Prüfergebnisse der V1 für  $d_D = 20\text{mm}$ .

Durch- messer	Holz- kombi- nation	Prüfkörper	Dolle Nr.	Keil Nr.	Peak 1		Peak 2		Max Kraft  [kN]	$F_{\max, \text{mean}(\text{Peak})}$ [kN]
					(x)	(y) [kN]	(x)	(y) [kN]		
20	H1	V1_20_H1_T2-90_1	43	51	0,12	2,39			2,39	2,84
		V1_20_H1_T2-90_2	12	24	0,11	2,23	2,02	2,44	2,44	
		V1_20_H1_T2-90_3	40	4	0,24	2,56	3,15	2,66	2,66	
		V1_20_H1_T2-90_4	24	36	3,1	3,46			3,46	
		V1_20_H1_T2-90_5	2	7	0,14	2,21	4,53	2,50	2,50	
		V1_20_H1_T2-90_6	37	23	0,07	1,50	2,48	1,77	1,77	
		V1_20_H1_T2-90_7	27	39	0,14	2,67	2,12	2,88	2,88	
		V1_20_H1_T2-90_8	22	29	0,11	2,17	2,42	2,41	2,41	
		V1_20_H1_T2-90_9	33	30	0,09	1,99	2,52	2,16	2,16	
		V1_20_H1_T2-90_10	3	45	0,15	2,87	2,39	3,49	3,49	
		V1_20_H1_T2-90_11	16	13	0,10	1,45	4,14	1,74	1,74	
		V1_20_H1_T2-90_12	1	11	0,21	2,53	14,6	3,35	3,35	
		V1_20_H1_T2-90_13	21	25	0,09	2,50	2,46	2,77	2,77	
		V1a_20_H1_T2-90_1	38	120	0,08	3,78			3,78	
		V1a_20_H1_T2-90_2	36	112	0,14	2,76			2,76	
		V1a_20_H1_T2-90_3	32	121	0,36	4,88			4,88	
		V1a_20_H1_T2-90_4	13	113	0,41	4,45			4,45	
		V1a_20_H1_T2-90_5	26	221	0,13	3,28	0,80	3,35	3,35	
		V1a_20_H1_T2-90_6	39	217	0,07	3,28	1,19	3,40	3,40	
		V1a_20_H1_T2-90_7	34	224	0,17	3,51			3,51	
		V1a_20_H1_T2-90_8	28	223	0,13	3,13	0,84	3,22	3,22	
	H2	V1_20_H2_T2-90_1	18	34	0,77	4,41	9,52	4,59	4,59	5,67
		V1_20_H2_T2-90_2	29	32	0,40	6,06			6,06	
		V1_20_H2_T2-90_3	31	47	0,93	6,78			6,78	
		V1_20_H2_T2-90_4	23	35	0,66	5,27			5,27	
		V1_20_H2_T2-90_5	20	53	0,28	5,25			5,25	
		V1_20_H2_T2-90_6	17	9	0,44	5,70			5,70	
		V1_20_H2_T2-90_7	6	63	0,29	5,84			5,84	
		V1_20_H2_T2-90_8	9	61	0,34	5,21			5,21	
		V1_20_H2_T2-90_9	14	17	0,03	5,88			5,88	
		V1_20_H2_T2-90_10	30	24	0,39	6,44			6,44	
		V1_20_H2_T2-90_11	35	1	0,10	2,83			2,83	
		V1_20_H2_T2-90_12	15	54	0,47	6,66			6,66	
		V1_20_H2_T2-90_13	41	15	0,27	5,23			5,23	
		V1a_20_H2_T2-90_1	10	125	0,18	8,08			8,08	
		V1a_20_H2_T2-90_2	5	110	0,13	6,59			6,59	
		V1a_20_H2_T2-90_3	11	124	0,78	4,14			4,14	
		V1a_20_H2_T2-90_4	19	111	0,07	6,06			6,06	
		V1a_20_H2_T2-90_5	7	220	0,33	5,99			5,99	
		V1a_20_H2_T2-90_6	25	212	0,30	6,91			6,91	
		V1a_20_H2_T2-90_7	4	210	0,07	5,02			5,02	
		V1a_20_H2_T2-90_8	8	222	0,46	4,63			4,63	
	H3	V1_20_H3_T2-90_1	s11	31	0,14	3,07			3,07	2,73
		V1_20_H3_T2-90_2	s12	37	1,79	2,60			2,60	
		V1_20_H3_T2-90_3	s1	28	0,16	2,88	1,11	3,08	3,08	
		V1_20_H3_T2-90_4	s2	57	0,00	2,63			2,63	
		V1_20_H3_T2-90_5	s14	21	0,15	3,44	3,55	3,55	3,55	
		V1_20_H3_T2-90_6	s6	41	0,06	2,21	2,12	2,67	2,67	
		V1_20_H3_T2-90_7	s18	6	0,09	3,13	1,21	3,83	3,83	
		V1_20_H3_T2-90_8	s21	12	0,10	2,89	4,77	3,04	3,04	
		V1_20_H3_T2-90_9	s10	62	0,10	2,91	1,63	3,31	3,31	
		V1_20_H3_T2-90_10	s8	60	0,15	3,58	0,89	3,65	3,65	
		V1_20_H3_T2-90_11	s16	14	0,16	2,55	1,20	2,94	2,94	
		V1_20_H3_T2-90_12	s4	50	0,10	2,56	8,48	3,31	3,31	
		V1_20_H3_T2-90_13	s3	52	0,07	2,59	6,64	3,59	3,59	
		V1a_20_H3_T2-90_1	s7	123	0,11	3,16			3,16	
		V1a_20_H3_T2-90_2	s17	116	0,15	3,57	1,56	3,70	3,7	
		V1a_20_H3_T2-90_3	s9	119	0,11	1,99			1,99	
		V1a_20_H3_T2-90_4	s22	122	0,10	2,39	0,85	2,40	2,4	
		V1a_20_H3_T2-90_5	s19	225	0,19	3,23			3,23	
		V1a_20_H3_T2-90_6	s5	211	0,06	1,25	1,58	1,66	1,66	
		V1a_20_H3_T2-90_7	s23	218	1,68	1,78	15,41	2,15	2,15	
		V1a_20_H3_T2-90_8	s15	219	0,14	2,90	0,90	3,29	3,29	

Tabelle 4-11 Prüfergebnisse der V1 für  $d_D = 30mm$ .

Durch- messer	Holz- kombi- nation	Prüfkörper	Dolle Nr.	Keil Nr.	Peak 1		Peak 2		Max Kraft  [kN]	$F_{max,mean(Peak)}$ [kN]
					(x)	(y) [kN]	(x)	(y) [kN]		
30	H1	V1_30_H1_T2-90_1	6	16	1,92	4,42			4,42	3,92
		V1_30_H1_T2-90_2	7	21	2,6	5,02			5,02	
		V1_30_H1_T2-90_3	35	10	0,67	2,64			2,64	
		V1_30_H1_T2-90_4	36	22	0,09	3,75	7,33	3,93	3,93	
		V1_30_H1_T2-90_5	2	44	1,40	4,96			4,96	
		V1_30_H1_T2-90_6	4	42	0,10	2,83			2,83	
		V1_30_H1_T2-90_7	3	14	0,59	4,08			4,08	
		V1_30_H1_T2-90_8	8	32	1,54	3,71			3,71	
		V1_30_H1_T2-90_9	39	46	0,20	3,20	2,27	3,43	3,43	
		V1_30_H1_T2-90_10	1	5	2,45	5,15			5,15	
		V1_30_H1_T2-90_11	33	28	0,99	3,64			3,64	
		V1_30_H1_T2-90_12	10	12	0,10	3,04			3,04	
		V1_30_H1_T2-90_13	34**	43	0,20	3,44	1,47	3,57	3,57	
		V1a_30_H1_T2-90_1	11	240	0,43	3,29			3,29	
		V1a_30_H1_T2-90_2	20	135	0,02	3,90			3,9	
		V1a_30_H1_T2-90_3	30	137	0,15	3,63			3,63	
		V1a_30_H1_T2-90_4	19**	136	0,38	3,40			3,4	
		V1a_30_H1_T2-90_5	21	230	0,22	3,39			3,39	
		V1a_30_H1_T2-90_6	43	241	13,62	5,33			5,33	
		V1a_30_H1_T2-90_7	6**	235	9,62	3,10			3,10	
		V1a_30_H1_T2-90_8	25	231	0,70	6,41			6,41	
	H2	V1_30_H2_T2-90_1	23	29	0,12	6,50			6,50	5,71
		V1_30_H2_T2-90_2	27	15	0,01	4,49	5,20	4,63	4,63	
		V1_30_H2_T2-90_3	29	13	0,11	4,06			4,06	
		V1_30_H2_T2-90_4	22	8	0,08	3,78	7,14	3,97	3,97	
		V1_30_H2_T2-90_5	27	4	0,14	5,35			5,35	
		V1_30_H2_T2-90_6	32	27	0,00	7,78			7,78	
		V1_30_H2_T2-90_7	40	3	0,07	5,13			5,13	
		V1_30_H2_T2-90_8	12	2	0,04	4,70			4,70	
		V1_30_H2_T2-90_9	42	48	0,07	3,75			3,75	
		V1_30_H2_T2-90_10	31	25	0,07	4,17	5,07	4,24	4,24	
		V1_30_H2_T2-90_11	24	20	0,12	4,16	7,95	4,42	4,42	
		V1_30_H2_T2-90_12	16	19	0,23	10,46			10,46	
		V1_30_H2_T2-90_13	13	23	0,25	8,69			8,69	
		V1a_30_H2_T2-90_1	28	133	4,33	4,61			4,61	
		V1a_30_H2_T2-90_2	5	130	0,07	4,37			4,37	
		V1a_30_H2_T2-90_3	14	134	0,17	5,61			5,61	
		V1a_30_H2_T2-90_4	15	131	0,46	8,99			8,99	
		V1a_30_H2_T2-90_5	38	238	0,14	5,45			5,45	
		V1a_30_H2_T2-90_6	18	240	0,15	7,53	8,1	7,67	7,67	
		V1a_30_H2_T2-90_7	41	237	9,60	5,26			5,26	
		V1a_30_H2_T2-90_8	37	234	0,10	5,11			5,11	
	H3	V1_30_H3_T2-90_1	s14	16	0,41	3,36	10,15	4,32	4,32	3,34
		V1_30_H3_T2-90_2	s2	7	0,09	2,92	1,69	3,06	3,06	
		V1_30_H3_T2-90_3	s18	41	2,19	5,28			5,28	
		V1_30_H3_T2-90_4	s8**	34	0,34	3,30			3,3	
		V1_30_H3_T2-90_5	s21**	30	0,08	2,53	1,45	2,83	2,83	
		V1_30_H3_T2-90_6	s7**	17	0,16	2,96	8,66	3,83	3,83	
		V1_30_H3_T2-90_7	s1**	6	0,09	2,62	4,76	3,00	3,00	
		V1_30_H3_T2-90_8	s22	39	0,09	2,61	2,09	3,02	3,02	
		V1_30_H3_T2-90_9	s3	31	0,24	3,28	3,19	3,97	3,97	
		V1_30_H3_T2-90_10	s13**	50	2,41	2,66			2,66	
		V1_30_H3_T2-90_11	s6**	36	1,88	3,62			3,62	
		V1_30_H3_T2-90_12	s12**	33	0,09	2,47			2,47	
		V1_30_H3_T2-90_13	s20**	9	0,19	2,66	2,27	3,37	3,37	
		V1a_30_H3_T2-90_1	s15**	139	0,52	5,45			5,45	
		V1a_30_H3_T2-90_2	s19**	138	7,40	4,30			4,30	
		V1a_30_H3_T2-90_3	s10**	141	0,15	2,92	1,54	3,11	3,11	
		V1a_30_H3_T2-90_4	s17**	132	10,75	3,93			3,93	
		V1a_30_H3_T2-90_5	s16	239	0,21	2,77	3,07	3,21	3,21	
		V1a_30_H3_T2-90_6	s9**	235	2,53	3,80			3,80	
		V1a_30_H3_T2-90_7	s5	234	0,16	3,52	2,58	3,94	3,94	
		V1a_30_H3_T2-90_8	s11**	232	0,16	3,11	2,71	3,58	3,58	

**Bruchlasten**

Die tatsächliche Bruchlast in Abhängigkeit des Dollendurchmessers kann aus dem Diagramm 4-3 a), b), c) herausgelesen werden. Die mittlere Bruchlast für H1 und H3 tendiert bei einer Vergrößerung des Durchmessers der Holzkeildolle anzusteigen. Bei H2 tendiert die Bruchlast bei einer Vergrößerung des Durchmessers der Holzkeildolle eher abzunehmen.

Folgende mittlere Bruchlasten wurden für die drei Holzkombinationen ermittelt:

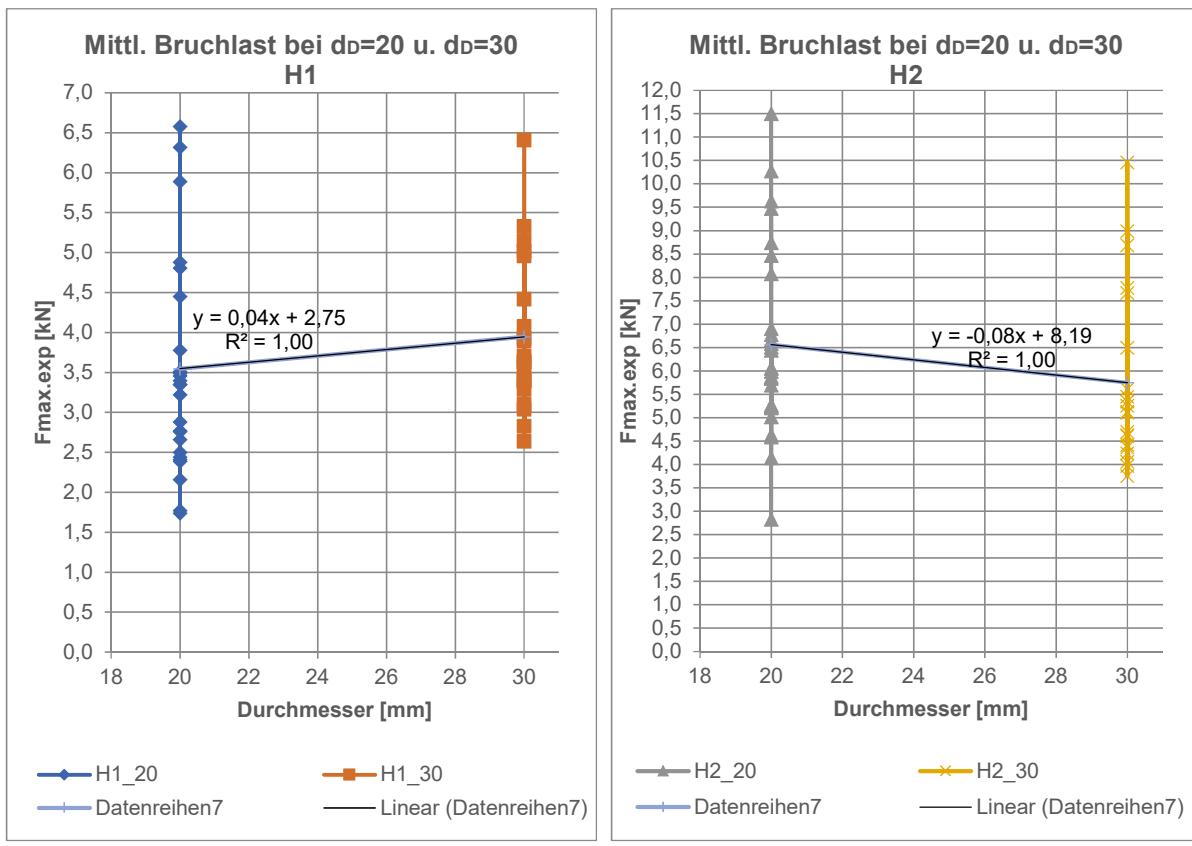
$$F_{max.H1} = 0,04 \cdot d_D + 2,75 \quad [kN] \quad \text{Gl. 11}$$

$$F_{max.H2} = -0,08 \cdot d_D + 8,19 \quad [kN] \quad \text{Gl. 12}$$

$$F_{max.H3} = 0,06 \cdot d_D + 1,74 \quad [kN] \quad \text{Gl. 13}$$

Diese Tendenzen gelten bei axialer Zugbeanspruchung der Holzkeildolle.

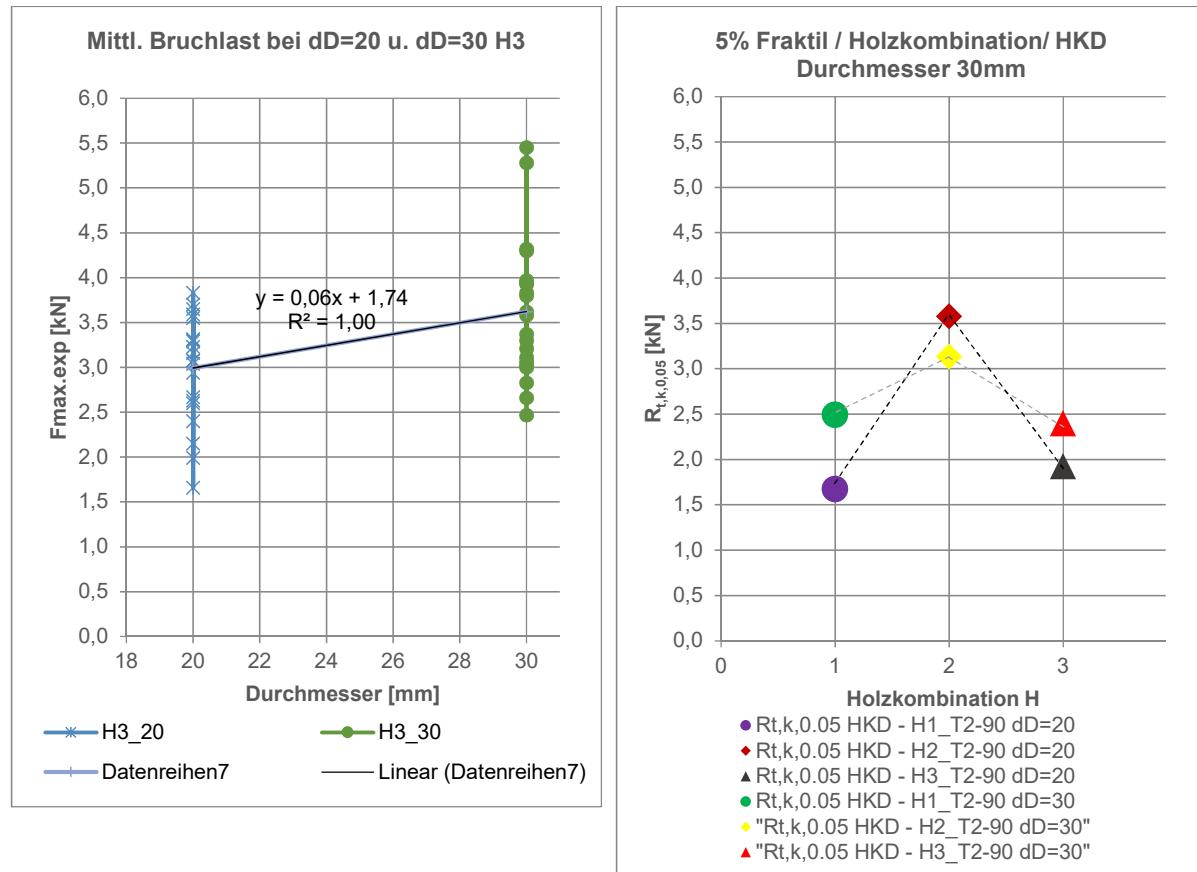
Die Prüfergebnisse sind maßgeblich von der Fertigungsqualität abhängig. Zum Beispiel konnten 14 von 21 Prüfkörper der H3,  $d_D = 30\text{mm}$ , bei Schritt 0 aufgrund der Ungenauigkeit der Vorbereitung des Bohrlochs nicht kraftschlüssig zusammengefügt werden. Von den 14 Prüfkörpern liegen 64% unterhalb der mittleren Bruchlast und 35% über der durchschnittlichen Bruchlast der Prüfreihe. Bei den 7 passgenauen Prüfkörpern liegen nur 42% unter der durchschnittlichen Bruchlast und 57% über der durchschnittlichen Bruchlast der Prüfreihe.



a)

b)

## Fortsetzung



c)

d)

Diagramm 4-3 Tatsächliche Bruchlast in Abhängigkeit der Holznageldurchmesser a) H1, b) H2, c) H3 und d) Vergleich zwischen den charakteristischen Werten der Tragfähigkeit für Holzkombinationen und Durchmesser der Dolle.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse wurde nach der EN 14358:2016 [35] durchgeführt. Vor der Auswertung der Daten für die Ermittlung der charakteristischen Werte der Tragfähigkeit wurde überprüft, ob die Häufigkeitsverteilung der Versuchsergebnisse in der Stichprobe der p-0,05 Wahrscheinlichkeitsverteilung (5% Quantil) entspricht und ob es Ausreißer gab. Wie aus der Tabelle 4-12 zu entnehmen ist, wird nach dem Anderson-Darling-Test [37] die Voraussetzung des Vertrauensniveaus 95% in logarithmischen Verteilungen für die gesamte Testreihe, abgesehen von den Reihen 20\_H3 und 30\_H2, erfüllt. Weiterhin werden in diesem Forschungsprojekt die tabellierten  $R_k$  Werte für die oben genannte Versuchsreihe genutzt, obwohl eine genauere Definition der  $R_{t,k,0,05}$ -Werte sinnvoll wäre. Dafür wären aber auch mehrere Versuche notwendig.

Tabelle 4-12 AD-Test: Anderson-Darling-Test, Vertrauensniveau 95%.

	n	m	s	$V^1$	N	AD-Test ( $\alpha = 5\%$ )	$R_k$	AD-Test ( $\alpha = 5\%$ )	$R_k$	AD-Test ( $\alpha = 5\%$ )	$R_k$
20_H1	26	3,55	1,35	0,39	false	1,01	true	1,64	true	1,41	
20_H2	28	6,56	1,98	0,31	false	2,85	true	3,57	false	3,13	
20_H3	21	2,99	0,59	0,20	true	1,87	false	2,01	true	2,05	
30_H1	21	3,95	0,95	0,25	true	2,13	true	2,41	false	2,16	
30_H2	21	5,75	1,88	0,33	false	2,17	false	2,93	false	2,55	
30_H3	21	3,62	0,77	0,22	true	2,15	true	2,34	true	2,12	

<sup>1</sup> Korrekturfaktor  $k_s$  nach DIN EN 14358:2016-11 bereits berücksichtigt

<sup>2</sup> ohne  $k_s$  da keine normative Vorgabe.

In der Tabelle 4-13 ist die Überprüfung der Ergebnisse der Testreihe durch den Dean-Dixon-Ausreißertest [37] mit verschiedenen Vertrauensniveaus ( $p$ ) dargestellt. Aus der Tabelle ist zu entnehmen, dass bei dem Vertrauensniveau von 20% mehrere Ausreißer vorhanden sind, bei dem Vertrauensniveau von 10% nur ein Max.-Wert aus der Reihe 30\_H3 als Ausreißer errechnet wurde und bei dem Vertrauensniveau von 5% keine Ausreißer vorhanden sind. Nach EN 14358 [35] wird ein  $p = 5\%$  ausgewählt, was einer Signifikanz von  $\alpha = 5\%$  entspricht. Entsprechend sind keine Ausreißer in der Testreihe vorhanden.

**Tabelle 4-13 Auswertung der Ausreißer in der Versuchsreihe nach dem Dean-Dixon-Test.**

	Ausreißer bei Signifikanz 20%	Ausreißer bei Signifikanz 10%	Ausreißer bei Signifikanz 5%
20_H1	0	0	0
20_H2	2	0	0
20_H3	3	0	0
30_H1	1	0	0
30_H2	6	0	0
30_H3	6	1	0

Rückschlüsse aus dem Vergleich der charakteristischen Werte der Zugbelastungsergebnisse (vgl. Diagramm 4-3 d):

- Die charakteristischen Werte der Tragfähigkeit für H1 und H3 haben dieselbe Größenordnung.
- Dennoch zeigen die Holzkeildollen mit  $d_D = 20\text{mm}$  in der Holzkombination H3 eine bessere Tragfähigkeit als die in der Holzkombination H1. Außerdem zeigen die Holzkeildollen mit  $d_D = 30\text{mm}$  in der Holzkombination H1 eine bessere Tragfähigkeit als die in der Holzkombination H3.
- Die Holzkombinationen H1 und H3 mit Bauteilen aus Fichte haben eine ca. 45-50%ige niedrigere charakteristische Tragfähigkeit als die Holzkombination H2 mit Bauteil aus Eiche.

Tabelle 4-14 zeigt eine Zusammenfassung der Festigkeitseigenschaften der Holzkeildolle nach den Prüfergebnissen. Es ist zu bemerken, dass die Ergebnisse der charakteristischen Werte der Tragfähigkeit in der Tabelle 4-14 von denjenigen in der Tabelle 4-12 abweichen. Der Grund dafür liegt darin, dass in der Tabelle 4-12 die Werte der 5%-Quantile mit einem  $k_s$ -Wert in Abhängigkeit der Stichprobenzahl jedes Mal neu berechnet worden sind. Die Werte in der Tabelle 4-14 sind vereinfacht mit einem angenommenen  $k_s$ -Wert nach EN 14358:2016 [35] berechnet worden.

**Tabelle 4-14 Festigkeitseigenschaften und Rohdichte der getesteten Holzkeildollen**

Holz-kombination	Prüfkörper	Bauteil		Dolle		Holzkeildolle 5% Quantil HKD Rt,k,0,05,HD
		Mittelwert B $\rho_{B,mean}^*$	5% Quantil B $\rho_{B,k}$	Mittelwert D $\rho_{D,mean}^*$	5% Quantil D $\rho_{D,k}$	
		[kg/m3]	[kg/m3]	[kg/m3]	[kg/m3]	[kN]
H1	20_H1	443	322	665	526	1,67
H2	20_H2	708	616	656	526	3,58
H3	20_H3	476	453	685	576	1,93
H1	30_H1	422	372	685	580	2,49
H2	30_H2	634	607	705	533	3,14
H3	30_H3	400	375	673	603	2,4

#### 4.2.6 Schlussfolgerung

In dem Diagramm 4-4 sind die errechneten charakteristischen Werte der Tragfähigkeit für Holzkombinationen und Durchmesser zusammengestellt. Folgende Beobachtungen können anhand der Versuchsergebnisse festgehalten werden.

- Aus dem Vergleich zwischen den charakteristischen Werten  $d_D = 20\text{ mm}$  zeigt sich, dass in Nadelholzbauteilen die Dollen aus Esche (H3) eine etwas höhere charakteristische Zugtragfähigkeit als die aus Eiche (H1) besitzen. Daraus ergibt sich die Schlussfolgerung, dass Eschendollen in Bauteilen aus Fichte ein gutes Ersatzmaterial für Eichendollen sind.

Bevor eine Auswahl der Materialien getroffen wird, ist die Gebrauchsklasse [36; 38; 39] der Bauteile zu

beachten, denn die Esche ist für Bauteile, welche dem Wetter ausgesetzt sind, aufgrund seiner natürlichen Dauerhaftigkeit nicht geeignet.

- Die nicht-passgenauen Prüfkörper in der Holzkombination H3 der Reihe V1a\_30\_H3 zeigten schon nach dem Einschlag des Keils (Schritt 1) und nach der Zugprüfung (Schritt 2) eine gewisse Tragfähigkeit, trotz der vorhandenen Imperfektionen. Diese Tragfähigkeit ist vergleichbar mit den der restlichen Prüfkörper der Serie V1\_30\_H3. Diese Beobachtung ist entscheidend für die Entwicklung des mechanischen Modells. Für eine korrekte Einschätzung der Tragwirkung sollte nur die Spreizwirkung als entscheidender Parameter berücksichtigt werden und nicht die Wirkung der Reibung (wie im TV3 als Hypothese angenommen, vgl. 3.6.3). Sind die Imperfektionen in der Fertigung nicht kontrollierbar, sollte der Anteil der Wirkung der reinen Reibung als Null eingestuft werden.
- Beim Vergleich zwischen charakteristischen Werten  $d_D = 20 \text{ mm}$  und  $d_D = 30 \text{ mm}$  für alle Holzkombinationen zeigen die Prüfkörper der H3 eine nicht gleich proportionale Erhöhung der Tragfähigkeit wie als die der H1. Hier ist anzumerken, dass ca. 67% der Prüfkörper der H3-Reihe nicht kraftschlüssig im Bohrloch waren. Daher sind die Ergebnisse aus den Prüfkörpern H3 anders zu evaluieren als die für H1, da diese Werte der Tragfähigkeit aufgrund von Imperfektionen in der Fertigung beeinflusst wurden.
- Die Fertigung der Holzkeildollenverbindung hat einen entscheidenden Einfluss auf deren Festigkeit. Dieses Phänomen zeigt sich auch für die H2. Hier ist festzustellen, dass für die Holzkombination H2 die Holzdolle (ohne Verkeilung) eine höhere Tragfähigkeit aufweist als die Holzkeildolle. Die Tragwirkung wird hier allein durch die Reibung erzeugt. Die Reibung ihrerseits ist ein Parameter, der nur mit einer akkurate Fertigung ohne Imperfektionen in dieser Art und Weise zu erzeugen ist. Nichtdestotrotz sind die Imperfektionen in der Fertigung nicht kontrollierbar, daher wird der Anteil der Wirkung der reinen Reibung als Null eingestuft.
- Die Holzkeildollen der Holzkombination H2 zeigen im Vergleich zu allen anderen Holzkombinationen, dass die Verbindungen mit einem Verbindungsmitteldurchmesser von  $d_D = 20 \text{ mm}$  eine höhere Tragfähigkeit als die mit einem Verbindungsmitteldurchmesser von  $d_D = 30 \text{ mm}$  besitzen. Diese Ergebnisse sind auf den Aufbau der Prüfkörper zurückzuführen. Hier wurden die HKD in Halbhölzer mit Markröhre eingebracht. Das mittige Einbringen der HKD in den Bauteilquerschnitt erfolgte im Bereich der Markröhre, die durch die Einführung des Keils eine Spaltzugbeanspruchung erfahren hat.
- Bei Reparatur mittels einer Blattverbindung kann die zuvor beschriebene Konstellation zu einem frühzeitigen Aufreißen des Bauteils im Bereich der Holzkeildolle führen. Bei Querschnitten mit Markröhre ist daher der Einbau einer Reparaturverbindung mit zwei distanzierten Verbindungsmitteln mit kleinerem Durchmesser anstatt nur eines mittig im Querschnitt angeordneten Verbindungsmittels empfehlenswert.

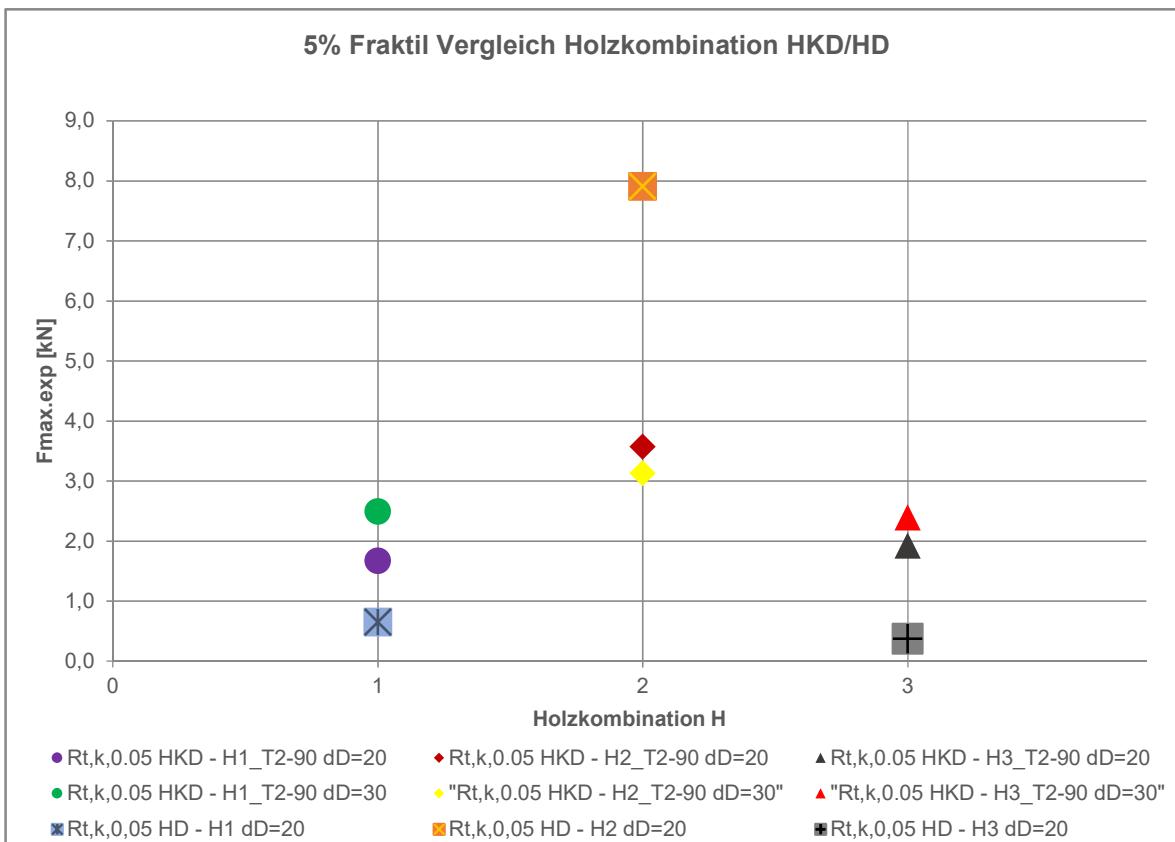


Diagramm 4-4 Vergleich zwischen den charakteristischen Werten der Tragfähigkeit für die Holzkombinationen und den Durchmesser der Dollen in der TV3 (für Holzdolle ohne Verkeilung) und V1 (für Holzkeildolle mit Verkeilung).

## 4.3 Experimentelle Charakterisierung der HD und der HKD bei Abscherbeanspruchung

### 4.3.1 Ziele

- Beschreibung der Versagensmechanismen und des Tragverhaltens der Holzkeildolle unter Abscherbeanspruchung.
- Beschreibung der Versagensmechanismen und des Tragverhaltens der Holzdolle unter Abscherbeanspruchung.
- Vergleich des Tragverhaltens und der Tragfähigkeit zwischen Holzdolle und Holzkeildolle.
- Grundlagen schaffen für ein mechanisches Modell für die Holzkeildolle unter Abscherbeanspruchung.

### 4.3.2 Materialien

Die Probekörper wurden vor der Prüfung in der Klimakammer bei  $T = 20^\circ$  und  $LF = 65\%$  nach DIN EN 408 [34] klimatisiert. Die lokalen Rohdichten der Prüfkörper wurden sowohl für die Bauteile als auch für die Dollen (und Keile) aus den Maßen und der Volumen der Prüfstücke ermittelt (vgl. Tabelle 4-15 bis Tabelle 4-17)

### 4.3.3 Geometrie der Prüfkörper

Um eine Vergleichbarkeit mit vorherigen Testergebnissen zu garantieren, wurde die Geometrie der Prüfkörper an Tests von Ehlbeck/ Hättich [15] angelehnt. Die Rohdichten der Prüfkörper (Bauteile und Stifte) liegen in einem ähnlichen Bereich. Jedoch ist bei Ehlbeck/ Hättich die Holzfeuchte der Bauteile höher, dies könnte einen Einfluss auf die Abweichung der Testergebnisse haben.

Getestet wurden zweischrittige Verbindungen, welche eine Zapfenverbindung nachbilden. Jeder Prüfkörper besteht aus drei, mit einem Holzstift (Holzdolle bzw. Holzkeildolle) zu verbindenden, Bauteilkomponenten. Zwischen den Bauteilkomponenten ist eine Acrylfolie aufgebracht, mit dem Ziel die Reibung zwischen den Bauteilkomponenten zu eliminieren und die anstehenden Kräfte nur über die Stifte abzutragen. Dies stellt eine Abweichung zu den Versuchen von Ehlbeck und Hättichs [15] dar. Die allgemeinen Fertigungsmaße und Aufbauten der Prüfkörper und der einzelnen Komponenten sind in Tabelle 4-18 und Abbildung 4-6 zu finden. Individuelle geometrische Angaben der Prüfkörper sind in der Tabelle 4-15 bis Tabelle 4-17 zusammengestellt.

Tabelle 4-15 Geometrische Angaben und Rohdichte der Prüfkörper SV: Bauteil

Serie	Prüfkörper	Prüfkörperteile	$m_B$ [g]	$l_{B,LOCH}$ [mm]	$d_{B,LOCH}$ [mm]	$V_{B,LOCH}$ [cm <sup>3</sup> ]	$\rho_{20,65}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_{20,65,B,mean}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_{20,65,mean}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	
Holzkeildolle (HKD)	SV1_20_H1_T2-90_1	SV1_20_H1_T2-90_1a	491,50	50,44	20,15	1142,13	0,430	0,428	0,441	
		SV1_20_H1_T2-90_1b	457,80	50,60	19,97	1144,45	0,400			
		SV1_20_H1_T2-90_1c	512,60	50,14	20,26	1131,92	0,453			
	SV1_20_H1_T2-90_2	SV1_20_H1_T2-90_2a	481,40	50,40	20,14	1132,25	0,425	0,446		
		SV1_20_H1_T2-90_2b	532,60	50,41	19,93	1133,77	0,470			
		SV1_20_H1_T2-90_2c	501,90	50,42	20,11	1136,09	0,442			
	SV1_20_H1_T2-90_3	SV1_20_H1_T2-90_3a	488,00	50,20	20,40	1132,23	0,431	0,465		
		SV1_20_H1_T2-90_3b	546,30	50,63	20,35	1142,59	0,478			
		SV1_20_H1_T2-90_3c	552,60	50,60	20,01	1139,17	0,485			
	SV1_20_H1_T2-90_4	SV1_20_H1_T2-90_4a	510,00	50,33	20,11	1136,88	0,449	0,452		
		SV1_20_H1_T2-90_4b	509,80	50,44	19,90	1136,85	0,448			
		SV1_20_H1_T2-90_4c	523,10	50,49	19,95	1138,66	0,459			
	SV1_20_H1_T2-90_5	SV1_20_H1_T2-90_5a	485,70	50,55	19,77	1138,48	0,427	0,418		
		SV1_20_H1_T2-90_5b	478,10	50,65	19,89	1141,39	0,419			
		SV1_20_H1_T2-90_5c	467,50	50,36	19,71	1141,67	0,409			
	SV1_20_H1_T2-90_6	SV1_20_H1_T2-90_6a	463,20	50,39	19,89	1136,23	0,408	0,426		
		SV1_20_H1_T2-90_6b	500,90	50,31	19,78	1137,02	0,441			
		SV1_20_H1_T2-90_6c	489,20	50,44	20,23	1141,94	0,428			
	SV1_20_H1_T2-90_7	SV1_20_H1_T2-90_7a	475,00	50,45	20,01	1138,61	0,417	0,431		
		SV1_20_H1_T2-90_7b	467,00	50,69	20,23	1143,69	0,408			
		SV1_20_H1_T2-90_7c	537,90	50,90	19,43	1153,50	0,466			
	SV1_20_H1_T2-90_8	SV1_20_H1_T2-90_8a	492,10	50,63	19,62	1140,23	0,432	0,463		
		SV1_20_H1_T2-90_8b	546,20	50,78	19,91	1145,66	0,477			
		SV1_20_H1_T2-90_8c	546,40	50,42	19,89	1135,97	0,481			
	SV1_20_H1_T2-90_9	SV1_20_H1_T2-90_9a	503,50	50,67	19,64	1144,87	0,440	0,446		
		SV1_20_H1_T2-90_9b	542,40	50,50	19,86	1141,21	0,475			
		SV1_20_H1_T2-90_9c	485,30	50,61	19,21	1143,47	0,424			
	SV1_20_H1_T2-90_10	SV1_20_H1_T2-90_10a	502,10	50,77	20,03	1144,83	0,439	0,432		
		SV1_20_H1_T2-90_10b	487,30	50,73	19,30	1147,70	0,425			
		SV1_20_H1_T2-90_10c	496,20	50,64	19,27	1143,64	0,434			
Holzdolle (HD)	SV1_20_H1_1	SV1_20_H1_1a	486,20	50,44	19,63	1136,36	0,428	0,445	0,443	
		SV1_20_H1_1b	532,00	50,59	19,92	1144,27	0,465			
		SV1_20_H1_1c	504,00	50,53	20,04	1138,38	0,443			
	SV1_20_H1_2	SV1_20_H1_2a	463,70	50,59	20,16	1142,10	0,406	0,439		
		SV1_20_H1_2b	509,20	50,46	20,03	1138,06	0,447			
		SV1_20_H1_2c	530,90	50,64	20,39	1143,93	0,464			
	SV1_20_H1_3	SV1_20_H1_3a	520,90	50,49	19,72	1138,59	0,457	0,450		
		SV1_20_H1_3b	540,90	50,42	19,95	1140,62	0,474			
		SV1_20_H1_3c	480,30	50,92	20,11	1149,87	0,418			
	SV1_20_H1_4	SV1_20_H1_4a	484,70	50,39	20,10	1138,14	0,426	0,441		
		SV1_20_H1_4b	515,90	50,44	19,96	1137,89	0,453			
		SV1_20_H1_4c	505,50	50,33	19,99	1135,97	0,445			
	SV1_20_H1_5	SV1_20_H1_5a	501,10	50,39	20,11	1134,03	0,442	0,443	0,443	
		SV1_20_H1_5b	524,40	50,47	19,63	1139,93	0,460			
		SV1_20_H1_5c	486,50	50,56	20,10	1138,74	0,427			
	SV1_20_H1_6	SV1_20_H1_6a	507,30	50,48	20,12	1140,10	0,445	0,437	0,443	
		SV1_20_H1_6b	483,90	50,44	19,93	1141,71	0,424			
		SV1_20_H1_6c	502,90	50,45	20,02	1134,56	0,443			
	SV1_20_H1_7	SV1_20_H1_7a	512,00	50,49	20,02	1137,14	0,450	0,457		
		SV1_20_H1_7b	502,10	50,65	20,06	1142,33	0,440			
		SV1_20_H1_7c	551,70	50,74	19,86	1146,21	0,481			
	SV1_20_H1_8	SV1_20_H1_8a	476,40	50,25	20,11	1134,88	0,420	0,423		
		SV1_20_H1_8b	494,60	50,59	19,84	1143,83	0,432			
		SV1_20_H1_8c	475,60	50,60	19,85	1144,29	0,416			
	SV1_20_H1_9	SV1_20_H1_9a	492,60	50,52	19,46	1136,88	0,433	0,449		
		SV1_20_H1_9b	541,80	50,38	19,75	1134,21	0,478			
		SV1_20_H1_9c	494,50	50,21	19,87	1130,66	0,437			
	SV1_20_H1_10	SV1_20_H1_10a	495,30	50,59	19,98	1142,77	0,433	0,427		
		SV1_20_H1_10b	491,30	50,42	19,91	1133,05	0,434			
		SV1_20_H1_10c	473,60	50,60	19,88	1145,81	0,413			
	SV1_20_H1_11	SV1_20_H1_11a	530,00	50,43	19,86	1135,56	0,467	0,459		
		SV1_20_H1_11b	542,60	50,48	19,99	1137,21	0,477			
		SV1_20_H1_11c	488,80	50,23	19,88	1129,89	0,433			

Tabelle 4-16 Geometrische Angaben und Rohdichte der Prüfkörper SV: Dolle

Serie	Bauteil	Dolle Nr.	Nut				Dolle						
			$l_N$ [mm]	$b_{N,mean}$ [mm]	$l_N$ [mm]	$b_{N,mean}$ [mm]	$d_D$ [mm]	$l_D$ [mm]	$m_D$ [g]	$V_{TOT}$ [cm <sup>3</sup> ]	$\rho_{20,65}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_{20,65,mean}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	
Holzkeildolle (HKD)	SV1_20_H1_T2-90_1	1	29,00	2,30	29,50	2,31	20,00	153,00	22,60	45,37	0,498	0,535	
	SV1_20_H1_T2-90_2	2	29,00	2,07	29,50	2,02	20,00	153,00	28,37	45,68	0,621		
	SV1_20_H1_T2-90_3	3	28,50	2,23	29,50	2,10	20,00	153,00	22,64	45,56	0,497		
	SV1_20_H1_T2-90_4	4	29,00	2,08	29,50	2,10	20,00	153,00	28,21	45,62	0,618		
	SV1_20_H1_T2-90_5	5	30,00	2,09	30,00	2,22	20,00	153,00	22,38	45,48	0,492		
	SV1_20_H1_T2-90_6	6	30,00	2,16	30,00	2,03	20,00	153,00	28,42	45,56	0,624		
	SV1_20_H1_T2-90_7	7	30,00	2,14	30,00	2,20	20,00	153,00	21,64	45,46	0,476		
	SV1_20_H1_T2-90_8	8	30,00	1,97	30,00	2,14	20,00	153,00	22,82	45,60	0,500		
	SV1_20_H1_T2-90_9	9	30,50	2,51	29,50	2,38	20,00	153,00	22,53	45,13	0,499		
	SV1_20_H1_T2-90_10	10	30,00	2,01	29,50	2,07	20,00	153,00	23,76	45,64	0,520		
Holzdolle (HD)	SV1_20_H1_1	11	-	-	-	-	20,00	153,00	25,37	48,07	0,528	0,615	
	SV1_20_H1_2	12	-	-	-	-	20,00	153,00	30,71	48,07	0,639		
	SV1_20_H1_3	13	-	-	-	-	20,00	153,00	29,33	48,07	0,610		
	SV1_20_H1_4	14	-	-	-	-	20,00	153,00	30,05	48,07	0,625		
	SV1_20_H1_5	15	-	-	-	-	20,00	153,00	30,12	48,07	0,627		
	SV1_20_H1_6	16	-	-	-	-	20,00	153,00	32,07	48,07	0,667		
	SV1_20_H1_7	17	-	-	-	-	20,00	153,00	29,98	48,07	0,624		
	SV1_20_H1_8	18	-	-	-	-	20,00	153,00	29,89	48,07	0,622		
	SV1_20_H1_9	19	-	-	-	-	20,00	153,00	30,76	48,07	0,640		
	SV1_20_H1_10	20	-	-	-	-	20,00	153,00	25,67	48,07	0,534		
	SV1_20_H1_11	21	-	-	-	-	20,00	153,00	31,29	48,07	0,651		

Tabelle 4-17 Geometrische Angaben und Rohdichte der Prüfkörper SV: Keil (Holzkeildolle)

Serie	Bauteil	Keil Nummer		Keil								
		Seite a	Seite b	$l_k$ [mm]	$b_k$ [mm]	$t_{K,1,mean}$ [mm]	$t_{K,3}$ [mm]	$t_{K,2}$ [mm]	$m_k$ [g]	$V_{TOT}$ [mm $^3$ ]	$\rho_{20,65}$ [g/cm $^3$ ]	$\rho_{20,65,mean}$ [g/cm $^3$ ]
Holzkeildolle (HKD)	SV1_20_H1_T2-90_1	1		40,35	20,00	1,90	4,99	6,00	2,368	2,42	0,978	0,863
			2	40,49	20,00	1,97	5,02	6,04	2,337	2,45	0,956	
	SV1_20_H1_T2-90_2	3		40,49	20,00	1,73	5,08	6,14	2,073	2,49	0,834	
			4	40,26	20,00	1,88	5,02	6,05	2,212	2,44	0,908	
	SV1_20_H1_T2-90_3	5		40,28	20,00	1,74	5,05	6,08	2,012	2,45	0,822	
			6	40,31	20,00	2,09	4,98	6,13	2,086	2,47	0,844	
	SV1_20_H1_T2-90_4	7		40,26	20,00	2,12	5,05	6,18	2,266	2,49	0,911	
			8	40,28	20,00	1,58	5,10	6,15	2,217	2,48	0,895	
	SV1_20_H1_T2-90_5	9		40,39	20,00	1,94	5,07	6,32	2,018	2,55	0,791	
			10	40,30	20,00	1,95	5,08	6,20	2,284	2,50	0,914	
	SV1_20_H1_T2-90_6	11		40,40	20,00	1,79	5,10	6,12	2,140	2,47	0,866	
			12	40,34	20,00	1,65	5,22	6,13	1,972	2,47	0,797	
	SV1_20_H1_T2-90_7	13		40,65	20,00	1,54	5,06	6,06	2,002	2,46	0,813	
			14	40,33	20,00	1,92	5,18	6,10	2,084	2,46	0,847	
	SV1_20_H1_T2-90_8	15		40,24	20,00	2,02	5,10	6,07	2,291	2,44	0,938	
			16	40,28	20,00	1,87	5,20	6,10	2,039	2,46	0,830	
	SV1_20_H1_T2-90_9	17		40,26	20,00	1,73	5,20	6,23	1,894	2,51	0,755	
			18	40,36	20,00	1,99	4,96	6,13	2,108	2,47	0,852	
	SV1_20_H1_T2-90_10	19		40,31	20,00	1,76	5,40	6,12	2,204	2,47	0,893	
			20	40,40	20,00	1,78	5,21	6,16	2,004	2,49	0,805	

Tabelle 4-18 Geometrische festgelegte Parameter und Holzarten für die SV: Holzdolle und Holzkeildolle

	Holzart	Holzdolle HD		Holzkeildolle HKD	
		Maße		Maße	
Bauteil	Fichte C24	3 Komponenten jeweils: $(b_B \times h_B \times l_B) = 100 \times 50 \times 230 \text{ mm}^3$		3 Komponenten jeweils: $(b_B \times h_B \times l_B) = 100 \times 50 \times 230 \text{ mm}^3$	
Bohrloch	-	$d_{B,LOCH} = d_D = 20 \text{ mm}$ (rund)		$d_{B,LOCH} = d_D = 20 \text{ mm}$ (rund)	
Dolle	Eiche D30	$d_D = 20 \text{ mm}$ $l_D = 150 \text{ mm}$		$d_D = 20 \text{ mm}$ $l_D = 150 \text{ mm}$	
Nut	-	-		$t_N = 2 \text{ mm}$ $l_{N,1} = 30 \text{ mm}$	
Keil	Eiche D30	-		$b_K = d_D = 20 \text{ mm}$ $t_{K,1} \cong 0 \text{ mm}$ $\alpha_{K,S} = 8^\circ - 10^\circ$ $l_K = 30 + 10 \text{ mm} = 40 \text{ mm}$	

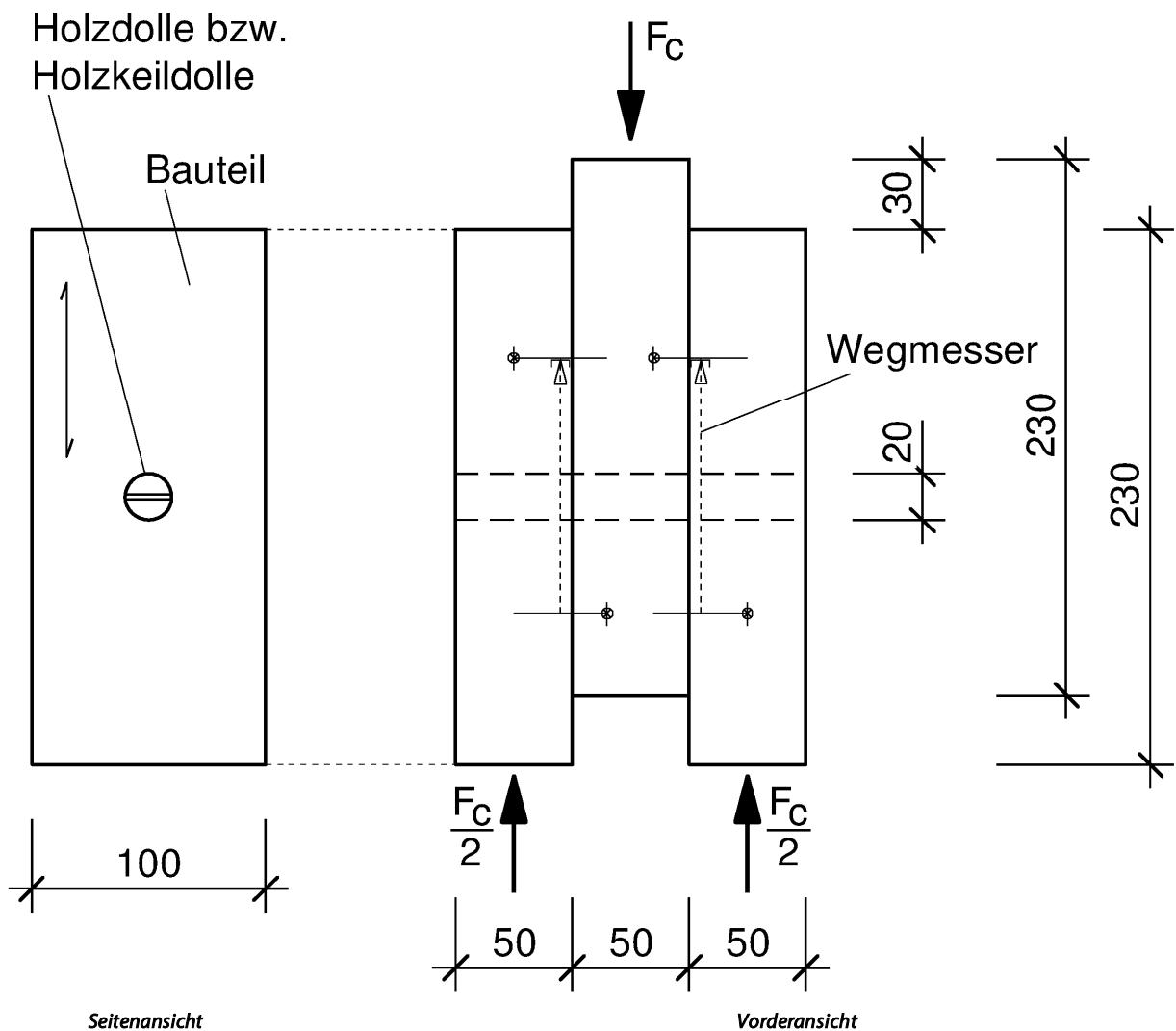


Abbildung 4-6 Prüfkörpergeometrie und Prüfungsaufbau für die Scherversuche SV: Holzdolle (HD, ohne Verkeilung) und Holzkeildolle (HKD, mit Verkeilung)

#### 4.3.4 Methode

In dieser Versuchsserie, den Scherversuchen (SV), sind zweischnittige Prüfkörper mit einer Holzdolle oder einer Holzkeildolle als Verbindungsmittel getestet worden. Die SV-Serie teilt sich also in SV-HD und SV-HKD auf. In der Serie SV-HD ist eine zweischnittige Verbindung mittels Holzdolle verbunden und in der Serie SV-HKD ist eine zweischnittige Verbindung mittels Holzkeildolle verbunden. Die Prüfung basiert auf den Angaben der EN 26891 [40]. Die Druckprüfung ist mit einer universalen mechanischen Prüfmaschine mit einer weggesteuerten Prüfung (Geschwindigkeit  $v = 0,00166 \text{ mm/s}$ ) durchgeführt worden. Die Messung der vertikalen Verschiebung zwischen den Bauteilkomponenten erfolgte mittels zweier induktiver Wegaufnehmer. Die Wegaufnehmer wurden an den gegenüberliegenden Seiten angebracht und kennzeichneten Weg 1 und Weg 2, jeweils zwischen der äußersten und der mittleren Bauteilkomponente (vgl. Abbildung 4-7). Für die Auswertung der absoluten vertikalen Verschiebung wurden die Verschiebungen aus dem Weg 1 und Weg 2 gemittelt und zusammen mit der Belastung im Last-/Verformungsdiagramm aufgezeichnet.

Abbruchkriterien sind (a) vertikale Verschiebung bis  $\varepsilon = 11 \text{ mm}$  oder (b) eine seitliche Verschiebung der Bauteilkomponenten  $\delta \geq 2 \text{ mm}$ .

Methode des Einbaus und der Prüfung:

- (Schritt 0): Vor dem Testanfang erfolgt das Einbringen der (Holzkeil-)Dolle in die zu verbindenden Bauteilkomponenten. Zwischen den einzelnen Komponenten wurde eine dünne Acrylfolie eingebaut. Für die Testreihe SV-HKD sind die Maße der Nut nach dem Einbringen der Dolle im Bauteil in der Tabelle 4-19 zu finden.
- (Schritt 1): Nur für Testreihe SV-HKD: Manuelles Eintreiben des Keils in die Nut (Hammerschlag). Das Eintreiben erfolgt für beide Seiten manuell bis zu einer Eindringtiefe in die Nut  $E.T_{S1,max} \leq 30 \text{ mm}$  ( $E.T_{S1,max} = l_N$ ). Drei Kontrolllinien auf dem Keil führen zu der richtigen Einbautiefe. Die Eindringtiefe (E.T.) ist der Tabelle 4-19 zu entnehmen.
- (Schritt 2): Einbau der induktiven Wegaufnehmer auf den Prüfkörper. Prüfung der Probekörper durch eine aufgebrachte Druckkraft (vgl. Abbildung 4-6) bis zu einem definierten Abbruchkriterium (a) oder (b).

Tabelle 4-19 Maße der Nut und Eindringtiefe des Keils in den SV – HKD

			(Schritt 0) Nach Einbringen der Dolle in den Bauteilen			(Schritt 1) Nach Eintreiben der Keile		
			Seite (a)	Seite (b)	Seite (a)	Seite (b)		
Serie	Prüfkörper	Dolle Nr.	$b'_{N,mean}$ [mm]	$b''_{N,mean}$ [mm]	Eindringtiefe $t'_{K,30}$ [mm]	$b''_{N,mean}$ [mm]	Eindringtiefe $t'_{K,30}$ [mm]	
HKD	SV1_20_H1_T2-90_1	1	1,63	1,82	5,02	29,68	5,05	29,09
	SV1_20_H1_T2-90_2	2	1,58	1,50	3,07	16,78	3,13	16,50
	SV1_20_H1_T2-90_3	3	1,85	1,54	5,01	28,29	4,57	23,75
	SV1_20_H1_T2-90_4	4	1,55	1,88	4,38	20,18	4,15	28,58
	SV1_20_H1_T2-90_5	5	1,63	1,76	4,97	30,32	5,14	29,83
	SV1_20_H1_T2-90_6	6	1,40	1,44	3,34	21,12	4,19	17,70
	SV1_20_H1_T2-90_7	7	1,72	1,64	4,14	29,50	3,35	14,50
	SV1_20_H1_T2-90_8	8	1,59	1,70	4,64	25,32	5,26	30,36
	SV1_20_H1_T2-90_9	9	1,65	1,76	5,22	29,91	4,95	30,30
	SV1_20_H1_T2-90_10	10	1,76	1,53	5,25	30,13	5,01	29,11

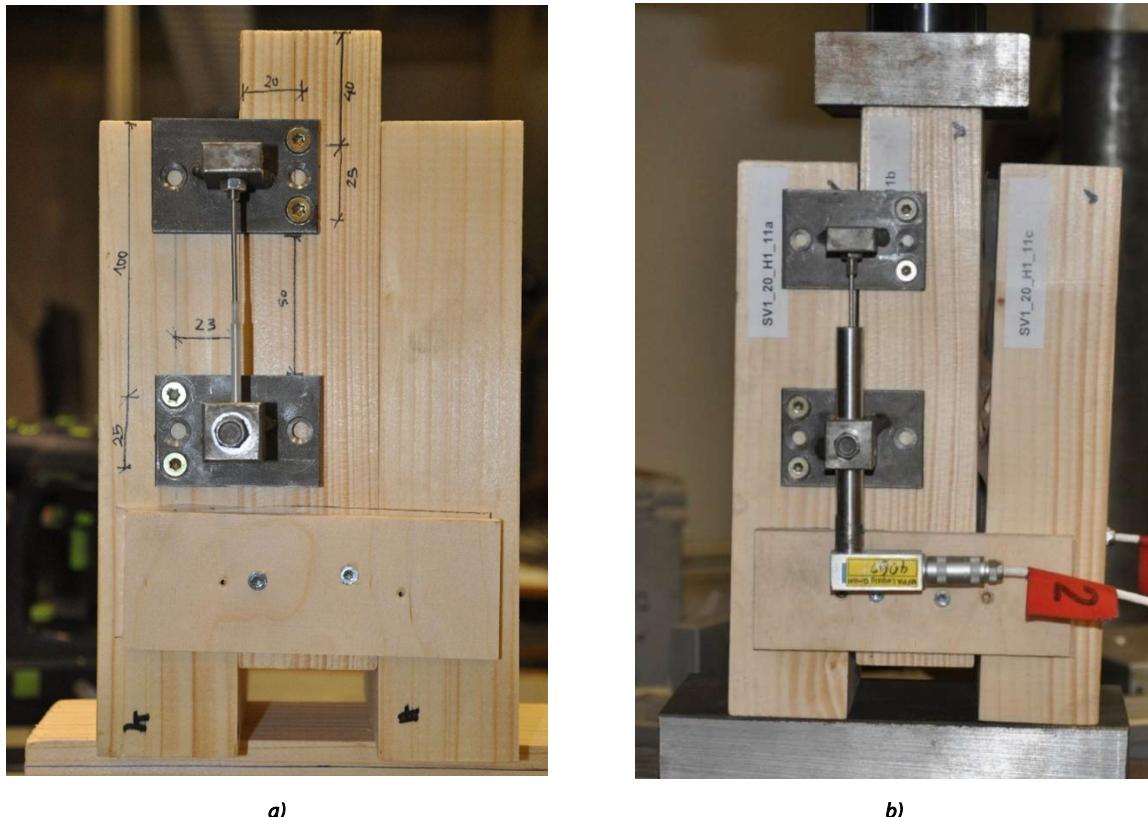


Abbildung 4-7 a) Aufbau des induktiven Wegaufnehmer-Systems; b) Abbruchkriterium (b)

#### 4.3.5 Prüfergebnisse

##### Versagensmechanismen

###### Holzdolle:

Es wurden zwei verschiedene Last-/Verformungsdiagramm-Gruppen beobachtet. Alle Last-/Verformungsdiagramme zeigen nach dem Erreichen des ersten Lastmaximums (definiert als Bruchlast) einen mehr oder wenigen degressiven Lastabfall und sind in Gruppe 1 oder Gruppe 2 klassifizierbar. Die Prüfkörper in Gruppe 1 zeigen nach dem Lastmaximum einen degressiven Lastabfall. Die Prüfkörper der Gruppe 2 zeigen nach dem ersten Lastmaximum einen Lastabfall gefolgt von einer weiteren Laststeigerung. Diese erreichen nach weiterer größerer Verformung ein zweites absolutes Lastmaximum. Dieses absolute Lastmaximum liegt 1-2kN über dem ersten Lastmaximum. Nach diesem zweiten Maximum fällt die Last langsam ab. Die am häufigsten aufgetretenen Last-/Verformungsdiagramme für die HD sind auf der Abbildung 4-8 a) und b) dargestellt. Aufgrund einer Balancierung in der Prüfmaschine ist durchweg ein Sprung auf 3kN zu beobachten. Dieses Phänomen ist nicht relevant für die Prüfergebnisse und kann vernachlässigt werden.

**Gruppe 1:** Die identifizierbaren Versagensmechanismen anhand der Bruchbilder sind der Biegezugbruch der Holzdolle in der Nähe der Scherfuge in der oberen und unteren Hälfte der Verbindung und das Erreichen der Lochleibungsfestigkeit des Holzes des Bauteils (vgl. Abbildung 4-9 – a) – e)). Nach dem Erreichen des ersten Lastmaximums tritt plötzlich ein Lastabfall auf, der auf einen Biegezugbruch in der Holzkeildolle hinweist (vgl. Abbildung 4-8-a). Nach dem plötzlichen Bruch des Querschnitts in der Nähe der Scherfuge in der oberen und unteren Hälfte der Verbindung nimmt die HD im Fugenbereich, zwischen den zwei Biegezugbrüchen, weitere Kräfte auf: Es zeigt sich eine degressive langsame Lastsenkung. Die Lastaufnahme wird zu den einzelnen HD-Brüchen hin umgelagert. Die Bruchzonen sind auf Druck senkrecht zur Faser beansprucht und werden mit fortschreitender Verformung der Verbindung verdichtet. Gleichzeitig wird die Lochleibungsfestigkeit des Holzes des Bauteile erreicht.

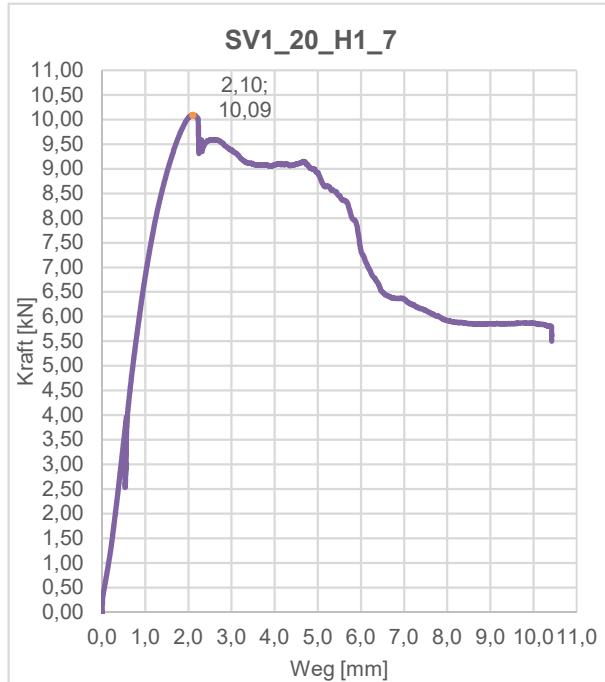
Die Prüfkörper in der Gruppe 1 (SV1\_20\_H1\_2; 3; 7; 10; 11) zeigen nach der ersten Bruchlast einen Wert, der in der Größenordnung des zweiten Lastmaximums der Prüfkörpergruppe 2 liegt (vgl. Tabelle 4-20). Dieses Phänomen könnte in Verbindung mit der Rohdichte der Prüfkörperkomponenten gebracht werden. Es wurde beobachtet, dass der Rohdichteunterschied zwischen Bauteil und Dolle der Prüfkörper der Gruppe 2 über dem durchschnittlichen Wert des Rohdichteunterschieds der Serie liegt. Eine andere Hypothese für dieses Phänomen könnte die im Vergleich zu den Prüfkörpern der Gruppe 2 reduzierte Verankerung durch Haftreibung im Bohrloch sein, die das Verschieben des Stiftes im Bohrloch erlaubt.

**Gruppe 2:** Die identifizierbaren Versagensmechanismen anhand der Bruchbilder sind der Biegezugbruch der Holzdolle in der Nähe der Scherfuge in der oberen und unteren Hälfte der Verbindung und das Erreichen der Lochleibungsfestigkeit des Holzes des Bauteils (vgl. Abbildung 4-9 – f – j)). Alle Prüfkörper zeigen vier Biegezugrisse, bis auf den Prüfkörper SV1\_20\_H1\_1, der fünf Biegezugrisse zeigt. Nach dem Erreichen des ersten Lastmaximums tritt plötzlich ein Lastabfall auf, der hier auf ein „Rutschen“ der Holzkeildolle im Bohrloch hinweist (Diagrammbild 1, vgl. Abbildung 4-8-b)). Wie schon erwähnt, besitzen diese Prüfkörper möglicherweise von Anfang an eine höhere Verankerung durch Haftreibung im Bohrloch, der den Seileffekt aktiviert. Die Holzdolle verformt sich mit großen Biegeradien, bis die HD im Bereich der Scherfuge „plastifiziert“ und durch das Erreichen des Maximums der Haftreibung im Bohrloch „rutscht“. Eine Ausnahme dafür ist der Prüfkörper SV1\_20\_H1\_1, der nach der Verformung einen Biegezugriss im Mittenbereich der Dolle ausbildet. Danach konnte für alle Prüfkörper die Belastung noch einmal, mindestens bis zum ersten Lastmaximum gesteigert werden. Das absolute Lastmaximum lag in fast allen Fällen deutlich über der Bruchlast. Diese zweite Laststeigerung endet mit einem Biegezugbruch der Holzdolle in der Nähe der Scherfuge in der oberen und unteren Hälfte der Verbindung, wie für die Gruppe 1 beobachtet. Nach dem Bruch des Querschnitts nimmt die HD im Fugenbereich, zwischen den zwei Biegezugbrüchen, weitere Kräfte auf und zeigt eine degressive langsame Lastabsenkung. Die Lastaufnahme wird auf die einzelnen HD-Brüche umgelagert. Die Bruchzonen sind auf Druck senkrecht zur Faser beansprucht und werden mit fortschreitender Verformung der Verbindung verdichtet. Gleichzeitig wird die Lochleibungsfestigkeit des Holzes der Bauteile erreicht.

Zusammengefasst, wurden für die SV-HD Serie Abweichungen zu [15] beobachtet:

- Kleinere Gesamtverformungen in den Last-Verformungsdiagrammen. Grund dafür könnte der fehlende Einfluss der Reibung zwischen den Bauteilen sein, der in diese Prüfungen mittels Vinyl-Folie eliminiert wurde.
- Die entstandenen Diagramme lassen sich nicht anhand der Bruchbilder von Ehlbeck/Hättich [15] beschreiben. Hier entstehen für die Holzdolle relativ große Biegeradien. In den SV-HD zeigt sich kein reines Fließgelenk in der Holzdolle. Grund dafür könnte die niedrigere Holzfeuchte der Fichtenbauteile in Abweichung zu [15] sein. Alternativer Grund dafür könnte der fehlende Einfluss der Reibung zwischen den Bauteilen sein.
- Die Phänomene hinter den Last-/Verformungsdiagrammen finden Abweichungen zu den in [15] präsentierten Beschreibung.

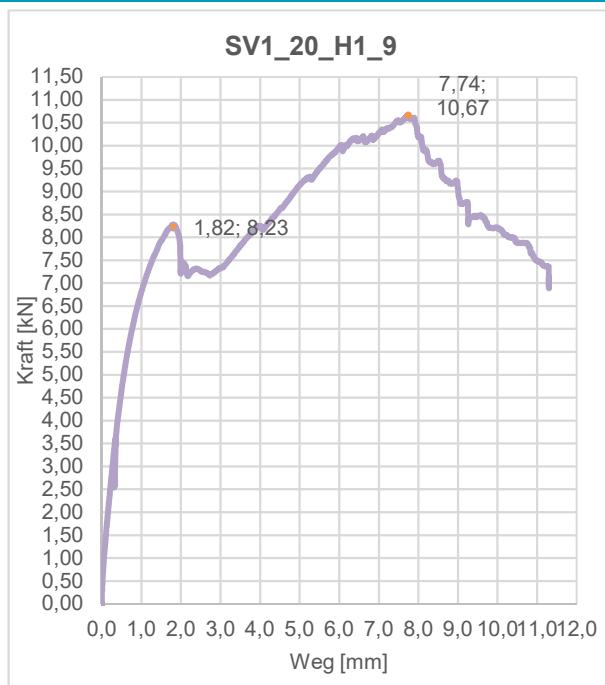
## Gruppe 1



a) Diagramm SV1\_20\_H1\_7

a) Bild SV1\_20\_H1\_7

## Gruppe 2



b) Diagramm SV1\_20\_H1\_9

b) Bild SV1\_20\_H1\_9

Abbildung 4-8 a) Last-Verformungsdiagramm und Bild der zugeschnittenen Prüfkörper SV1\_20\_H1\_7 (Gruppe 1); b) Last-Verformungsdiagramm und Bild der zugeschnittenen Prüfkörper SV1\_20\_H1\_9 (Gruppe 2)

## Gruppe 1



a) SV1\_20\_H1\_2



b) SV1\_20\_H1\_3



c) SV1\_20\_H1\_6



d) SV1\_20\_H1\_7



e) SV1\_20\_H1\_10

## Gruppe 2



f) SV1\_20\_H1\_1



g) SV1\_20\_H1\_4



h) SV1\_20\_H1\_5



i) SV1\_20\_H1\_8



j) SV1\_20\_H1\_9

Abbildung 4-9 : a) bis e) Bruchbilder der Prüfkörper „Gruppe 1“. f) bis j) Bruchbilder der Prüfkörper „Gruppe 2“

Tabelle 4-20 Prüfergebnisse der SV1. Einteilung in Versagensgruppen nach dem Verlauf der Prüfung.

Durchmesser	Holz-kombination	Prüfkörper	Lastmaximum Peak 1		Lastmaximum Peak 2		Max Kraft	F <sub>max,mean(Peak)</sub>	Versagens-Gruppe
			(x)	(y)	(x)	(y)			
			[mm]	[kN]	[mm]	[kN]			
HKD	H1	SV1_20_H1_T2-90_1	1,72	8,04			8,04	8,40	Gruppe 3
		SV1_20_H1_T2-90_2	0,94	8,99			8,99		Gruppe 4
		SV1_20_H1_T2-90_3	0,94	8,02			8,02		Gruppe 3
		SV1_20_H1_T2-90_4	1,34	10,21			10,21		Gruppe 4
		SV1_20_H1_T2-90_5	1,18	7,38			7,38		Gruppe 3
		SV1_20_H1_T2-90_6	1,62	9,49			9,49		Gruppe 3
		SV1_20_H1_T2-90_7	0,92	7,11			7,11		Gruppe 3
		SV1_20_H1_T2-90_8	2,23	7,85			7,85		Gruppe 3
		SV1_20_H1_T2-90_9	1,63	8,22			8,22		Gruppe 4
		SV1_20_H1_T2-90_10	1,48	8,70			8,70		Gruppe 4
HD	H1	SV1_20_H1_1	1,20	7,94	1,96	8,29	8,29	9,11	Gruppe 2
		SV1_20_H1_2	1,36	9,19			9,19		Gruppe 1
		SV1_20_H1_3	1,59	9,70			9,70		Gruppe 1
		SV1_20_H1_4	1,76	8,79	5,81	9,53	9,53		Gruppe 2
		SV1_20_H1_5	1,66	8,75	6,01	9,51	9,51		Gruppe 2
		SV1_20_H1_6	1,36	10,05			10,05		Gruppe 1
		SV1_20_H1_7	2,10	10,09			10,09		Gruppe 1
		SV1_20_H1_8	1,49	8,51	4,46	8,97	8,97		Gruppe 2
		SV1_20_H1_9	1,80	8,23	7,74	10,67	10,67		Gruppe 2
		SV1_20_H1_10	1,53	8,89			8,89		Gruppe 1
		SV1_20_H1_11	1,68	10,27			10,27		Gruppe 1

### Holzkeildolle:

Auch für die Holzkeildolle wurden zwei verschiedene Last-/Verformungsdiagramm-Gruppen beobachtet. Alle Last-/Verformungsdiagramme zeigen nach dem Erreichen des ersten Lastmaximums (definiert als Bruchlast) einen mehr oder wenigen degressiven Lastfall und sind in Gruppe 3 oder Gruppe 4 klassifizierbar. Die Prüfkörper in Gruppe 3 zeigen nach dem Lastmaximum einen degressiven Lastabfall. Die Prüfkörper der Gruppe 4 zeigen nach dem ersten Lastmaximum eine weitere Laststeigerung, die jedoch das Niveau des ersten Lastmaximums nicht erreicht. Diese zwei aufgetretenen grundsätzlichen Last-/Verformungsdiagramme für die HKD sind jeweils auf der Abbildung 4-10 dargestellt. Aufgrund einer Balancierung in der Prüfmaschine ist durchweg ein Sprung auf 3 kN zu beobachten. Dieses Phänomen ist nicht relevant für die Prüfergebnisse und kann vernachlässigt werden.

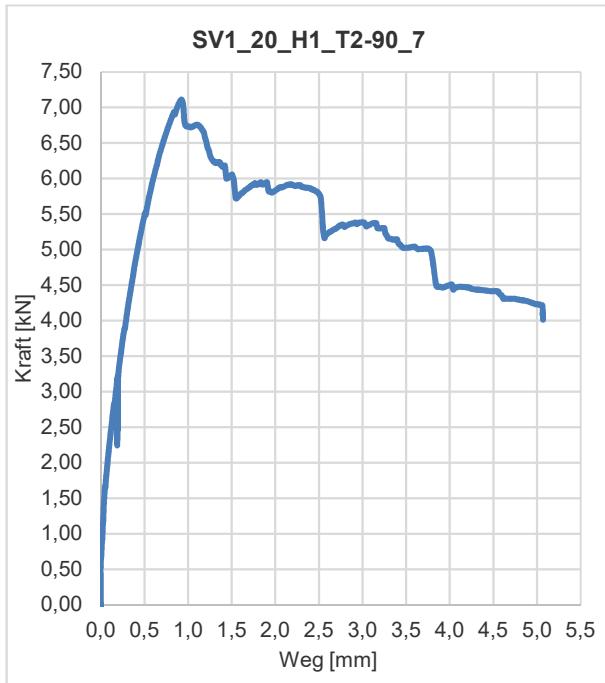
**Gruppe 3:** Die identifizierbaren Versagensmechanismen anhand der Bruchbilder sind ein Biegezugbruch der Holzkeildolle in der Nähe der Scherfuge in der oberen und unteren Hälfte der Verbindung, ein Biegezugbruch bei der Hälfte der Holzkeildolle im Biegezugbereich und das Erreichen der Lochleibungsfestigkeit des Holzes des Bauteils (Abbildung 4-11-a) bis e)). Alle Prüfkörper zeigen vier Biegezugrisse. Nach dem Erreichen des ersten Lastmaximums tritt plötzlich ein Lastabfall auf, der auf einen Biegezugbruch hinweist (Abbildung 4-10-a)). Nach dem plötzlichen Bruch des Querschnitts in der Nähe der Scherfuge in der oberen und unteren Hälfte der Verbindung nimmt die HKD im Fugenbereich weitere Kräfte, zwischen den zwei Biegezugbrüchen, auf. Es zeigt sich eine degressive langsame Lastabsenkung. Die Lastaufnahme wird zu den einzelnen HKD-Brüchen hin umgelagert. Die Bruchzonen sind auf Druck senkrecht zur Faser beansprucht und werden mit fortschreitender Verformung der Verbindung verdichtet.

Die Verankerung der Dolle im Bohrloch durch die Verkeilung verhindert hier das Verschieben der HKD im Bohrloch und das Erreichen eines höheren Wertes der Tragfähigkeit als in der Gruppe 1. Die Prüfkörper in der Gruppe 3 (SV1\_20\_H1\_TV2-90\_1; 3; 5; 7; 8) zeigen einen Mittelwert des Lastmaximums, der c.a. 12% niedriger als das Lastmaximum der Gruppe 4 und 17% niedriger als das Lastmaximum der Gruppe 1 ist (vgl. Tabelle 4-20).

**Gruppe 4:** Die identifizierbaren Versagensmechanismen anhand der Bruchbilder sind ein Biegezugbruch der Holzkeildolle in der Nähe der Scherfuge in der oberen und unteren Hälfte der Verbindung, ein Biegezugbruch bei der Hälfte der Dolle im Biegezugbereich und das Erreichen der Lochleibungsfestigkeit des Holzes des Bauteils (Abbildung 4-11-f) bis i)). Alle Prüfkörper zeigen fünf Biegezugrisse. Nach dem Erreichen des ersten Lastmaximums tritt plötzlich ein Lastabfall auf, der hier auf einen Biegezugbruch der Holzkeildolle hinweist

(Diagrammbild b), vgl. Abbildung 4-10-b)). Der Seileffekt (oder Verankerung der Dolle im Bohrloch) ist durch die Verkeilung der beiden Endbereiche der Dolle verstärkt. Ist die Holzkeildolle entlang ihre Achse unverschieblich, verformt sie sich während der Laststeigerung mit großen Biegeradien, bis sie bei der Hälfte der Länge einen Biegezugriss ausbildet. Danach konnte die Belastung noch einmal gesteigert werden, dennoch wird das Niveau des ersten Lastmaximums nicht mehr erreicht. Diese zweite Laststeigerung findet dank der Lastaufnahme der beiden Bruchhälften der Dolle statt. Die Laststeigerung endet mit einem Biegezugbruch jeder Bruchhälfte in der Nähe der Scherfuge in der oberen und unteren Hälfte der Verbindung, wie für die Gruppe 3 beobachtet. Nach dem Bruch des Querschnitts nimmt jede Hälfte der HKD im Fugenbereich, zwischen den zwei Biegezugbrüchen, weitere Kräfte auf und zeigt eine degressive langsame Lastabsenkung. Die Bruchzonen sind auf Druck senkrecht zur Faser beansprucht und werden mit fortschreitender Verformung der Verbindung verdichtet. Gleichzeitig wird die Lochleibungsfestigkeit des Holzes der Bauteile erreicht.

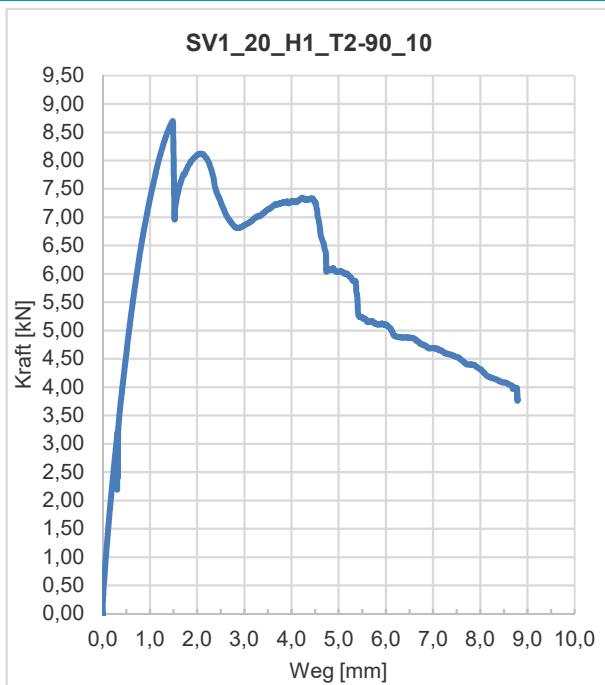
## Gruppe 3



a) Diagramm SV1\_20\_H1\_T2-90\_7

a) Bild SV1\_20\_H1\_T2-90\_7

## Gruppe 4

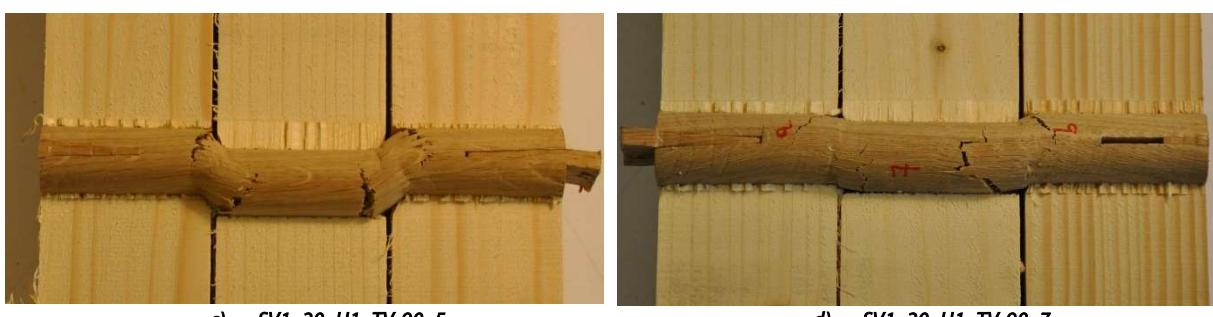


b) Diagramm SV1\_20\_H1\_T2-90\_10

b) Bild SV1\_20\_H1\_T2-90\_10

Abbildung 4-10 a) Last-Verformungsdiagramm und Bild der zugeschnittenen Prüfkörper SV1\_20\_H1\_T2-90\_7 (Gruppe 3); b) Last-Verformungsdiagramm und Bild der zugeschnittenen Prüfkörper SV1\_20\_H1\_T2-90\_10 (Gruppe 4)

## Gruppe 3



## Gruppe 4

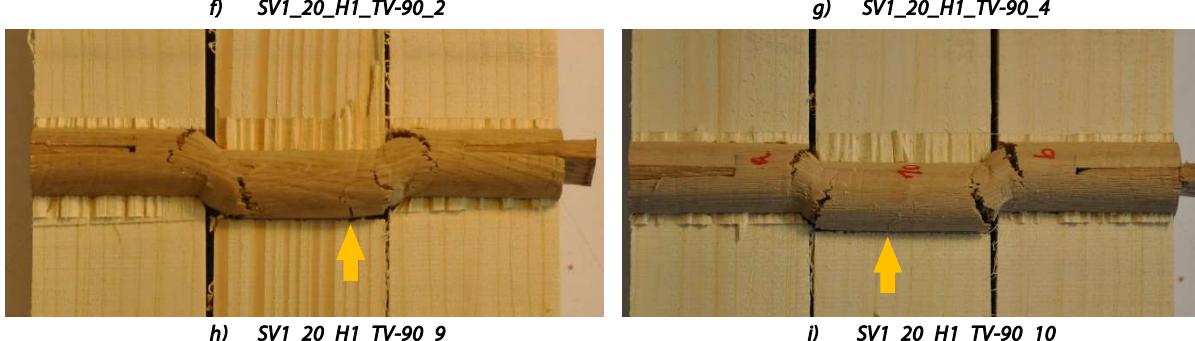
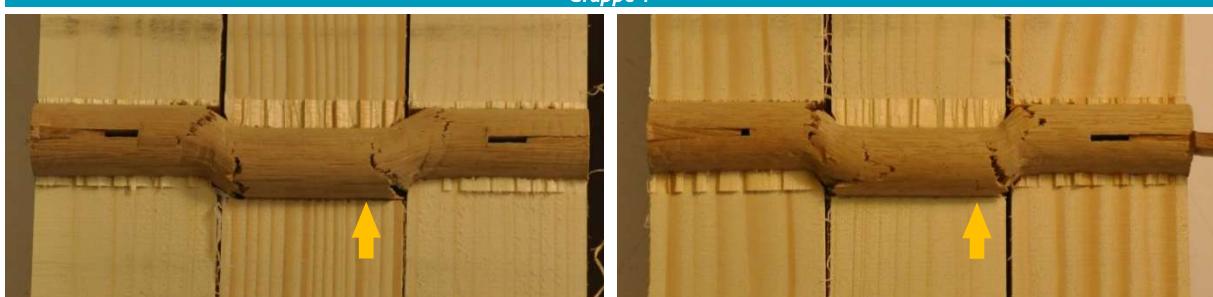


Abbildung 4-11 : a) bis e) Bruchbilder der Prüfkörper „Gruppe 3“. f) bis i) Bruchbilder der Prüfkörper „Gruppe 4“. In Gelb die fünfte Bruchstelle.

### Bruchlasten

Die Auswertung der Versuchsergebnisse wurde nach DIN EN 14358:2016 [35] durchgeführt. Weiterhin werden in diesem Forschungsvorhaben die  $R_k$  Werte für die obengenannte Versuchsreihe errechnet. Es ist zu beachten, dass für eine generalisierende belastbare Definition der  $R_{k,0,05}$ - Werte für die Holzkeildolle eine höhere Grundgesamtheit bei den Versuchen notwendig wäre. In der Tabelle 4-21 und Diagramm 4-6 ist eine Zusammenfassung der Festigkeitseigenschaften der Holzkeildolle und Holzdolle gegeben.

Aus dem Vergleich der Ergebnisse der Abscherbeanspruchung zwischen den Verbindungen mit der Holzdolle und der Holzkeildolle als Verbindungsmittel (vgl. Diagramm 4-5) ergeben sich folgende Überlegungen:

- Der Mittelwert sowie die charakteristischen Werte der Tragfähigkeit für Verbindungen mit der Holzkeildolle liegen unter den Werten der Tragfähigkeit für Verbindungen mit einer Holzdolle.
- Die charakteristische Tragfähigkeit für Verbindungen mit der Holzkeildolle liegt ca. 15-20% unter den Verbindungen mit der Holzdolle.
- Die Ergebnisse der Verbindungen mit einer Holzkeildolle zeigen eine größere Streuung der Ergebnisse auf als die Ergebnisse aus den Prüfungen mit einer Holzdolle. Dieses Phänomen lässt sich auf die Imperfektionen und die Variabilität der Eigenschaften der Verkeilung zurückzuführen.

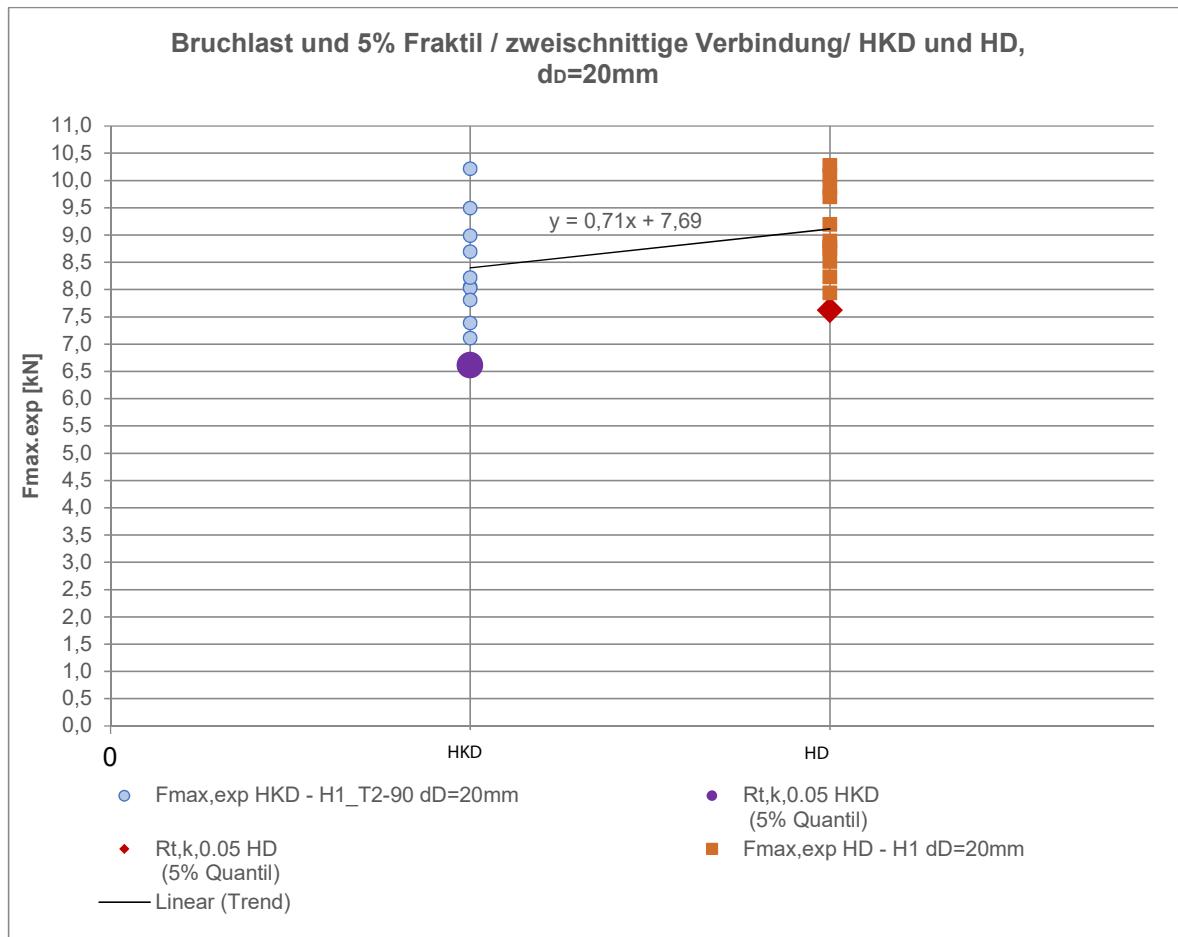
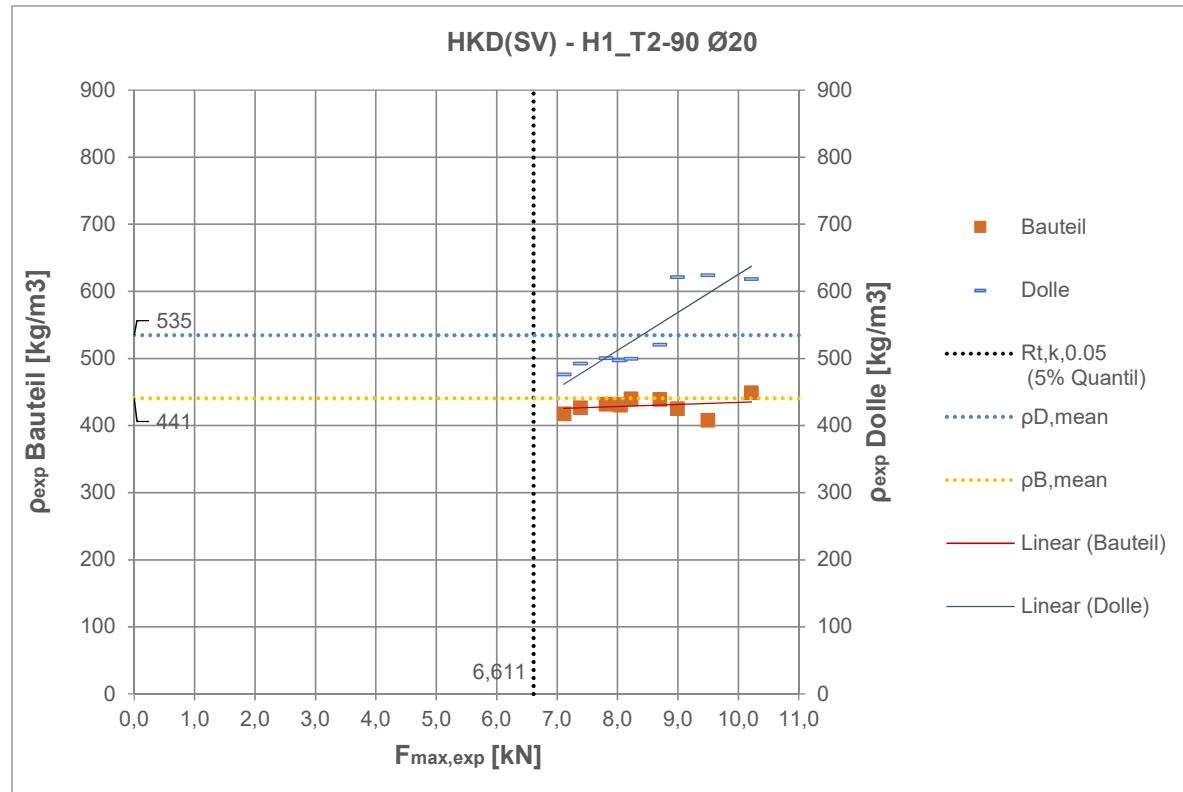


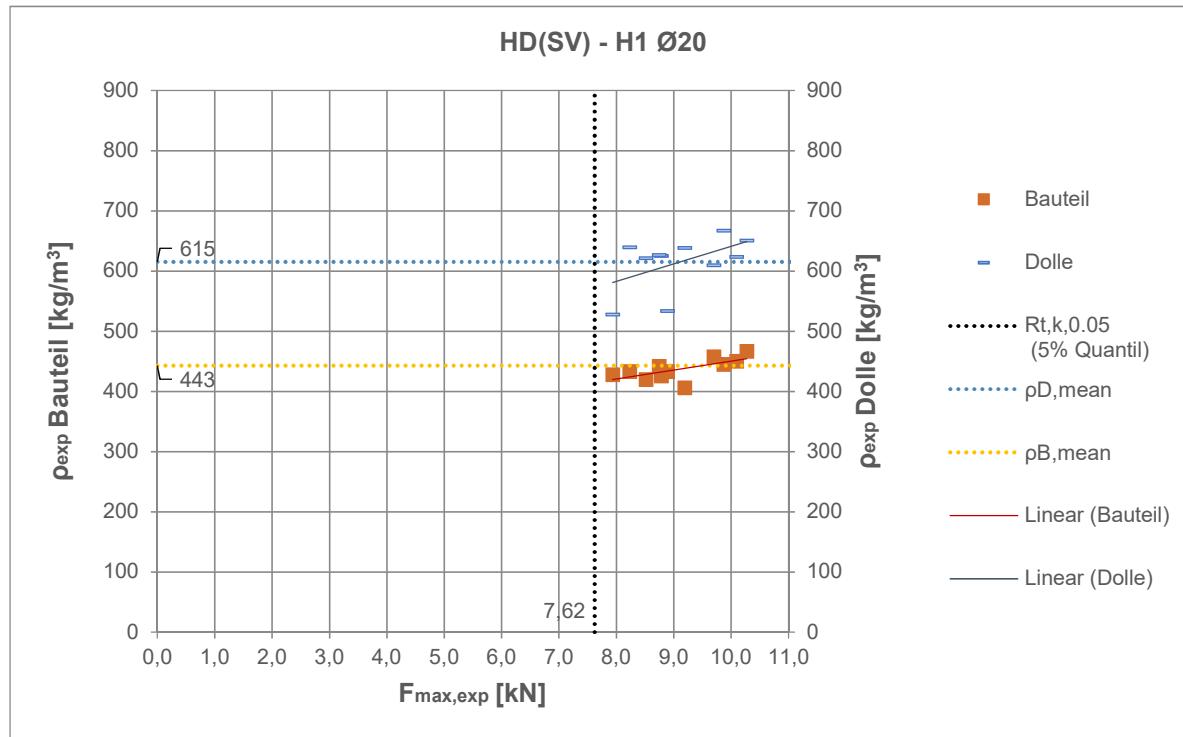
Diagramm 4-5 Vergleich zwischen den experimentellen und charakteristischen Werten der Tragfähigkeit für Holzdolle und für Holzkeildolle unter Abscherbeanspruchung.

Tabelle 4-21 Charakteristische Festigkeitseigenschaften und Rohdichten der getesteten Holzkeildollen.

Serie	Prüfkörper	Prüfkörperteile	F <sub>max</sub> [kN]	5% Quantil R <sub>t,0,05</sub> [kN]	Mittelwert B ρ <sub>B,mean</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	5% Quantil B ρ <sub>B,k</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	Mittelwert D ρ <sub>D,mean</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	5% Quantil D ρ <sub>D,k</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	Δρ <sub>20,65</sub> , B-D,mean [kg/m <sup>3</sup> ]					
Holzkeildolle (HKD)	SV1_20_H1_T2-90_1	SV1_20_H1_T2-90_1 a	8,044	6,611	440,66	395,78	534,65	408,14	70					
		SV1_20_H1_T2-90_1 b							176					
		SV1_20_H1_T2-90_1 c							32					
	SV1_20_H1_T2-90_2	SV1_20_H1_T2-90_2 a	8,991						166					
		SV1_20_H1_T2-90_2 b							74					
		SV1_20_H1_T2-90_2 c							198					
	SV1_20_H1_T2-90_3	SV1_20_H1_T2-90_3 a	8,023						45					
		SV1_20_H1_T2-90_3 b							160					
		SV1_20_H1_T2-90_3 c							88					
	SV1_20_H1_T2-90_4	SV1_20_H1_T2-90_4 a	10,214						192					
		SV1_20_H1_T2-90_4 b							107					
		SV1_20_H1_T2-90_4 c							199					
Holzdolle (HD)	SV1_20_H1_T2-90_5	SV1_20_H1_T2-90_5 a	7,385						160					
		SV1_20_H1_T2-90_5 b							73					
		SV1_20_H1_T2-90_5 c							184					
	SV1_20_H1_T2-90_6	SV1_20_H1_T2-90_6 a	9,491						184					
		SV1_20_H1_T2-90_6 b							230					
		SV1_20_H1_T2-90_6 c							167					
	SV1_20_H1_T2-90_7	SV1_20_H1_T2-90_7 a	7,111						199					
		SV1_20_H1_T2-90_7 b							107					
		SV1_20_H1_T2-90_7 c							192					
	SV1_20_H1_T2-90_8	SV1_20_H1_T2-90_8 a	7,810						160					
		SV1_20_H1_T2-90_8 b							73					
		SV1_20_H1_T2-90_8 c							184					
Holzdolle (HD)	SV1_20_H1_T2-90_9	SV1_20_H1_T2-90_9 a	8,222						199					
		SV1_20_H1_T2-90_9 b							107					
		SV1_20_H1_T2-90_9 c							192					
	SV1_20_H1_T2-90_10	SV1_20_H1_T2-90_10 a	8,697						167					
		SV1_20_H1_T2-90_10 b							199					
		SV1_20_H1_T2-90_10 c							107					
	SV1_20_H1_1	SV1_20_H1_1 a	7,937						160					
		SV1_20_H1_1 b							73					
		SV1_20_H1_1 c							184					
	SV1_20_H1_2	SV1_20_H1_2 a	9,193						199					
		SV1_20_H1_2 b							107					
		SV1_20_H1_2 c							192					
	SV1_20_H1_3	SV1_20_H1_3 a	9,696						160					
		SV1_20_H1_3 b							73					
		SV1_20_H1_3 c							184					
	SV1_20_H1_4	SV1_20_H1_4 a	8,783						160					
		SV1_20_H1_4 b							73					
		SV1_20_H1_4 c							184					
	SV1_20_H1_5	SV1_20_H1_5 a	8,746						199					
		SV1_20_H1_5 b							107					
		SV1_20_H1_5 c							192					
	SV1_20_H1_6	SV1_20_H1_6 a	9,871						160					
		SV1_20_H1_6 b							73					
		SV1_20_H1_6 c							184					
	SV1_20_H1_7	SV1_20_H1_7 a	10,093						160					
		SV1_20_H1_7 b							73					
		SV1_20_H1_7 c							184					
	SV1_20_H1_8	SV1_20_H1_8 a	8,515						199					
		SV1_20_H1_8 b							107					
		SV1_20_H1_8 c							192					
	SV1_20_H1_9	SV1_20_H1_9 a	8,230						160					
		SV1_20_H1_9 b							73					
		SV1_20_H1_9 c							184					
	SV1_20_H1_10	SV1_20_H1_10 a	8,887						160					
		SV1_20_H1_10 b							73					
		SV1_20_H1_10 c							184					
	SV1_20_H1_11	SV1_20_H1_11 a	10,271						160					
		SV1_20_H1_11 b							73					
		SV1_20_H1_11 c							184					



a)



b)

**Diagramm 4-6 Zusammenhang zwischen Bruchlast ( $F_{max,exp}$ ) und Bauteil- und Dollenrohdichte**

### Verschiebungsmoduln

In der Tabelle 4-22 sind die Bruchlasten und Verschiebungsmoduln der einzelnen Versuchskörper für HD und HKD aufgeführt. Die Verschiebungsmoduln sind nach DIN 26891:1991-07 [40] berechnet. Die geschätzte Höchstlast  $F_{est}$  ist für die HD nach dem Berechnungsmodell von Blaß [13] bestimmt. Die geschätzte Höchstlast  $F_{est}$  ist für die HKD nach dem Berechnungsmodell von Perria (vgl. Abschnitt 5.2) bestimmt. Diese erfüllen, bis auf zwei Ausnahmen, die Anforderung der Norm, dass die Mittelwerte der Höchstlasten der Prüfungen bis um 20% oberhalb vom geschätzten Wert  $F_{est}$  liegen. Es folgt daraus, dass die Werte der Höchstlasten für die Berechnung des Verschiebungsmoduls für die Holzkeildolle nach Perria (vgl. Abschnitt 5.2), ebenso wie die Werte für die Holzdolle nach Blaß [13] verwendet werden können.

**Tabelle 4-22 Bruchlasten und Verschiebungsmoduln der HKD und HD unter Abscherbeanspruchung**

Serie	Bauteil	$V(F_{max,exp})$	$F_{max,exp}$	$F_{est}$ $=F_{v,Rkest,Perria}$	Beding.: bis +20% vom $F_{est}$	$F_{est}$ $=F_{v,Rkest,Blaß}$	Beding.: bis +20% vom $F_{est}$	$V_{01}$	$V_i=V_{04}$	$K_{ser}$	$K_{ser,mean}$
		[mm]	[kN]	[kN]		[kN]		[mm]	[mm]	[kN/mm]	[kN/mm]
HKD	SV1_20_H1_T2-90_1	1,72	8,04	7,42	wahr	8,83	wahr	0,05	0,47	5,30	12,57
	SV1_20_H1_T2-90_2	0,94	8,99	7,69	wahr	9,15	wahr	0,01	0,15	16,48	
	SV1_20_H1_T2-90_3	0,94	8,02	7,83	wahr	9,31	wahr	-0,003	0,08	28,30	
	SV1_20_H1_T2-90_4	1,34	10,21	7,69	falsch (32,8%)	9,15	wahr	0,02	0,20	12,82	
	SV1_20_H1_T2-90_5	1,18	7,38	7,41	wahr	8,81	wahr	0,02	0,23	10,58	
	SV1_20_H1_T2-90_6	1,62	9,49	7,50	falsch (26,5%)	8,92	wahr	0,04	0,28	9,37	
	SV1_20_H1_T2-90_7	0,92	7,11	7,46	wahr	8,87	wahr	0,006	0,17	13,65	
	SV1_20_H1_T2-90_8	2,23	7,85	7,82	wahr	9,30	wahr	0,015	0,216	11,67	
	SV1_20_H1_T2-90_9	1,63	8,22	7,71	wahr	9,17	wahr	0,03	0,30	8,56	
	SV1_20_H1_T2-90_10	1,48	8,70	7,51	wahr	8,93	wahr	0,04	0,29	9,01	
H	SV1_20_H1_1	1,2	7,94			9,13	wahr	0,03	0,31	9,79	13,21
	SV1_20_H1_2	1,36	9,19			9,04	wahr	-0,015	0,12	20,10	
	SV1_20_H1_3	1,59	9,70			9,19	wahr	0,01	0,28	10,21	
	SV1_20_H1_4	1,76	8,79			9,08	wahr	0,0003	0,17	16,05	
	SV1_20_H1_5	1,66	8,75			9,11	wahr	0,025	0,25	12,14	
	SV1_20_H1_6	0,99	9,87			8,97	wahr	0,06	0,21	17,94	
	SV1_20_H1_7	2,10	10,09			9,16	wahr	0,14	0,52	7,23	
	SV1_20_H1_8	1,49	8,51			8,88	wahr	-0,008	0,11	22,57	
	SV1_20_H1_9	1,8	8,23			9,20	wahr	0,05	0,36	8,90	
	SV1_20_H1_10	1,53	8,89			8,91	wahr	0,08	0,35	9,90	
	SV1_20_H1_11	1,68	10,27			9,27	wahr	0,005	0,27	10,49	

### 4.3.6 Schlussfolgerung

In der durchgeführten Versuchsreihe zeigt die Holzkeildolle eine geringere Schubtragfähigkeit als die Holzdolle ohne Verkeilung. Der Grund liegt in der unterschiedlichen Geometrie und den Komponenten der stiftförmigen Verbindungsmittel. Diese bewirken erstens eine Veränderung in der Verteilung der Kräfte im Stift und zweitens eine Veränderung der Kontaktfläche zwischen Bauteil und Dolle. Diese Phänomene werden aufgrund folgender Hypothesen verursacht.

- 1) Die Stifte sind im Bohrloch während der Belastung allgemein auf Biegung beansprucht. In den Endbereichen ist die obere Hälfte des Stiftes auf Zug und die untere Hälfte auf Druck belastet (parallel zur Faser des Bauteils). Die HD verteilt die Druck- und Zugkräfte entlang der gesamten Dollenlänge. Die HKD weist aufgrund der Nut eine Querschnittsschwächung in der Neutralzone auf. Die Querschnittsfläche für die Aufnahme der Schubkräfte wird durch die Nut reduziert und bei der HKD kommt es ggf. zum früheren Schubversagen (vgl. Abbildung 4-12).
- 2) Die Stifte sind im Bohrloch während der Belastung der Verbindung auf Biegung beansprucht. Die Klemmwirkung verleiht der HKD die Eigenschaft, axiale Zugkräfte während der Belastung aufzunehmen.

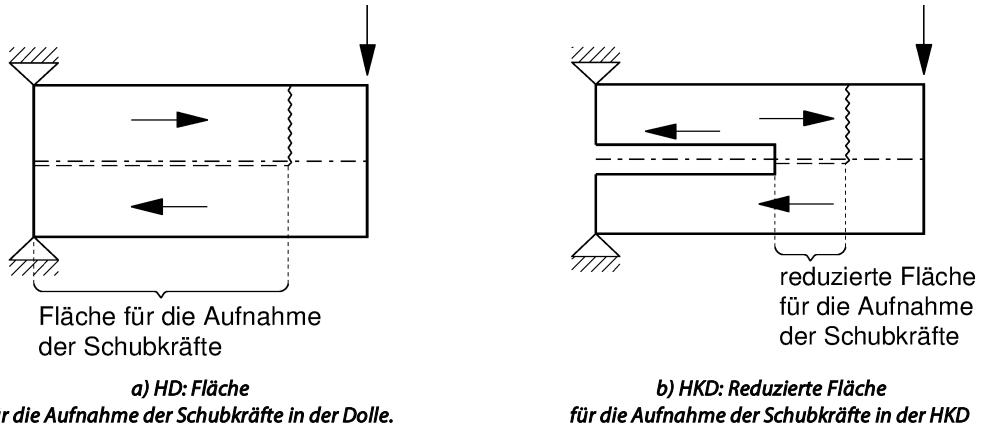


Abbildung 4-12 Hypothese für die Aufnahme der Schubkräfte in den Scherversuchen SV: a) Holzdolle und b) Holzkeildolle

Abbildung 4-13-a), b) zeigt einen Vergleich zwischen HD und HKD als vereinfachtes statisches Modell.

Die Holzdolle ist - mechanisch gesehen - ein verschieblicher Balken (in axialer Richtung). Während der Belastung ist der Balken auf Biegung beansprucht und kann sich im Bohrloch axial verschieben. Es ist somit überwiegend ein Anteil an axialer Zugkraft im Biegezugbereich aufgrund der Biegung in der Dolle sowie ein geringer Anteil an Reibung der HD im Bohrloch (vgl. Abbildung 4-13-c)) vorhanden.

Die HKD erhält dagegen durch die Klemmwirkung - mechanisch gesehen - eine Unverschieblichkeit bzw. zumindest eine sehr steife horizontale Festhaltung in axialer Richtung. Diese verursacht eine zusätzliche axiale Zugkraft in der HKD. Bildet man die Summe der axialen Zugkraft aus Biegung und Zugbelastung, verschiebt sich die Spannungsnulllinie in die obere Hälfte des Querschnitts. Im Zugbereich erfolgt eine Erhöhung der zugbeanspruchten Fasern. Im Druckbereich findet eine Reduzierung der Druckkraft statt. Aufgrund der Kombination aus Biegung und Zug wird ein früheres Zugversagen der Fasern verursacht (vgl. Abbildung 4-13-d)).

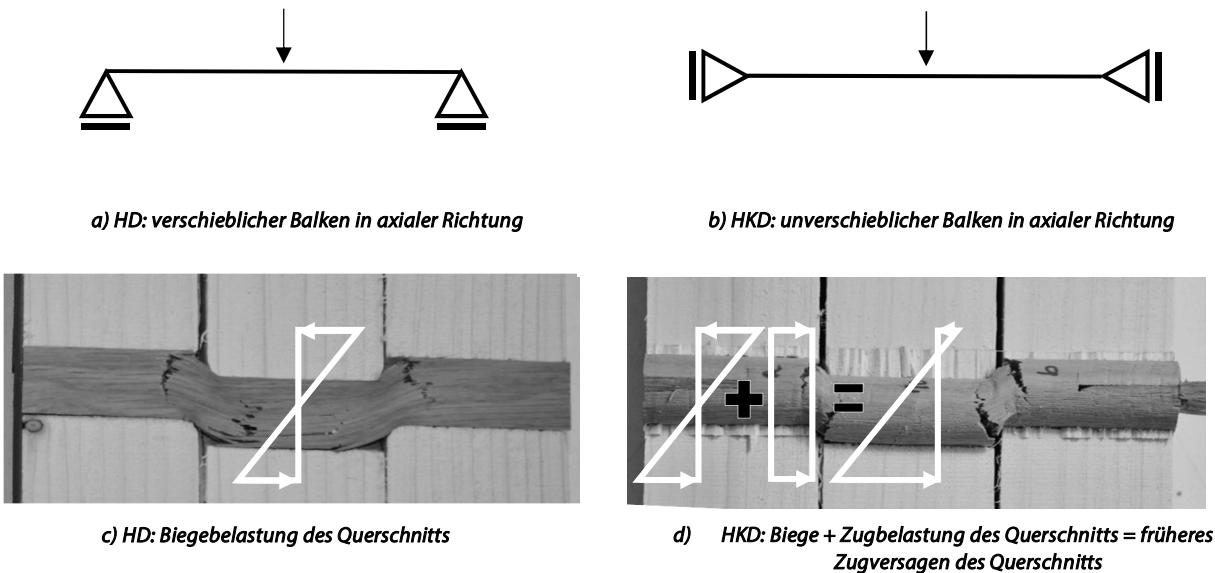


Abbildung 4-13 Statische Schemata der Holzstifte a) Holzdolle (HD) und b) Holzkeildolle (HKD) und Belastung im Stiftmitte der c) Holzdolle und d) Holzkeildolle

## 5 Analytische Charakterisierung der HKD

In diesem Abschnitt werden auf Basis der durchgeführten experimentellen Charakterisierung geeignete Nachweismodelle für die Holzkeildolle auf Zug- und Abscherbeanspruchung präsentiert [41].

### 5.1 Modellansatz/Nachweis für die Holzkeildolle bei Zugbeanspruchung

Um axiale Zugkräfte zwischen Holzkeildolle und Bauteil übertragen zu können, muss eine vorhandene und anrechenbare Kontaktfläche bestehen. Dabei wird zwischen zwei Arten der Lastabtragung unterschieden (Abbildung 5-1):

- 1) Tragwirkung durch Spreizung infolge Verkeilung (Spreizwirkung)
- 2) Tragwirkung durch Mantelreibung

Die Tragwirkung der Verkeilung (Spreizwirkung) (1) ist unabhängig von der Fertigung der HKD, jedoch abhängig von der Holzart (bzw. der Holzkombination) und dem Spreizwinkel  $\alpha$ . Die Tragwirkung der Mantelreibung (2) ist abhängig von dem Fertigungsprozess und der Holzart (bzw. der Holzkombination) und kann nur gewährleistet werden, wenn die Fertigung ohne Abweichungen zur geforderten Geometrie (Imperfektionen) erfolgt. Da dies nicht garantiert werden kann, ist die Mantelreibung im vorgeschlagenen Nachweis nicht berücksichtigt. Das folgende Modell berücksichtigt eine idealisierte Verkeilung und deren aktivierte Reibung.

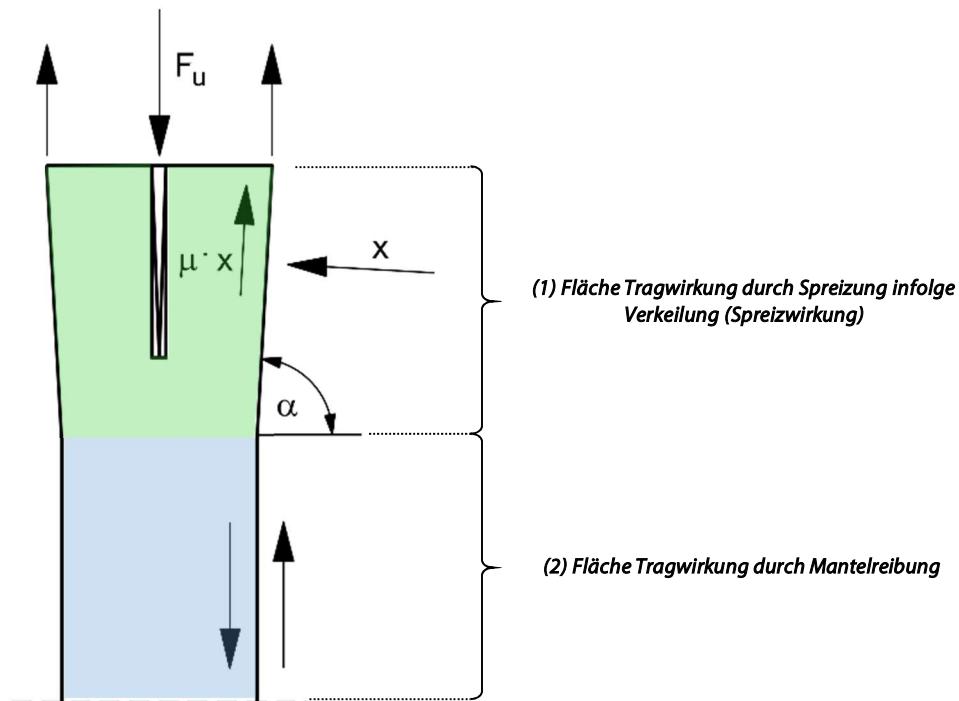


Abbildung 5-1 Mechanisches Modell der Holzkeildolle unter Zugbeanspruchung. Grün zeigt die aktivierte Fläche infolge der Verkeilung (Spreizwirkung). Hellblau ist die Fläche der vernachlässigen Mantelreibung.

Zur Entwicklung eines mechanischen Modells für die Holzkeildolle bei Zugbeanspruchung wurde das Bettungsmodulverfahren aus dem Grundbaumodell für Pfahlgründungen als Basis verwendet. Der Zusammenhang zwischen Pfahlverschiebung in  $y$ -Richtung und der Horizontalspannung  $\sigma_h$  gilt dabei zu  $\sigma_h = k_s \cdot y$  [42].

Aus den Versuchsergebnissen V1 geht hervor, dass durch die Spreizung eine Verschiebung  $v(z)$  der Dolle und Bauteil entlang der Fläche (1), Tragwirkung durch Spreizung infolge Verkeilung, entsteht. Die maximale Verschiebung des Systems befindet sich an der Bauteiloberfläche. Diese ist als  $v(z = 0) \neq 0$  definiert. Die Verschiebung hat einen linearen Verlauf und reduziert sich entlang der z-Achse in Richtung des Mittelpunkts der Dolle. Bei einer Tiefe  $z = t_w$  ist diese Verschiebung Null. Dies ist durch numerische Simulationen festgestellt worden und wird im Rechenmodell mit  $v(z \geq t_w) = 0$  definiert.

Ebenso wie die Verschiebung hat die Spannung  $\sigma_N(z)$  einen linearen Verlauf. Die maximale Spannung befindet sich an der Stelle der größten Spreizung an der Bauteiloberfläche und sie läuft mit abnehmender Spreizung in Richtung des Mittelpunkts der Dolle auf null aus. Die Spannungsverteilung an der Bauteiloberfläche ist definiert wie bei Spörk in [43; 44] und in Abbildung 5-3 dargestellt: Links oben die reale Spannungsverteilung und rechts oben die idealisierte Spannungsverteilung. Bei einer Tiefe  $z \geq t_w$  ist die Spannung Null. Ab dieser Tiefe findet keine Lastübertragung zwischen dem Verbindungsmittel und dem Bauteil mehr statt. Die allgemeine Spannungsverteilung  $\sigma_N(z)$  in der HKD ist definiert in Gl. 14.

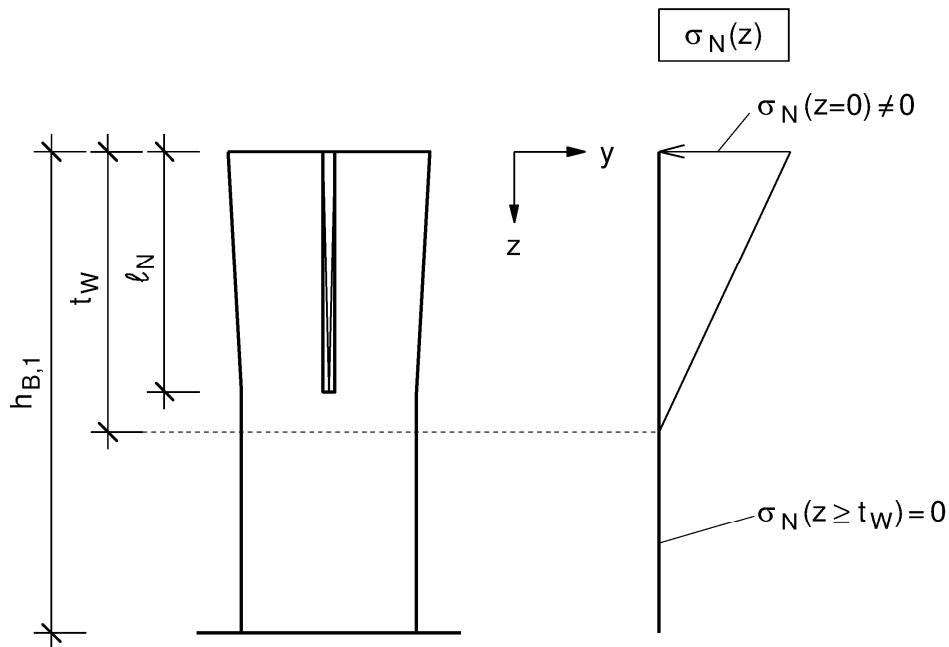


Abbildung 5-2 Mechanisches Modell der Holzkeildolle. Verteilung der Spannung entlang der z-Achse aufgrund der Verkeilung.

$$(x, y, z) \leftrightarrow (u, v, w)$$

$$\sigma_N(z) = k_s \cdot v(z) \quad \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \quad \text{Gl. 14}$$

Mit:

$$\sigma_N(z = 0) \neq 0 \quad \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$$

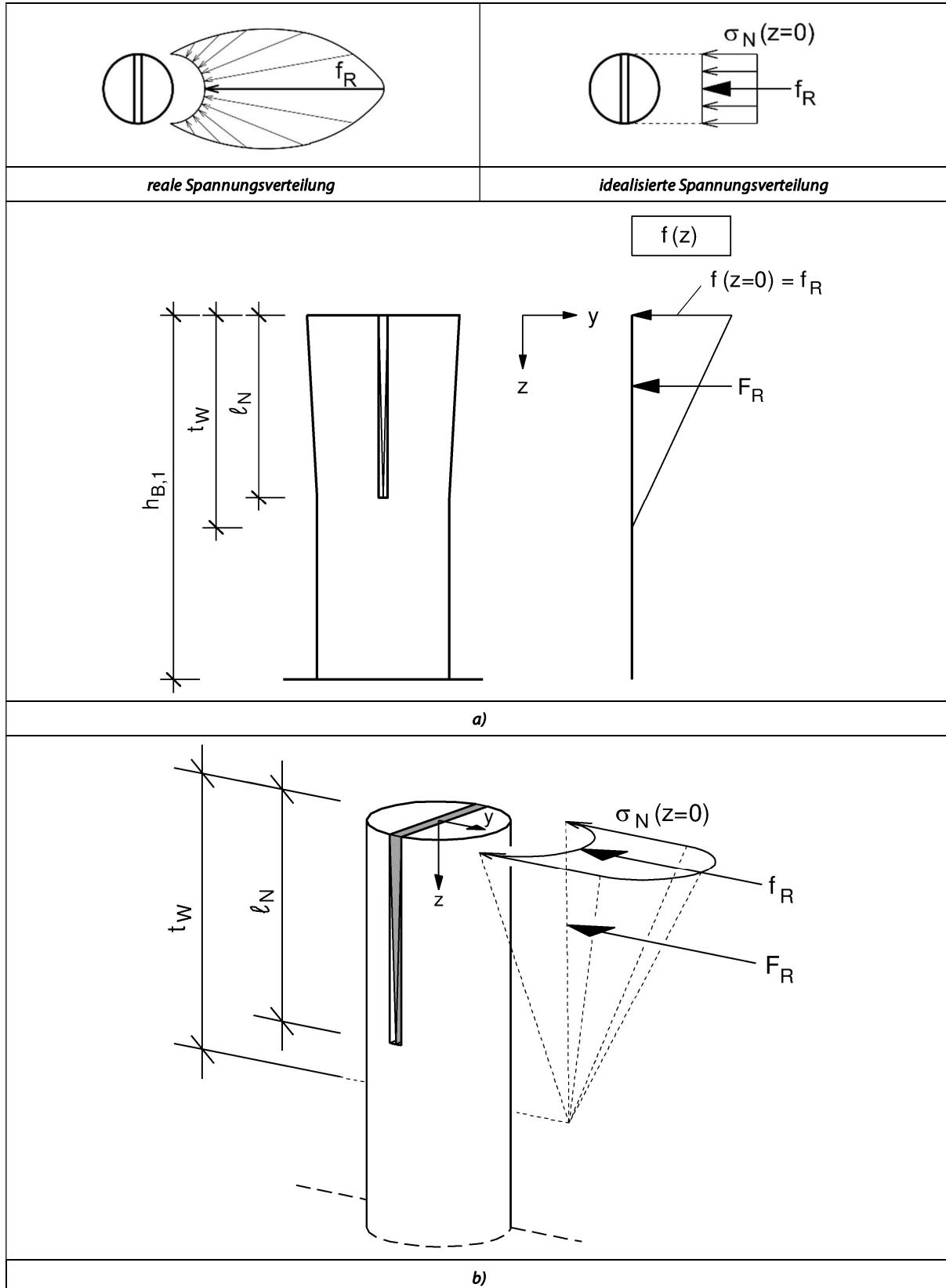
$$\sigma_N(z \geq t_w) = 0 \quad \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$$

$v(z = 0) \neq 0$  Spreizung auf der Bauteiloberfläche [mm]

$v(z \geq t_w) = 0$  Verschiebungswert bei einer Tiefe  $t_w$  [mm]

$k_s$  = Bettungsmodul (aus exp. Ergebnisse)  $\left[ \frac{N}{mm^3} \right]$

$t_w$  = Tiefe der Keilwirkung (aus numerischer Simulation) [mm]



**Abbildung 5-3** Mechanisches Modell der Holzkeildolle. a) oben: Reale und idealisierte Spannungsverteilung auf der Bauteiloberfläche. a) unten: Zweidimensionale Darstellung der Spannungsverteilung auf der Bauteiloberfläche  $\sigma_N(z=0) \neq 0$  und folgende Lastverteilung  $f_R(z)$  entlang der  $z$ -Achse; b) dreidimensionale Darstellung der Spannungsverteilung in der Tiefe der Keilwirkung und resultierende Kraft  $F_R$ .

Die resultierende Kraft  $F_R$  (Abbildung 5-3-b), die durch die Holzkeildolle in das Bauteil eingeleitet wird, kann wie folgt berechnet werden: Die idealisierte Spannungsverteilung mit  $\sigma_N(z = 0) \neq 0$  als Konstante entlang des Durchmessers  $d_D$  der Verbindungsmitte (Abbildung 5-3-a) wird berücksichtigt. Die resultierende Lastverteilung auf der Bauteilloberfläche wird als  $f_R$  definiert (Gl. 15 und Gl. 16). Entlang der z-Achse nimmt der Wert  $f_R$  linear ab, bis zu einer Tiefe  $z = t_W$ , in der die Spannung  $\sigma_N(z \geq t_W) = 0$  und die Lastverteilung  $f_R(z \geq t_W) = 0$  sind. Unter Berücksichtigung einer idealisierten dreieckigen Lastverteilung entlang der z-Achse kann die resultierende Kraft  $F_R$  wie in Gl. 17 berechnet werden.

$$f(z = 0) = f_R \quad \left[ \frac{N}{mm} \right] \quad \text{Gl. 15}$$

$$f_R = \sigma_N(z = 0) \cdot d_D \quad \left[ \frac{N}{mm} \right] \quad \text{Gl. 16}$$

$$F_R = 0,5 \cdot t_W \cdot f_R \quad [N] \quad \text{Gl. 17}$$

Wird die eine Kraft auf die Spreizungsfläche der Dolle aufgebracht, lässt sich daraus die senkrecht zur Fläche wirkende Kraft berechnen, die nach dem Coulombschen Reibungsgesetz die Reibung an dieser Fläche aktiviert (vgl. Abbildung 5-4). Für die Zugtragfähigkeit der Holzkeildolle ist die Haftreibung maßgebend. Das Erreichen des Gleitzustands (vgl. Abschnitt 3.5.5 und Diagramm 3-4) wird als Versagenspunkt der Verbindung definiert.

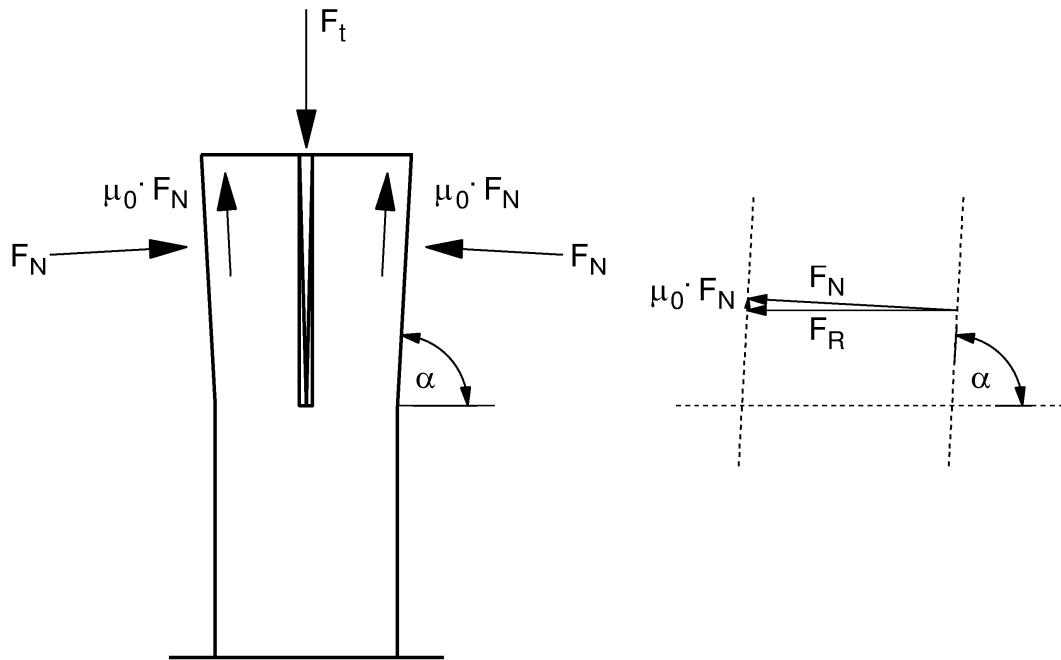


Abbildung 5-4 Mechanisches Modell der Holzkeildolle unter axialem Zugbeanspruchung. Gleichgewicht der Kräfte infolge der Verkeilung und der Zugbeanspruchung.

Mit Bezug auf Abbildung 5-4 kann angenommen werden, dass  $\alpha \cong 90^\circ$  ist. Es ergibt sich:

$$F_R \cong F_N \quad [N] \quad \text{Gl. 18}$$

$$F_N \cdot \mu_0 \cong F_R \cdot \mu_0 \quad [N] \quad \text{Gl. 19}$$

$$F_t \cong 2 \cdot \mu_0 \cdot F_R \quad [N] \quad \text{Gl. 20}$$

Daraus folgt, dass der charakteristische Wert der Tragfähigkeit einer Holzkeildolle bei axialem Zugbeanspruchung durch folgende Gleichung (Gl. 21) definiert ist.

#### Nachweis Holzkeildolle unter Zugbeanspruchung:

$$F_t = F_{t,Rk} = \mu_0 \cdot t_W \cdot k_S \cdot v(z = 0) \cdot d_D \quad [N] \quad \text{Gl. 21}$$

Mit:

- $\mu_0$  Haftriebungskoeffizient Holz-Holz [45] [-] Gl. 22  
 $\mu_{0,H1} = 0,5$  für H1  
 $\mu_{0,H2} = 0,6$  für H2  
 $\mu_{0,H3} = 0,4$  für H3
- $t_w$  Tiefe der Keilwirkung [-] Gl. 23  
 Die Tiefe der Keilwirkung wurde durch FE-Simulationen festgestellt:  
 $t_w = 37,5$  [mm] Gl. 25
- $d_D$  Durchmesser der Dolle
- $v(z = 0)$  Spreizung auf der Oberfläche des Bauteils  
 Die maximale Spreizung  $v(z = 0)$  konnte in den Versuchen für die HKD  $d_D = 20 \text{ mm}$  gemessen werden (vgl. 4.1). Für die HKD mit  $d_D = 30 \text{ mm}$  liegen keine Messergebnisse der Spreizung vor. Sie wurden je nach Holzkombination (H1, H2, H3) im folgenden Abschnitt 5.1.1 berechnet. Es resultieren folgenden Verschiebungswerte  $v(z = 0)$ :
 

$v(z = 0) = 0,8$	für H1, $d_D = 20 \text{ mm}$ (Messwert)	[mm]	Gl. 26
$v(z = 0) = 0,59$	für H1, $d_D = 30 \text{ mm}$ (berechneter Wert)	[mm]	Gl. 27
$v(z = 0) = 0,2$	für H2, $d_D = 20 \text{ mm}$ (Messwert)	[mm]	Gl. 28
$v(z = 0) = 0,12$	für H2, $d_D = 30 \text{ mm}$ (berechneter Wert)	[mm]	Gl. 29
$v(z = 0) = 0,8$	für H3, $d_D = 20 \text{ mm}$ (Annahme wie H1)	[mm]	Gl. 30
$v(z = 0) = 0,64$	für H3, $d_D = 30 \text{ mm}$ (berechneter Wert)	[mm]	Gl. 31
- $k_s$  Bettungsmoduln  
 Die Ermittlung des  $k_s$  Wertes erfolgt durch die Zurückrechnung der Ergebnisse aus den experimentellen Versuchen. Dabei sind die Holzkombination und der Winkel der Beanspruchung zu den Fasern berücksichtigt (vgl. Absatz 5.1.1):
 

$k_{s,H1} = 6,28$	für H1	$\left[ \frac{N}{mm^3} \right]$	Gl. 32
$k_{s,H2} = 46,4$	für H2	$\left[ \frac{N}{mm^3} \right]$	Gl. 33
$k_{s,H3} = 6,28$	für H3	$\left[ \frac{N}{mm^3} \right]$	Gl. 34

**Tabelle 5-1 Zusammenfassung der im Nachweis (Gl. 21) enthaltenen Parameter für die Reparaturverbindung mit Holzkeildollen unter axialem Zugbeanspruchung.**

Parameter	Bedingung	Parameter Beschreibung, Wert	Einheit
$\mu_0$	H1	$\mu_{0,H1} = 0,5$	[-]
	H2	$\mu_{0,H2} = 0,6$	
	H3	$\mu_{0,H3} = 0,4$	
$t_w$		$t_w = 37,5$	[mm]
$k_s$	H1	$k_{s,H1} = 6,28$	$\left[ \frac{N}{mm^3} \right]$
	H2	$k_{s,H2} = 46,40$	
	H3	$k_{s,H3} = 6,28$	
$v(z = 0)$	$d_D = 20$		[mm]
	H1	$v(z = 0) = 0,8$	[mm]
	H2	$v(z = 0) = 0,2$	
	H3	$v(z = 0) = 0,8$	
	$d_D = 30$		[mm]
	H1	$v(z = 0) = 0,59$	[mm]
	H2	$v(z = 0) = 0,12$	
	H3	$v(z = 0) = 0,64$	
$d_D$		$d_D = 20$ $d_D = 30$	[mm]

### 5.1.1 Hintergründe für den Modellansatz der Holzkeildolle unter Zugbeanspruchung

Der Modellnachweis für die Holzkeildolle unter axialer Zugbeanspruchung erfolgt unter Beachtung der Ergebnisse aus der Versuchsreihe (V1). Die in der Tabelle 5-1 enthaltenen Parameter sind das Ergebnis von Beobachtungen in den Versuchskampagnen TV1 und V1, Literatur und numerischen oder mathematischen Berechnungen. Die Parameter werden im Folgenden erläutert.

- Der Haftreibungskoeffizient Holz-Holz  $\mu_0$  ist aus der Literatur für einen Bereich der Haftreibung  $\mu_0 = 0,4$  bis  $\mu_0 = 0,6$  ermittelt. Die Haftreibungskoeffizienten sind an die Prüfbeobachtungen angepasst worden und für jede Holzkombination in Gl. 22 (H1) ; Gl. 23 (H2) und Gl. 24 (H3) festgelegt. Die Definition beruht zusätzlich auf Ableitungen aus Untersuchungen über die Abhängigkeit der Lochleibungsfestigkeit von der Oberflächenrauhigkeit von Stabdübel von Sjödin [21].
- $t_w$  Tiefe der Keilwirkung. Aus den Versuchen heraus entstand die Erkenntnis, dass die Fertigung von Dolle und Bohrloch Schwankungen unterliegt, durch die ein Reibungswiderstand im nicht-verkeilten Dollenbereich nicht verlässlich aktiviert wird (die Fläche der Tragwirkung durch Mantelreibung (2)). Daraus folgt, dass nur der eingebrachte Keil in der Dolle den Reibungswiderstand im Bereich der Verkeilung aktiviert (die Fläche Tragwirkung durch Verkeilung (1)). Dieser Bereich wurde mittels FE-Simulation (vgl. 3.6.3) analysiert und anschließend festgelegt. Unabhängig der Holzkombination wurde der Wert der Tiefe der Keilwirkung für HKD mit einer Tiefe der Nut  $l_N = 30 \text{ mm}$  als Konstant  $t_w = 37,5$  festgelegt (vgl. Gl. 25).
- Die maximale Spreizung auf der Oberfläche des Bauteils  $\nu(z = 0)$  konnte in den Versuchen mit Holzkeildollen  $d_D = 20 \text{ mm}$  gemessen werden. Für die Werte der Holzkeildollen mit  $d_D = 30 \text{ mm}$  lagen keine Messergebnisse vor. Sie wurden je Holzkombination (H1, H2, H3) wie folgt ermittelt.

Der Wert des Bettungsmoduls  $k_s$  und der Wert des Haftreibungskoeffizienten  $\mu_0$  sind als feste Werte definiert. Da die Zahlenwerte innerhalb einer Holzkombination konstant sind, sind diese nicht relevant. Die Tiefe der Keilwirkung  $t_w$  wird aus Gl. 25 entnommen. Es wurde die Hypothese formuliert, dass innerhalb einer Holzkombination die Spreizkraft des Keils unabhängig von dem Dollendurchmesser gleichbleibt. Bei einem größeren Dollendurchmesser wird durch die Spreizung eine größere Fläche belastet. Bei gleicher Steifigkeit des Materials führt eine gleichbleibende Kraft auf einer größeren Fläche zu einer geringeren Verformung. Die Veränderung von  $F_{U(d=30)}$  im Vergleich zu  $F_{U(d=20)}$  ist unter diesen Annahmen ausschließlich auf eine Veränderung von  $\nu(z = 0)$  zurückzuführen. Es wird für die HKD mit  $d_D = 20 \text{ mm}$  die relative Abweichung der Berechnungsergebnisse zu den Versuchsergebnissen folgend ermittelt.

$$\Delta_{d=20} = \frac{F_{t(d=20)} - F_{max,exp,HKD(d=20)}}{F_{max,exp,HKD(d=20)}} \quad [\%] \quad \text{Gl. 35}$$

mit:

$$F_{max,exp,HKD(d=20)} \quad \text{Zugkraft aus Versuchen HKD } d_D = 20 \text{ mm} \quad [N]$$

$$F_{t(d=20)} \quad \text{nach Gl. 21 berechnete Bruchlast HKD } d_D = 20 \text{ mm} \quad [N]$$

Aus den oben genannten Annahmen folgt:

$$\Delta_{d=20} = \frac{F_{t(d=20)} - F_{max,exp,HKD(d=20)}}{F_{max,exp,HKD(d=20)}} = \Delta_{d=30} = \frac{F_{t(d=30)} - F_{max,exp,HKD(d=30)}}{F_{max,exp,HKD(d=30)}} \quad [\%] \quad \text{Gl. 36}$$

Mit:

$$F_{max,exp,HKD(d=30)} \quad \text{Zugkraft aus Versuchen der HKD } d_D = 30 \text{ mm} \quad [N]$$

$$F_{t(d=30)} \quad \text{zu berechnende Bruchlast für HKD } d_D = 30 \text{ mm} \quad [N]$$

Umstellung der Gl. 36 nach der zu berechnenden Bruchlast:

$$F_{t(d=30)} = \frac{F_{t(d=20)} - F_{max,exp,HKD(d=20)}}{F_{max,exp,HKD(d=20)}} \cdot F_{max,exp,HKD(d=30)} + F_{max,exp,HKD(d=30)} \quad [N] \quad \text{Gl. 37}$$

Umstellen der Gl. 21 nach der gesuchten Verschiebung:

$$v(z = 0) = \frac{F_{t(d=30)}}{\mu_0 \cdot t_W \cdot k_s \cdot d_D \cdot \pi \cdot 0,5} \quad [mm] \quad \text{Gl. 38}$$

Es resultieren verschiedene Verschiebungswerte  $v(z = 0)$  für jede Holzkombination und Dollendurchmesser wie in Gl. 26 bis Gl. 31 aufgezeigt.

- Unter dem Bettungsmodul  $k_s$  versteht man den Widerstand, den ein Holzvolumen einer aufgebrachten Kraft entgegenseetzt. Um den auftretenden dreidimensionalen Spannungszustand berechnen zu können, ist die wertmäßige Bestimmung des Bettungsmoduls als Unbekannte erforderlich. Verschiedene Ansätze zur Ermittlung des Bettungsmoduls, von der Berücksichtigung der Faserrichtungen der aufeinandertreffenden Hölzer bis hin zu verschiedenen Interpolationsmöglichkeiten, wurden untersucht. In der Fachliteratur wurden nur bei Untersuchungen von Hübner und Spörk [43; 44; 46] für Laubholz und Blaß [47] für Nadelholz Werte für das Bettungsmodul bei Holz gefunden. Um den  $k_s$ -Wert genauer zu bestimmen, wurde er aus den experimentellen Versuchen zurückgerechnet. Dabei wurde die Holzkombination und der Winkel der Beanspruchung zu den Fasern berücksichtigt. Die Bettungsmoduli (Mittelwerte) in Gl. 32, Gl. 33, Gl. 34 sind aus Gl. 39 festgestellt.

$$k_s = \frac{F_{max,exp,HKD}}{\mu_0 \cdot t_W \cdot d_D \cdot \pi \cdot 0,5 \cdot v(z = 0)} \quad \left[ \frac{N}{mm^3} \right] \quad \text{Gl. 39}$$

Mit

$\mu_0$  Haftriebungskoeffizient Holz-Holz aus Gl. 22, Gl. 23, Gl. 24

$t_W$  Tiefe der Keilwirkung aus Gl. 25

$d_D$  Durchmesser der Dolle

$v(z = 0)$  Spreizungswerte  $v(z = 0)$  aus Gl. 26, Gl. 27, Gl. 28, Gl. 29, Gl. 30, Gl. 31

Mit einer kleinen Versuchsreihe wurde ergänzend das Bettungsmodul für Eiche- und Eschendollen nach DIN EN 383:2007 [48] bestimmt. Diese dienen zur Überprüfung der zuvor ermittelten  $k_s$ -Werte. Die Ergebnisse der Versuchsreihe wurden nach EN 383:2006 [25] ausgewertet.

$$k_{s,EICHE,90,EN383} = 48,11 \quad \text{Für Dollen aus Eiche unter Druckbeanspruchung senkrecht zum Faserverlauf, parallel zu den Jahrringen} \quad \left[ \frac{N}{mm^3} \right] \quad \text{Gl. 40}$$

$$k_{s,ESCHE,90,EN383} = 35,31 \quad \text{Für Dollen aus Esche unter Druckbeanspruchung senkrecht zum Faserverlauf, parallel zu den Jahrringen} \quad \left[ \frac{N}{mm^3} \right] \quad \text{Gl. 41}$$

Der Wert  $k_s$  aus der Gl. 40 stimmt grundsätzlich für die Holzkombination H2 (Gl. 33), nicht aber für die H1 (Gl. 32), obwohl in beiden Holzkombinationen eine Holzkeildolle aus Eiche eingebaut ist. Ebenso stimmt für die Holzkombination H3 der Wert  $k_s$  aus der Gl. 41 nicht mit dem Wert aus der Gl. 34 überein. Diese Unstimmigkeit ist auf das normative Prüfungsverfahren zurückzuführen. Nach EN 383:2006 [25] ist das Verbindungsmittel von der definierten Holzart rechtwinklig zu seiner Achse über eine Prüfeinrichtung aus Stahl zu belasten und der daraus resultierenden Bettungsmodul ergibt sich alleinig aus der untersuchten Holzart der Probe. Der Bettungsmodul  $k_s$  in einer Verbindung mit HKD stellt dagegen einen Wert dar, der sich aus der Kombination der  $k_s$ -Werte für die Holzart der HKD und des Prüfkörpers ergibt. Dabei ist zu erwähnen, dass der Wert auch durch den Beanspruchungswinkel (zu den Faserrichtungen) beeinflusst wird. Genauer gesagt, in einer Verbindung mit Holzkeildolle ist  $k_s$  eine Kombination zwischen Bettungsmoduln der aufeinandertreffenden Holzarten, die sich miteinander in variablen Beanspruchungswinkeln beanspruchen. Spörk definierte in [43;

44] die idealisierte Lochleibungsspannung infolge einer einwirkenden Kraft für Holzdollen. Diese Spannungsverteilung ist für die Holzkeildolle abgeleitet (siehe Abbildung 5-3-a, oben links und Abbildung 5-5). Es folgt, dass die Holzart mit dem niedrigsten Bettungsmodul oder umgekehrt mit der höchsten Elastizität bei einem bestimmten Beanspruchungswinkel, den entgültigen  $k_s$ -Wert für die Holzkombination bestimmt.

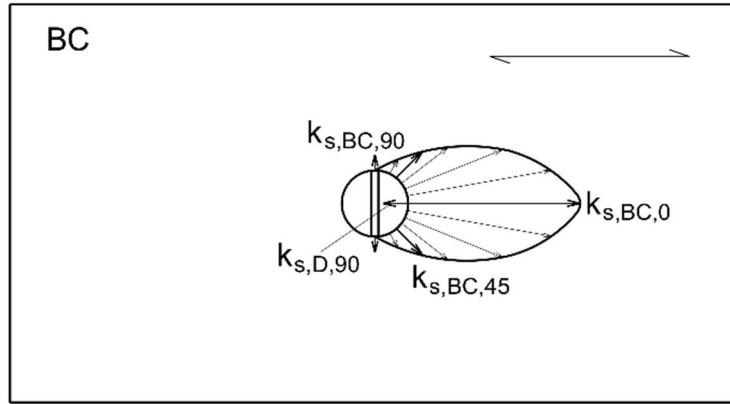


Abbildung 5-5 Annahmen zur Spannungsverteilung im Kontaktbereich zwischen Bauteil und Dolle (Fläche Tragwirkung durch Verkeilung (Spreizwirkung) (1)). Angelehnt an Spörk [43].

Für die Ermittlung der numerischen  $k_s$ -Werte für die verschiedenen Holzkombinationen werden folgende Hypothesen über das Spannungsverhalten der Holzkombinationen formuliert (vgl. Abbildung 5-6):

Annahme für H1 und H3 (vgl. Abbildung 5-6-a):

Es ist zu berücksichtigen, dass durch die Spreizung eine Verschiebung  $v(z)$  der Dolle und des Bauteils entlang der Fläche (1), Tragwirkung durch Spreizung infolge Verkeilung, entsteht. An der Bauteilloberfläche staucht sich die Dolle aus Eiche (H1) oder Esche (H3) infolge Spreizwirkung bei Druckbeanspruchung senkrecht zur Faser im Bohrloch. Über die Kontaktfläche des Bohrlochs wird die Druckbeanspruchung auf das Bauteil, diesmal parallel zur Faser, übertragen. Die Stauchung der Fasern des Bauteils aus Fichte bei Druckbelastung faserparallel nimmt zu.

Daraus lässt sich ableiten, dass die Nachgiebigkeit des Bauteils aus Fichte bei Druckbeanspruchung parallel zur Faser maßgebender ist, als die Nachgiebigkeit der Dolle aus Eiche oder Esche bei Druckbeanspruchung parallel zur Faser. Für die Holzkombinationen H1 und H3 werden die maßgebenden Eigenschaften für den  $k_s$ -Wert durch den Bettungsmodul  $k_{s,B,FICHTE,0}$  des Fichtenbauteils bestimmt.

$$k_{s,B,FICHTE,0} < k_{s,B,FICHTE,45} < k_{s,D,EICHE,90} \quad \text{für H1} \quad \left[ \frac{N}{mm^3} \right] \quad \text{Gl. 42}$$

bzw.

$$k_{s,B,FICHTE,0} < k_{s,B,FICHTE,45} < k_{s,D,ESCHE,90} \quad \text{für H3} \quad \left[ \frac{N}{mm^3} \right] \quad \text{Gl. 43}$$

Annahme für H2 (vgl. Abbildung 5-6-b):

Die Nachgiebigkeit der Dolle aus Eiche bei Druckbeanspruchung senkrecht zur Faser ist größer als die Nachgiebigkeit des Bauteils aus Eiche bei Druckbeanspruchung parallel zur Faser.

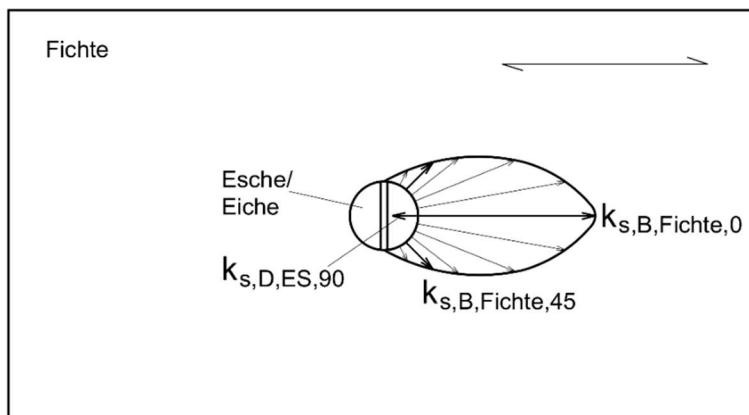
$$k_{s,D,EICHE,90} < k_{s,B,EICHE,45} < k_{s,B,EICHE,0} \quad \text{für H2} \quad \left[ \frac{N}{mm^3} \right] \quad \text{Gl. 44}$$

Für die Holzkombination H2 sind die maßgebenden Eigenschaften für den  $k_s$ -Wert von der Dolle aus Eichenholz festgelegt und zwar vom Bettungsmodul  $k_{s,D,EICHE,90}$ .

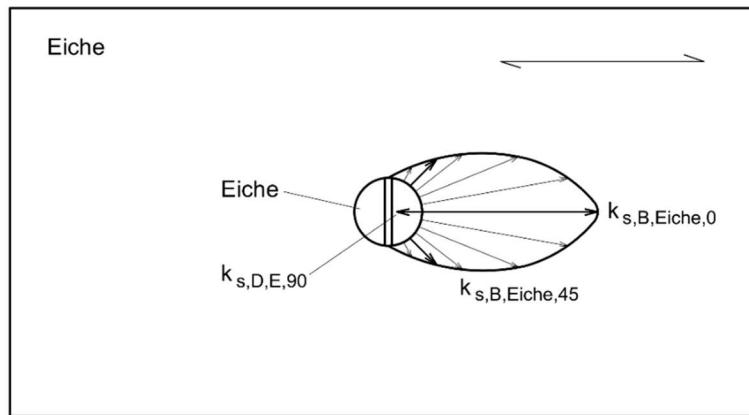
Mit:

$k_{s,90}$	Wert des Bettungsmoduls senkrecht zum Faserverlauf (mit einem Winkel von 90° zum Faserverlauf)
$k_{s,0}$	Wert des Bettungsmoduls parallel zum Faserverlauf (mit einem Winkel von 0° zum Faserverlauf)
$k_{s,45}$	Wert des Bettungsmoduls (mit einem Winkel von 45° zum Faserverlauf)

Die Einschätzung des  $k_s$ -Wertes erfolgte aus der Rückrechnung der Ergebnisse aus den experimentellen Versuchen. Dabei wird die Holzkombination und der Winkel der Beanspruchung zu den Fasern beachtet. Die ausgewählte Werte sind auf der Tabelle 5-1 aufgeführt.



a)



b)

Abbildung 5-6 Annahme a) zur Spannungsverteilung im Kontaktbereich zwischen Bauteil und Dolle angelehnt an Spörk [43] für a) H1 und H3 und b) H2. Legende: D = Dolle; B = Bauteil; E = Eiche; ES = Esche.

### 5.1.2 Auswertung der Ergebnisse

In der folgenden Tabelle 5-2 sind die Tragfähigkeiten für einen Holzkeildolle unter axialem Zugbelastung als Verbindungsmittel für eine zimmermannsmäßige Reparaturverbindung, in Abhängigkeit von der Holzkombination und Holzkeildollendurchmesser, angegeben. In der Tabelle sind die zu erwartenden charakteristischen Werte nach dem vorgestellten Modell ( $R_{k,HKD,mod}$ ) mit den charakteristischen Werten (5%-Quantil) aus den Versuchen V1 ( $R_{k,WWD,exp}$ ) aus Abschnitt 4.2 verglichen.

In der letzten Spalte der Tabelle 5-2 ist die Abweichung  $\Delta_{mean}$  zwischen den charakteristischen Werten aus dem vorgeschlagenen Modell und denjenigen aus den experimentellen Ergebnissen V1 dargestellt. Auf der einen Seite ist die Tragfähigkeit für die HKD mit dem kleineren Durchmesser  $d_D = 20\text{mm}$  etwas überschätzt und die für den größeren Durchmesser  $d_D = 30\text{mm}$  unterschätzt. Die Überschätzung bleibt in der Toleranz von  $\Delta_{mean,max} = +20\%$  und die Unterschätzung liegt mit bis zu  $\Delta_{mean,min} = -25\%$  auf der sicheren Seite. Auf der anderen Seite weisen die experimentellen Ergebnisse V1 eine große statistische Streuung auf (siehe Abschnitt 4.2.5) und die erhaltene Abweichung bleibt innerhalb der Toleranz der Testergebnisse.

Abschließend kann aus dem Vergleich zwischen den Ergebnissen des vorgeschlagenen Modells und den experimentellen Ergebnissen V1 geschlossen werden, dass das vorgeschlagene Modell die Werte der Tragfähigkeit für die Holzkeildollen unter axialer Zugbelastung sehr gut vorhersagt.

**Tabelle 5-2 Charakteristische Werte der Tragfähigkeit für Holzkeildolle unter axialer Zugbelastung in Abhängigkeit von der Holzkombination. Charakteristische Werte aus den Versuchen V1 (  $R_{k,HKD,exp}$  ) und nach dem vorgestellten Modell (  $R_{k,HKD,mod}$  ).**

Parameter	Bedingung	Parameter Beschreibung, Wert	Einheit	Abweichung $\Delta_{mean}$
$d_D = 20\text{ mm}$				
$R_{k,HKD,exp}$	H1	1,67	[kN]	
	H2	3,58		
	H3	1,93		
$R_{k,HKD,mod}$	H1	1,88	[kN]	12,6 %
	H2	4,18		16,8 %
	H3	1,51		-21,8 %
$d_D = 30\text{ mm}$				
$R_{k,HKD,exp}$	H1	2,49	[kN]	
	H2	3,14		
	H3	2,40		
$R_{k,HKD,mod}$	H1	2,08	[kN]	-16,5 %
	H2	3,76		19,7 %
	H3	1,81		-24,6 %

## 5.2 Numerische Einschätzung der Tragfähigkeit/Nachweis für die Holzkeildolle bei Abscherbeanspruchung

Mit dem Ziel, ein Nachweismodell für die Holzkeildolle zu entwickeln, wurde der Ansatz von [14] als Ausgangspunkt angenommen. Wie schon in Abschnitt 2.4 erwähnt, sind hier im Abminderungsbeiwert  $\delta$  die Effekte von ungleichmäßigen Spannungsverteilungen, das nicht Ausnutzen der Lochleibungsfestigkeit und Seileffekte infolge Reibung im Bohrloch berücksichtigt. Wie in Abschnitt 4.2.6 beobachtet, weist die Holzkeildolle nicht nur einen Seileffekt im Bohrloch aufgrund der Reibung, sondern auch aufgrund der Klemmwirkung des Keils auf. Diese Eigenschaft der Holzkeildolle ist im Fall einer axialen Beanspruchung von Vorteil. Im Fall einer Scherbeanspruchung trägt die Verkeilung jedoch zur Reduzierung der Tragfähigkeit bei, im Vergleich zur Tragfähigkeit einer äquivalenten Verbindung mittels Holzdolle (vgl. Tabelle 5-3). In dieser Tabelle sind auch die Testergebnisse für die Scherversuche der HKD (SV-HKD) und die Scherversuche der Holzdolle (SV-HD) aufgeführt. Es ist festzustellen, dass auf der einen Seite die Ergebnisse für die Holzdolle nach dem Modell [14] sehr gut mit den Ergebnissen der Versuche übereinstimmen. Auf der anderen Seite sind die Testergebnisse für die Holzkeildolle nach dem Modell [14] zu hoch. Die Reduzierung der Tragfähigkeit aufgrund der Verkeilung wird durch den Abminderungsbeiwert  $\delta'$  berücksichtigt.

**Tabelle 5-3 Ergebnisse und Einschätzung der Abschertragfähigkeit der experimentellen Ergebnisse SV-HKD der Holzkeildolle nach dem Modell Perria und Modell Blaß [14].**

	R <sub>k</sub> [N]	f <sub>1,h,k</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	f <sub>2,h,k</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	β	f <sub>m,k</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	M <sub>u,k</sub> [N mm]	δ	d [mm]	ρ <sub>k,B1,mean</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	ρ <sub>k,B2,mean</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	n=2	
R <sub>k,HKD</sub> exp., erwartet nach Blaß[2]	HKD	8,57	25,96	25,96	1	30	23561,94	0,75	20	395,78	395,78	2
R <sub>k,C24</sub> , nach Blaß[2]		8,06	22,96	22,96	1	30	23561,94	0,75	20	350,00	350,00	2
R <sub>k,HKD</sub> exp.		6,61								395,78		2
R <sub>k,HKD</sub> exp. erwartet nach Perria		6,61	25,96	25,96	1	30	23561,94	0,45	20	395,78	395,78	2
R <sub>k,C24</sub> nach Perria		6,24	22,96	22,96	1	30	23561,94	0,45	20	350,00	350,00	2
R <sub>k,HD</sub> , experimentell		7,62								405,69		2
R <sub>k,HD</sub> exp., erwartet nach Blaß[2]	HD	8,67	26,61	26,61	1	30	23561,94	0,75	20	405,69	405,69	2
R <sub>k,C24</sub> erwartet nach Perria	HD	8,06	22,96	22,96	1	30	23561,94	0,75	20	350,00	350,00	2

Die charakteristischen Werte der Rohdichte und der Tragfähigkeit aus dem SV-HKD sind aus der Tabelle 5-3 bekannt. Die bekannten Variablen, welche aus den experimentell ermittelten Ergebnissen stammen, wurden in die Gl. 1 eingesetzt. Hierdurch wurde der aktualisierte Abminderungsbeiwert  $\delta'$  für die Holzkeildolle berechnet (vgl. Gl. 45). Im Diagramm 5-1 sind die experimentellen Ergebnisse aus SV1-HKD mit dem Modellansatz Perria und Blaß [14] dargestellt.

$$\delta' = \frac{1 + \beta}{2 \cdot \beta} \cdot \frac{R_k^2}{2 \cdot M_{u,k} \cdot f_{h,1,k} \cdot d_D} \quad [-] \quad \text{Gl. 45}$$

Mit:

$$R_k = 6611 \text{ [N]}$$

$$f_{h,1,k} = 25,96 \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$$

$$f_{h,2,k} = 25,96 \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$$

$$\rho_{k,B} = 395,8 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

$$\beta = 1$$

$$M_{u,k} = 23561,94 \text{ [N mm]}$$

$$f_{m,k} = 30 \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$$

$$d_D = 20 \text{ [mm]}$$

$$n = 2$$

Ergibt sich:

$$\delta' = 0,45$$

[–]

Gl. 46

**Nachweis der Holzkeildolle unter Abscherbeanspruchung:**

$$R_k = \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{u,k} \cdot \delta' \cdot f_{h,1,k} \cdot d_D}}$$

[N]

Gl. 47

Mit:

$$\beta = \frac{f_{h,1,k}}{f_{h,2,k}}$$

$\beta$  = Verhältniss der Leibungsfestigkeiten von Seiten- zu Mittelholz (aus SIA 265:2012 Teil 6.1.4.3 [28])

[–]

Gl. 48

$$M_{u,k} = \frac{f_{m,k} \cdot \pi \cdot d_D^3}{32}$$

$M_{u,k}$  = charakteristisches Biegemoment des runden Holzstiftes

[N · mm]

Gl. 49

$$\delta' = 0,45$$

Abminderungsbeiwert für Holzkeildolle

[–]

Gl. 50

$$f_{h,1,k} = 0,082 * (1 - 0,01 * d_D) * \rho_k$$

$f_{h,1,k}$  = charakteristische Lochleibungsfestigkeit des Seitenholzes

$\left[ \frac{N}{mm^2} \right]$

Gl. 51

$$f_{m,k} = \text{charakteristische Biegefestigkeit des Holzstiftes}$$

$\left[ \frac{N}{mm^2} \right]$

$d_D$  = Durchmesser des Stiftes

[mm]

$$\rho_k = \text{Rohdichte Seitenholz}$$

$\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$

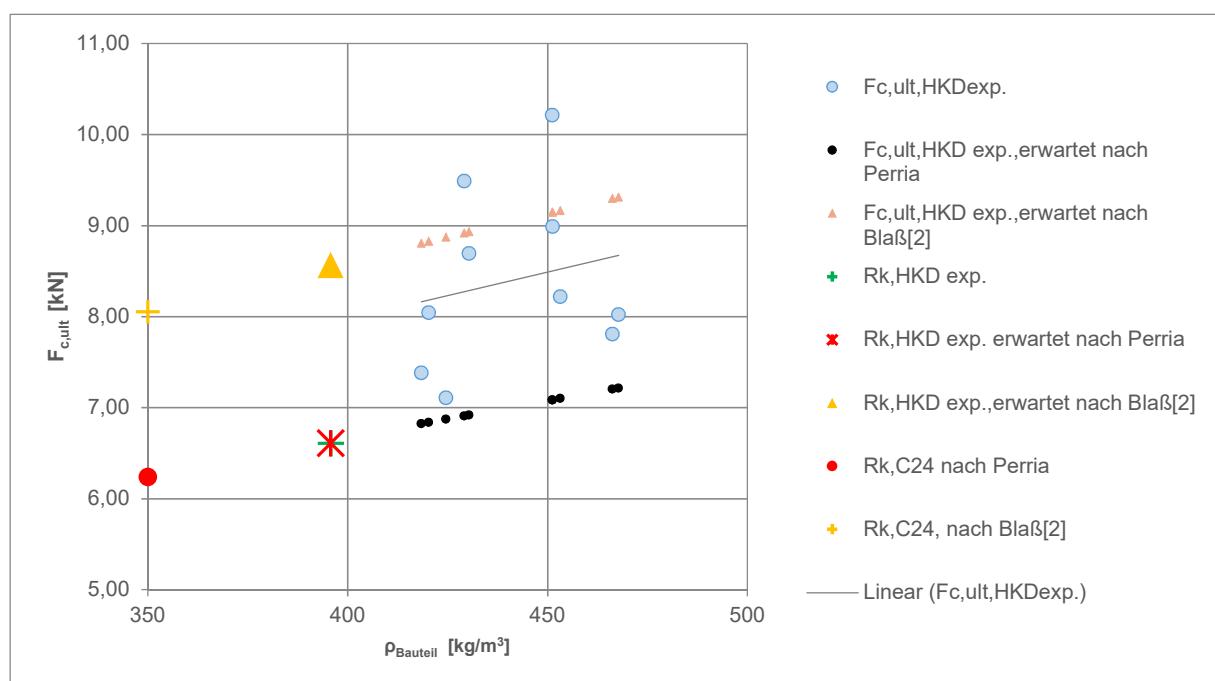


Diagramm 5-1 Einschätzung der Abschertragfähigkeit der experimentellen Ergebnisse SV-HKD der Holzkeildolle nach dem Modell Perria und Modell Blaß [14].

Zusammenfassend ist festzustellen, dass mit dem modifizierten Abminderungsbeiwert  $\delta' = 0,45$  ein guter Ausgangspunkt für die Einschätzung der Tragfähigkeit einer Holzkeildolle je Scherfläche gelegt ist. Die Implementierung des Wertes  $\delta'$  sollte unter Beachtung verschiedener Holzarten und Durchmesserkonfigurationen in weiterführenden Tests erfolgen.

## 6 Outlooks

### 6.1 Fazit: Die Zukunft von Reparaturmethoden in der Denkmalpflege

Dipl.-Ing. Cordula Reulecke

Referatsleiterin Bau und Kunstdenkmalpflege Regionalreferat Braunschweig,  
Niedersächsisches Landesamt für Denkmalpflege

Reparieren gehört seit Jahrhunderten zum Bauen und Nutzen. Gepaart ist es, oder sollte es sein, mit dem Wissen um geeignete Materialien und Ausführungstechniken, damit eine Reparatur auch einen langen Zeitraum vorhält.

Seit einiger Zeit erfährt diese Denk- und Vorgehensweise auch aus ökologischer Sicht wieder eine zunehmende Bedeutung, Wert und Wertschätzung. Reparieren nicht nur an Gebäuden gehört zum schonenden Umgang mit endlichen Ressourcen. Reparieren ist ein Teilaspekt des Klimaschutzgedankens.

Aus diesem Wiedergewonnen Interesse entstehen Überlegungen für alternative Einsatzmöglichkeiten zu vermeintlich Bewährtem bis hin zum unscheinbaren Konstruktionsdetail. Dieses Um- und zugleich Weiterdenken erschafft auch manchmal Reparaturverbindungen, die auf bewährtem Wissen und Können aufbauen.

Die bauliche Denkmalpflege lebt das Prinzip der behutsamen Reparatur, sie ist das alles prägende Leitmotiv. Es geht um regelmäßige Wartungsintervalle, um minimalinvasive Eingriffe, um das Original schützende Methoden in der Planung und in der Umsetzung.

In der Charta von Venedig, der international anerkannten Richtlinie der Denkmalpflege aus dem Jahr 1964, wurden zentrale Werte und Vorgehensweisen festgelegt. Dort ist in der Einleitung (Präambel) zu lesen:

„Als lebendige Zeugnisse jahrhundertealter Traditionen der Völker vermitteln die Denkmäler in der Gegenwart eine geistige Botschaft der Vergangenheit. Die Menschheit, die sich der universellen Geltung menschlicher Werte mehr und mehr bewusst wird, sieht in den Denkmälern ein gemeinsames Erbe und fühlt sich kommenden Generationen gegenüber für ihre Bewahrung gemeinsam verantwortlich. Sie hat die Verpflichtung, ihnen die Denkmäler im ganzen Reichtum ihrer Authentizität weiterzugeben.“

Mit dem „ganzen Reichtum der Authentizität“ ist nicht nur die künstlerische Ästhetik der Gesamterscheinung gemeint, sondern gleichrangig auch das Material und die handwerkliche Ausführung.

Die Holzkeildolle als Holz-in Holz-Verbindung steht für die Entwicklung so einer Reparaturmethode, die aus der Vergangenheit heraus für die Zukunft weiterentwickelt wurde.

### 6.2 Überprüfung der Forschungshypothese

In diesem Forschungsprojekt wurden neue technische Erkenntnisse für den Einsatz der Reparaturverbindung mit Holzkeildolle erarbeitet. Die folgenden Forschungsziele (FZ) wurden erreicht und bauen aufeinander.

FZ 1) Es sind die Hintergründe für die mechanischen Grundlagen, statische Modellierung und Darstellung des Trag- und Verformungsverhaltens unter tragwerksplanerischen Aspekten dargestellt. Die Anwendungsmöglichkeiten der Reparaturverbindung wurden dank eines tragwerkplanerischen Nachweiskonzeptes für die Lastfälle axialer Zug und Abscheren definiert.

FZ 2) Weiterhin sind die grundlegenden konstruktiven und fertigungstechnischen Regeln für die korrekte Anwendung der Holzkeildolle dargestellt.

Dank dieser neuen Erkenntnisse sind die positiven Aspekte und die Möglichkeiten dieser neuen Verbindungstechnik demonstriert. Die Berechnungsnachweise für diese Verbindungstechnik eröffnen für die Tragwerksplaner die Möglichkeit, bei planmäßig scher- und zugbeanspruchten Verbindungsmitteln, auf alternative Ertüchtigungsmaßnahmen im Sinne der Nachhaltigkeits- und Denkmalpflegeanforderungen zurückzugreifen. Weitere Schritte für die Nutzung dieser Technik als anerkannte Technik sind jedoch notwendig.

Zweifelsohne befinden sich die präsentierten Erkenntnisse zur Reparaturverbindung mit Holzkeildolle auf unterschiedlichen Vertiefungs- und Reifegradniveaus. Auf der einen Seite wurden die konstruktiven und fertigungstechnischen Aspekte (FZ 2) für die Entwicklung der Ingenieur nachweise durch umfangreiche Tastversuche untersucht. Diese Erkenntnisse stellen die Randbedingungen für den rechnerischen Ansatz dar. Auf der anderen Seite wurden die rechnerischen Grundlagen und entworfenen Nachweisregeln für die HKD (FZ 1) auf Basis der abschließenden experimentellen Versuche entwickelt. Eine Überprüfung des Umfangs und der Gültigkeit des Modells über die festgelegten Randbedingungen hinaus ist jedoch erforderlich. Diese Nachweisregeln bedürfen zukünftig einer vertieften wissenschaftlichen Betrachtung, um als anerkannte Regel der Technik im Ingenieurwesen Anwendung finden zu können, da verschiedene Berechnungsaspekte noch detaillierter zu untersuchen sind.

#### Offene Aspekte, Fragen

Die Anwendung der Reparaturverbindung mit Holzkeildolle ist für die Anwendung im historischen und neueren Bestand nach den aktuellen vorgeschlagenen Nachweisregeln geeignet, aber nur nach Festlegung von spezifischen Annahmen möglich. Ein besserer Kenntnisstand und eine vertiefte wissenschaftliche Betrachtung sind für die Themen Trag- und Verformungsverhalten der Reparaturverbindung mit Holzkeildollen (a) unter Feuchtigkeitseinflüssen, (b) für alternative Holzartkombinationen, (c) für unterschiedliche Dollendurchmesser und Schnittigkeit, (d) sowie für die Anwendung der Verbindungsmittel in mehreren Reihen notwendig. Diese offenen Forschungsfragen werden nachfolgend erläutert.

Die erste offene Forschungsfrage bezieht sich auf die Feuchtigkeitseinflüsse. Die grundlegenden Kenntnisse zum Trag- und Verformungsverhalten, welche im Rahmen des Forschungsvorhabens erarbeitet wurden, setzen voraus, dass sämtliche Holzbauteile in der Reparaturverbindung (Bestandbau und Reparaturholz) eine genormte Einbaufeuchte nach DIN 338:2016 [23] besitzen. Die getroffene Annahme ist, dass die Holzfeuchte für alle Bauteile annähernd gleich ist und diese der Ausgleichsfeuchte des für die Laborversuche vorgesehenen Umgebungsklimas (Normalklima) entspricht. Anwendungen in Normalklima mit  $T = 20^\circ$ ,  $u_{rel} = 60\%$ , Holzfeuchtigkeit = 12 %, entsprechen den Einbau in der Gebrauchsklasse GK 0 und GK 1 nach [36; 38; 39], oder Nutzungsklasse 1 nach Eurocode 5 [18], z.B. in einem bewohnten Innenraum. Dennoch zeigen die meisten jahrelangen Anwendungen der HKD den Einbau in unbeheizte Dachräume oder wetterexponierten Fassaden (vgl. Abschnitt 2.5), die jeweils die Gebrauchsklasse GK 2 bzw. Nutzungsklasse 2 und Gebrauchsklasse GK 3, bzw. Nutzungsklasse 3 entsprechen. In diesen normierten Gebrauchsklassen herrschen besondere klimatische Bedingungen, die von den in der gegenständlichen Forschungsannahme festgelegten Bedingungen abweichen. In diesen geänderten klimatischen Rahmenbedingungen sind die mechanischen und elastischen Eigenschaften der Reparaturverbindung mit Holzkeildolle und der zu verbindenden Bauteilen stark von Feuchteeffekten und -schwankungen beeinflusst. Diese führen zu veränderten Ergebnissen im Vergleich zum untersuchten Verhalten und den festgelegten Grenzen der Tragfähigkeit.

Des Weiteren könnten übermäßige Feuchtigkeitsschwankungen Schwindrisse verursachen, die die festgelegten geometrischen Rahmenbedingungen – wie Randabstände – oder die Kontaktfläche zwischen den zu verbindenden Bauteilen ändern.

Zusammenfassend sollten für eine korrekte Nutzung im gebauten Zustand folgenden Aspekten rund um die Feuchtigkeitseinflüsse in künftige Forschung mitberücksichtigt werden:

- Änderungen auf die Tragfähigkeit und Klemmwirkung in unterschiedlichen Gebrauchsklassen nach [36; 38; 39]
- Einflüsse aufgrund unterschiedlicher Holzfeuchte zwischen dem neu einzubauenden Holz und dem Bestandsholz;
- Einflüsse aufgrund der Unterschiede im Umgebungsklima im Jahresverlauf mit schwankender Ausgleichsfeuchte und Temperatur;
- Einflüsse in der Tragfähigkeit der Reparaturverbindung aufgrund einer großen Zahl an Diskontinuitäten wie Risse, Äste, Zapflöcher usw.. Dieses Thema soll übergreifend berücksichtigt werden. Es begründet sich allgemein in der Geometrie, dem Unterschied der Holzfeuchte zwischen Einbau und Nutzung sowie durch zwischenzeitliche Baumaßnahmen oder Zweitverwendungshölzer.

Eine zweite Forschungsfrage bezieht sich auf Änderungen in der Tragfähigkeit der Reparaturverbindung aufgrund der Variation der festgelegten geometrischen Parameter und der Wahl alternativer Holzkombinationen.

Ein erster Aspekt dieser Forschungsfrage, der sich auf die präsentierten Nachweismodelle bezieht, ist die tatsächliche Anwendbarkeit der Nachweismodelle über die getesteten Referenzdurchmesser und Schnittigkeiten hinaus.

Das Nachweismodell der HKD für die axiale Zugtragfähigkeit wurde nach experimentellen Beobachtungen zum mikroskopischen und makroskopischen Verhalten der Holzkeildolle, nach der Aktivierung der Tragwirkung aufgrund der Verkeilung und mechanischer Beanspruchung entwickelt. Das Modell wurde auf Basis der Ergebnisse der experimentellen Untersuchung (vgl. Abschnitt 4.2) aktualisiert. In diesem Fall wurden verschiedene Holzkombinationen mit zwei Durchmessern der Holzkeildolle ( $d_D = 20 \text{ cm}$  und  $d_D = 30 \text{ cm}$ ) bei einschnittiger Reparaturverbindung untersucht.

Das Nachweismodell der HKD auf Abscheren wurde entwickelt als Anpassung eines existierenden und anerkannten Berechnungsansatzes nach Blaß (vgl. [14]) und SIA (vgl. [19]) auf die Ergebnisse der durchgeführten experimentellen Versuche. Das Modell wurde auf Basis der Ergebnisse der experimentellen Untersuchung (vgl. Abschnitt 4.3) aktualisiert. In diesem Fall wurde eine einzige Holzkombination mit Holzkeiddollendurchmesser  $d_D = 20 \text{ mm}$  bei zweischnittiger Verbindung untersucht.

Zusammenfassend sind für eine breite Anwendbarkeit und die Anerkennung der Nachweismodelle als anerkannte Regel der Technik im Ingenieurwesen eine größere Stichprobenzahl, mehrere Holzkeiddollendurchmesser und verschiedene Schnittigkeiten bei künftigen Forschungsarbeiten zu berücksichtigen. Spezifisch sollten folgende Einflüsse auf die Tragfähigkeit, das Verformungsverhalten und die Klemmwirkung untersucht werden:

- Einflüsse aufgrund verschiedener Holzkeiddollendurchmesser
- Einflüsse aufgrund verschiedener Schnittigkeiten
- Einflüsse aufgrund mehrerer Verbindungsmittel in einer/mehreren Reihen (Gruppenwirkung)

Ein zweiter Aspekt derselben Forschungsfrage ist die Auswahl alternativer Holzkombinationen. Dieses Thema ist auch mit der Anwendung der Reparaturverbindung in verschiedenen Einbaufeuchtigkeitssituationen, sprich Gebrauchsklassen, verknüpft. Eine Reparaturverbindung besteht aus Verbindungsmittel, Bauteil im Bestand und Ersatzbauteil. Das Bestandbauteil ist bestandsabhängig und seine Eigenschaften können nicht wesentlich beeinflusst werden. Die Holzart und Eigenschaften des Ersatzbauteils können nach denkmalpflegerischen Anforderungen oder nach dem Sichtpunkt der natürlichen Dauerhaftigkeit ausgewählt werden. Gleicher gilt für das stiftförmige Verbindungsmittel, die Holzkeildolle. Sie muss auf der einen Seite eine höhere Rohdichte als die der Einbauteile aufweisen und auf der anderen Seite muss sie nach dem Prinzip der natürlichen Dauerhaftigkeit der Holzart ausgewählt werden.

Z.B. ist die Holzkombination 3 mit Dolle aus Esche und Bauteil aus Fichte für die Anwendung ab der Gebrauchsklasse GK 2 aufgrund der natürlichen Dauerhaftigkeitsklasse der zwei Holzarten nicht mehr geeignet. Das Gleiche gilt für die Holzkombination 1 mit Dolle aus Eiche und Bauteil aus Fichte. Aufgrund der begrenzten natürlichen Dauerhaftigkeit von Fichte, darf diese Holzkombination nur in der Gebrauchsklassen GK 0 und GK 1 eingebaut werden. Für höhere Feuchtigkeitsbeanspruchungen bis zur GK 3 darf nur die Holzkombination 2 eingebaut werden. Für diese Fälle und nur unter der Annahme, dass der Einfluss der Feuchtigkeit auf das Verformungsverhalten und die Tragfähigkeit unberücksichtigt bleibt, ist nach den vorliegenden Forschungsergebnissen nur der Einbau von Holzkeildollen aus Eiche empfehlenswert.

Zusammenfassend sind mit der Holzkeildolle aus Esche oder aus Eiche andere Holzkombinationen möglich. Mögliche Besonderheiten für das Trag- und Verformungsverhalten alternativer Holzkombinationen sollten in zukünftigen Forschungsarbeiten berücksichtigt werden.

#### Weiteres Vorgehen

Dank der neuesten Erkenntnisse bietet das Forschungsprojekt „Holzkeildolle als Reparaturverbindung“ eine denkmalaffine alternative Reparaturtechnik für die Ertüchtigung historischer Holztragwerke und allgemeiner Holztragwerke im Bestand. Diese Reparaturtechnik, im Vergleich zu vielen gängigen Reparaturtechniken, ermöglicht dem Tragwerksplaner in der Denkmalpflege die Einhaltung spezieller Denkmalschutzanforderungen, wie z.B. den Verzicht auf metallische Verbindungsmittel in der Konstruktion.

Für die Anwendung der Reparaturverbindung mit HKD ist die Einhaltung einiger Regeln aus handwerklicher und ingenieurtechnischer Sicht notwendig. Auch wenn diese handwerklichen Regeln für den Einbau der Holzkeildolle nicht von den üblichen Zimmermanns-Regel abweichen, sind für die Erzielung der berechneten Tragfähigkeit einige Besonderheiten in der Auswahl bei Materialien und Fertigung sowie spezifische Vorarbeiten und Einbaumöglichkeiten einzuhalten. Ebenfalls gelten Voraussetzungen für die Anwendung der ingenieurtechnischen Berechnungsansätze.

Für den Zweck der korrekten Anwendung der Reparaturverbindung in der Praxis wurde ein Leitfaden entwickelt, der den Praxistransfer der Forschungsergebnisse aus dem Forschungsbericht erleichtert. Im Leitfaden [1] (Teil 2 des Forschungsberichtes) werden ausgewählte Beispiele zur Fertigung, konstruktive und geometrische Parameter sowie ein Best-Practice-Beispiel der Ausführung und Berechnungsbeispiele präsentiert. Im Leitfaden sind die wesentlichen konkreten Schritte für die praktische Umsetzung der Forschungsergebnisse für Handwerker und Ingenieure zusammengefasst.

## Literaturverzeichnis

- [1] Perria E., Sieder M., Siegert S., Reulecke C. (2024) *Holzkeildolle als Reparaturverbindung. Teil 2: Leitfaden. – Einsatz der Holzkeildolle als Möglichkeit neuer Reparaturverbindungen für die Denkmalschutzanforderungen des schonenden Substanzumgangs und der Materialgerechtigkeit.* [online].
- [2] Schickhofer, G.; Hübner, U. [Hrsg.] (2009) *Bestandsanalyse und Instandhaltung von Holzkonstruktionen.* 8. Aufl. Graz.
- [3] ICOMOS; ISCARSAH [Hrsg.] (1999) *Grundsätze zur Erhaltung historischer Holzstrukturen.*
- [4] ICOMOS; ISCARSAH [Hrsg.] (2017) *Principles for the conservation of wooden built heritage.*
- [5] Petzet, M. [Hrsg.] (1992) *Grundsätze der Denkmalpflege – 1. ICOMOS, Heft des Deutschen Nationalkomitees.* München.
- [6] Informationsdienst Holz (2003) *Korrosion metallischer Verbindungsmittel in Holz und Holzwerkstoffen,* Spezial Februar 2003.
- [7] Forest Products Laboratory [Hrsg.] *Wood Handbook—Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190.* Madison, WI.
- [8] Egle, J. [Hrsg.] (2003) *Dauerhaftigkeit von Holz bei chemisch-aggressiver Beanspruchung.*
- [9] Perria E., Sieder M., Siegert S., Reulecke C. (2024) *Holzkeildolle als Reparaturverbindung. Teil 1: Forschungsbericht. – Einsatz der Holzkeildolle als Möglichkeit neuer Reparaturverbindungen für die Denkmalschutzanforderungen des schonenden Substanzumgangs und der Materialgerechtigkeit.* [online].
- [10] Gerner, M. (2000) *Entwicklung von Holzverbindungen, Forschungs- und Untersuchungsergebnisse.* Fraunhofer IRB Verlag.
- [11] Holzer, S. M. [Hrsg.] (2015) *Holzkonstruktionen.* Ernst & Sohn.
- [12] Müller, A. et al. (2016) *Historische Holzverbindungen. Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens von Historischen Holzverbindungen und Erstellung eines Leitfadens für die Baupraxis.* Fachhochschule Biel.
- [13] Blaß, H. J.; Ehlbeck, J.; Steck, G. (2005) *Erläuterungen zu DIN 1052: 2004-08. Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken.* München und Karlsruhe.
- [14] Blaß, H. J.; Ernst, H.; Werner, H. (1999) *Verbindungen mit Holzstiften - Untersuchungen über die Tragfähigkeit in: Bauen mit Holz 10,* S. 45–52.
- [15] Ehlbeck, J.; Hättich, R. [Hrsg.] (1989) *Tragfähigkeit und Verformungsverhalten von ein- und zweischnittig beanspruchten Holznägeln.* Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und Technische Wissenschaften.

- [16] Görlacher, R. [Hrsg.] (1999) *Empfehlungen für die Praxis*.
- [17] Kessel, M.; Augustin, R. (1994) *Untersuchung der Tragfähigkeit von Holzverbindungen mit Holznägeln* in: Bauen mit Holz, H. 96, S. 484–487.
- [18] DIN EN 1995-1-1/NA 2013-08 (August 2013) *Eurocode 5: Teil 1-1 Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau / Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter*.
- [19] SIA 269/5:2011 (2011) *Erhaltung von Tragwerken – Holzbau*. Zürich.
- [20] Johansen, K. W. (1949) *Theory of timber connections* in: International Association for Bridge and Structural Engineering IABSE Journal 9, S. 249–262.
- [21] Sjödin, J.; Serrano, E.; Enquist, B. (2008) *An experimental and numerical Study of the effect of friction in single dowel joints*. Springer Verlag.
- [22] SIA 164:1992 (1992) *Holzbau*. Zürich.
- [23] DIN EN 338:2016-07 (2016) *Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen*. Beuth Verlag GmbH.
- [24] Gehri, E. [Hrsg.] (1990) *Holzbau-Tabellen Band 2*. Zürich: Schweizerische Arbeitsgemeinschaft für das Holz.
- [25] Kessel, M.; Augustin, R. (1992) *Untersuchung der Tragfähigkeit von Holzverbindungen mit Holznägeln für Sanierung und Rekonstruktion von alter Bausubstanz, Forschungsbericht*.
- [26] DIN 1052-2 (1988) *Holzbauwerke; Mechanische Verbindungen*. Beuth Verlag GmbH.
- [27] DIN 4074-1:2012-06 (2012) *Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 1: Nadel schnittholz*. Beuth Verlag GmbH.
- [28] SIA 265:2012 (2012) *Holzbau*. Zürich.
- [29] Clorius, C. O.; Damkilde, L.; Hoffmeyer, P. (2001) *Fatigue in Wood: An investigation in tension perpendicular to the grain*. BYG-Rapport R-038.
- [30] Kollmann, F. (1951) *Technologie des Holzes und Holzwerkstoffe*. Springer Verlag.
- [31] Niemz, P.; Sonderegger, W. (2017) *Holzphysik. Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag.
- [32] Gustafsson, P. (1988) *A study of strength of notched Beams – Paper No. CIB-W18/21-10-1 21* in: Proceedings of CIB-W18A Meeting 21.
- [33] Perria E., Siegert S., Li X., Sieder M. *Repair connection with wooden wedged dowels: preliminary experimental laboratory tests and fem model for the description of the mechanical behavior*. in: *12th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions SAHC 2020*.

- [34] DIN EN 408:2012-10 (2012) *Holzbauwerke - Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften*. Beuth Verlag GmbH.
- [35] DIN EN 14358:2016-11 (2016) *Holzbauwerke - Berechnung und Kontrolle charakteristischer Werte*. Beuth Verlag GmbH.
- [36] DIN 68800-1:2019-06 (2019-06) *Holzschutz - Teil 1: Allgemeines*. Beuth Verlag GmbH.
- [37] Einbock, S. (2018) *Statistik für Ingenieure und Naturwissenschaftler (mit Excel)*. Norderstedt: BoD – Books on Demand.
- [38] DIN EN 335:2013-06 (2013-06) *Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten - Gebrauchsklassen: Definitionen, Anwendung bei Vollholz und Holzprodukten*. Beuth Verlag GmbH.
- [39] DIN EN 350:2016-12 (2016-12) *Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten - Prüfung und Klassifizierung der Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten gegen biologischen Angriff*. Beuth Verlag GmbH.
- [40] DIN EN 26891:1991-07 (1991) *Holzbauwerke; Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln; Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens*. Beuth Verlag GmbH.
- [41] Perria, E. et al. (2023) *Repair connection with wooden wedged dowels: axial tensile and shear verifications* in: *Proceedings of WCTE: World Conference on Timber Engineering*. Oslo.
- [42] Witt, K. J. [Hrsg.] *Teil 3: Gründungen und geotechnische Bauwerke*. 7. Aufl. Ernst & Sohn.
- [43] Spörk, a. (März 2007) *Einflussfaktoren auf die Lochleibungsfestigkeit für die Nadelholzart Fichte*.
- [44] Hohenwarter, J. (2014) *Vergleich der Lochleibungsfestigkeit in Folge von Zug- und Druckbelastung*. Graz.
- [45] Koch, H. (2011) *Untersuchungen zum Last-Verformungsverhalten historischer Holztragwerke - der abgestirnte Zapfen*. Kassel: kassel university press GmbH.
- [46] Hübner, U. [Hrsg.] (2013) *Mechanische Kenngrößen von Buchen-, Eschen- und Robinienholz für lastabtragende Bauteile*. Graz: Verlag der Technischen Universität Graz.
- [47] Blaß, H. J.; Eberhart, O.; Wagner, B. (2000) *Zum rechnerischen Nachweis von Winkelverbindern* in: *Bauen mit Holz*, H. 102, S. 42–46.
- [48] DIN EN 383:2007-03 (2007) *Holzbauwerke - Prüfverfahren - Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit und Bettungswerte für stiftförmige Verbindungsmittel*. Beuth Verlag GmbH.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1	Abkürzungen der Teile in der Reparaturverbindung mittels Holzkeildolle: a) Teile der Holzkeildolle; b) Darstellung der Reparaturverbindung (Beispiel an einschnittiger Verbindung).....	95
Abbildung 2-2	Einfluss der Winkel zur Jahrringe- Richtung. Clorius [29] für $ft$ , 90, $k$ . Kollmann [30] und Niemz [31] für $Em$ , 90, <i>mean</i> .....	96
Abbildung 2-3	Darstellung der vorläufigen festgelegten Parameter in der Reparaturverbindung mit Holzkeildolle ( <i>Erfahrungswerte</i> ).....	98
Abbildung 3-1	Geometrisch festgelegte Parameter für die TV1 [mm] und statisches Schema der TV1.....	103
Abbildung 3-2	Getestete geometrische Kombinationen für die TV1.....	104
Abbildung 3-3	Test-setup mit optischen Messtechniksystems und Konfiguration für der Messung der Dehnung entlang ausgewählter Führungslinien: a) Bild b) Schema.....	105
Abbildung 3-4	Beispielhafte optische Konfigurationen für die Messung der Dehnung entlang ausgewählten Führungslinien (Die Farbe der nummerierten Kameras entspricht den jeweils aufgenommenen Bereich entlang der farbigen Strichpunktlinie): a) für $T2=90$ ; b) $T2=45$ ; c) $T2=0$ . d) Bild der Führungslinien für die Überprüfung des optischen Messsystems. ....	105
Abbildung 3-5	Abbruchkriterien „Stabilitätsverlust des Keils“: a) Knicken; b) Versagen out-of-plane (SVKoP); c) Versagen in-plane (SVKP).....	106
Abbildung 3-6	Rissverhalten auf der Oberfläche: a) für $H1\_T1-0\_T2-90\_G2$ ; b) $H1\_T1-0\_T2-45\_G2$ ; c) $H1\_T1-0\_T2-90\_G1$ ; d) $H2\_T1-0\_T2-90\_G2$ ; e) $H2\_T1-0\_T2-0\_G2$ ; f) $H2\_T1-0\_T2-90\_G1$ . ....	111
Abbildung 3-7	Rissverhalten in der Dolle für: a) $H1\_T2-0\_G1$ ; b) $H1\_T2-45\_G1$ ; c) $H1\_T2-45\_G2$ ; d) $H1\_T2-90\_G1$ , e) $H1\_T2-0\_G1$ ; f) $H2\_T2-45\_G2$ und g) $H2\_T2-90\_G1$ . ....	112
Abbildung 3-8	Prüfkörpergeometrie und -aufbau für die Zugprüfung TV2 .....	117
Abbildung 3-9	Testaufbau der Zugprüfung TV2 a) Testaufbau b) induktiver Wegaufnehmer zwischen Bauteiloberfläche und Dolle für die Messung der lokalen Verschiebung der HKD: Vor (oben) und nach (unten) der Prüfung. ....	118
Abbildung 3-10	Versagensarten in TV2 nach Abschluss der Zugversuche .....	122
Abbildung 3-11	Geänderte Rissbildung auf $S1^*$ in den Prüfkörper $H1\_T2-45$ :a nach Zugprüfung (TV2) 123	
Abbildung 3-12	Rissverhalten auf $S1$ in den Prüfkörpern nach Einschlag des Keils (TV2) .....	124
Abbildung 3-13	$H2$ : Rissverhalten auf $S1^*$ in den Prüfkörpern nach Einschlag des Keils (TV2) .....	125
Abbildung 3-14	$H1$ : Rissverhalten auf $S1$ und $S1^*$ in den Prüfkörpern nach Zugprüfung TV2 .....	126
Abbildung 3-15	$H2$ : Rissverhalten auf $S1$ und $S1^*$ in den Prüfkörpern nach Zugprüfung TV2 .....	127
Abbildung 3-16	Versagensmechanismus / Rissbildung der Bauteiloberfläche. Legende für die Tabelle 3-9 .....	129
Abbildung 3-17	Rissbildung der Nutboden nach der Zugprüfung: a) $H1\_T2-45$ :d ; c) $H1\_T2-90$ :a; c) $H1\_T2-90$ :e; d) $H2\_T2-0$ . ....	130
Abbildung 3-18	Ideales elasto-plastisches Materialmodell nach [31] .....	131
Abbildung 3-19	Das orthotrope elastische Materialmodell.....	131
Abbildung 3-20	a) Ausgewählte Mesh für die Dolle und das Bauteil; b) Geometrisches 3D-Modell .....	136

Abbildung 3-21 a) Verteilung der Stufenlast entlang der Nutwände; b) Detail. In Rot: Schema der stufenartigen, dreieckigen Verteilung der Flächenlast auf die Nutwände. In Blau: Messungspunkte der Spannung und Verformung: (X1) entlang der Nutwand; (X2) entlang der Grenzlinie zwischen Holzkeildolle und Bauteil. ....	137
Abbildung 3-22 Prüfkörpergeometrie und Prüfungsaufbau für die Zugprüfung TV3 .....	143
Abbildung 4-1 Darstellung der endgültigen geometrischen Parameter in der Reparaturverbindung durch die Holzkeildolle .....	147
Abbildung 4-2 Abkürzungen der Komponenten einer Holzkeildolle.....	148
Abbildung 4-3 Prüfkörpergeometrie und Prüfungsaufbau für die Zugprüfung V1 .....	150
Abbildung 4-4 Rissverhalten der Prüfkörper a) V1_30_H1_T2-90_1; b) V1_30_H1_T2-90_3; c) V1a_30_H1_T2-90_6; d) V1_30_H1_T2-90_8.....	161
Abbildung 4-5 Rissverhalten der Nutboden und des Bohrlochs in V1. a) Langer Riss im Nutboden in der Serie V1a mit $dD = 30mm$ . b) und c) Stauchung des Keils ohne Konsequenz für den Nutboden in der Serie mit $dD = 20mm$ . d) Rissbildung im Nutboden (selten in den Prüfkörper mit H2; e), Niedrige E.T. des Keils. Der Prüfkörper zeigte eine Bruchlast der über den Mittelwert der Serie H2 mit $dD = 20mm$ liegt. f) Druck des Keils auf dem Bohrloch. g) 2 Risse im Nutboden. h) Langer Riss im Nutboden in der Serie V1a mit $dD = 30mm$ . .....	162
Abbildung 4-6 Prüfkörpergeometrie und Prüfungsaufbau für die Scherversuche SV: Holzdolle (HD, ohne Verkeilung) und Holzkeildolle (HKD, mit Verkeilung).....	179
Abbildung 4-7 a) Aufbau des induktiven Wegaufnehmer-Systems; b) Abbruchkriterium (b).....	181
Abbildung 4-8 a) Last-Verformungsdiagramm und Bild der zugeschnittenen Prüfkörper SV1_20_H1_7 (Gruppe 1); b) Last-Verformungsdiagramm und Bild der zugeschnittenen Prüfkörper SV1_20_H1_9 (Gruppe 2).....	183
Abbildung 4-9 : a) bis e) Bruchbilder der Prüfkörper „Gruppe 1“. f) bis j) Bruchbilder der Prüfkörper „Gruppe 2“ .....	184
Abbildung 4-10 a) Last-Verformungsdiagramm und Bild der zugeschnittenen Prüfkörper SV1_20_H1_T2-90_7 (Gruppe 3); b) Last-Verformungsdiagramm und Bild der zugeschnittenen Prüfkörper SV1_20_H1_T2-90_10 (Gruppe 4) .....	187
Abbildung 4-11 : a) bis e) Bruchbilder der Prüfkörper „Gruppe 3“. f) bis i) Bruchbilder der Prüfkörper „Gruppe 4“. In Gelb die fünfte Bruchstelle.....	188
Abbildung 4-12 Hypothese für die Aufnahme der Schubkräfte in den Scherversuchen SV: a) Holzdolle und b) Holzkeildolle .....	193
Abbildung 4-13 Statische Schema der Holzstifte a) Holzdolle (HD) und b) Holzkeildolle (HKD) und Belastung im Stiftmitte der c) Holzdolle und d) Holzkeildolle .....	193
Abbildung 5-1 Mechanisches Modell der Holzkeildolle unter Zugbeanspruchung. Grün zeigt die aktivierte Fläche infolge der Verkeilung (Spreizwirkung). Hellblau ist die Fläche der vernachlässigten Mantelreibung. .....	194
Abbildung 5-2 Mechanisches Modell der Holzkeildolle. Verteilung der Spannung entlang der z-Achse aufgrund der Verkeilung.....	195
Abbildung 5-3 Mechanisches Modell der Holzkeildolle. a) oben: Reale und idealisierte Spannungsverteilung auf der Bauteiloberfläche. a) unten: Zweidimensionale Darstellung der Spannungsverteilung auf der Bauteiloberfläche $\sigma Nz = 0 \neq 0$ und folgende Lastverteilung $fRz$ entlang der z-	

Achse ; b) dreidimensionale Darstellung der Spannungsverteilung in der Tiefe der Keilwirkung und resultierende Kraft $FR$ .....	196
Abbildung 5-4 Mechanisches Modell der Holzkeildolle unter axialer Zugbeanspruchung. Gleichgewicht der Kräfte infolge der Verkeilung und der Zugbeanspruchung.....	197
Abbildung 5-5 Annahmen zur Spannungsverteilung im Kontaktbereich zwischen Bauteil und Dolle (Fläche Tragwirkung durch Verkeilung (Spreizwirkung) (1)). Angelehnt an Spörk [43]. .....	201
Abbildung 5-6 Annahme a) zur Spannungsverteilung im Kontaktbereich zwischen Bauteil und Dolle angelehnt an Spörk [43] für a) H1 und H3 und b) H2. Legende: D = Dolle; B = Bauteil; E = Eiche; ES = Esche.202	

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1 Zusammenfassung der Material- und Einbauparameter für die Bemessung von ein- und zweischnittigen Verbindungen mit scherbeanspruchten Holznägeln (die Nomenklatur entspricht der der jeweiligen Literaturquelle) .....	28
Tabelle 2-2 Zusammenfassung der Bemessungsmodelle für die Festigkeit und Steifigkeit von ein- und zweischnittigen Verbindungen mit scherbeanspruchten Holznägeln (die Nomenklatur entspricht der der jeweiligen Literaturquelle) .....	29
Tabelle 2-3 Abkürzungen für die variablen Parameter in der Holzkeildolle .....	97
Tabelle 3-1 Geometrische festgelegte Parameter und Holzarten für die TV1 .....	102
Tabelle 3-2 Getestete geometrische Kombinationen für die TV1 .....	102
Tabelle 3-3 Versagenshäufigkeiten nach Prüfreihe .....	109
Tabelle 3-4 Geometrische festgelegte Parameter und Holzarten für die TV2 .....	114
Tabelle 3-5 Prüfkörpereigenschaften TV2: Bauteil .....	115
Tabelle 3-6 Prüfkörpereigenschaften TV2: Dolle .....	116
Tabelle 3-7 Getestete geometrische Kombinationen für die TV1 .....	118
Tabelle 3-8 Wahrscheinlichkeit der Rissbildung der Prüfkörper in TV2 .....	123
Tabelle 3-9 Ergebnisse der TV2 .....	128
Tabelle 3-10 Ergebnisse der FE-Simulationen für H2_T1-0_T2-90_G1 – Fallbeispiel TV1 .....	134
Tabelle 3-11 Ergebnisse zur Bestimmung der Eigenschaften für die Prüfkörper der TV1 .....	135
Tabelle 3-12 Eigenschaften von Laubholz für Bauteil und Dolle für die FEM Berechnung .....	135
Tabelle 3-13 Materialparameter für den FE-Modell (1=longitudinal, 2=tangential, 3= radial) .....	136
Tabelle 3-14 Experimentell bemessene Werte der Spreizung für <b>bN = 2mm</b> .....	137
Tabelle 3-15 Lasteingabe bei Modell H1_0 .....	138
Tabelle 3-16 Pro Holzkombination: Auf der linken Seite: Spannungsverteilung (in Orange) auf die Nutwand; (in Blau) entlang der Grenzlinie zwischen Holzkeildolle und Bauteil. Auf der rechten Seite: (in Orange) Verformung der Nutwand nach Keileinführung und (in Blau) Verformung der Grenzlinie zwischen Holzkeildolle und Bauteil .....	138
Tabelle 3-17 Ergebnisse der Stressanalyse der Reparaturverbindung. In Blau die druckbelasteten Flächenanteile der Holzkeildolle infolge Spreizung der Nut im Bohrloch. In diesem Beispiel ist der Mittelwert der Tiefe der Einwirkung von ca. $tW = 37,5 \text{ mm}$ in der Holzkombination H1 dargestellt .....	139
Tabelle 3-18 Geometrische Angaben und Rohdichte der Prüfkörper (Bauteil) .....	140
Tabelle 3-19 Geometrische Angaben und Rohdichte der Prüfkörper (Dolle) .....	141
Tabelle 3-20 Rohdichteunterschied zwischen Bauteil und assignierter Dolle und charakteristische Mittelwerte .....	141
Tabelle 3-21 Geometrische festgelegte Parameter und Holzarten für die TV3 .....	142
Tabelle 3-22 Prüfergebnisse der Zugversuche TV3 .....	142

Tabelle 3-23 Festgelegte Parameter für die Reparatur mit Holzkeildollen für jede vorgeschlagene Holzkombination. ....	146
Tabelle 4-1 Geometrische Angaben und Rohdichte der Prüfkörper V1 $dD = 20\text{mm}$ (Bauteil) ....	151
Tabelle 4-2 Geometrische Angaben und Rohdichte der Prüfkörper V1 $dD = 20\text{mm}$ (Dolle).....	152
Tabelle 4-3 Geometrische Angaben und Rohdichte der Prüfkörper V1 $dD = 20\text{mm}$ (Keil).....	153
Tabelle 4-4 Geometrische Angaben und Rohdichte der Prüfkörper V1 $dD = 30\text{mm}$ (Bauteil) .....	154
Tabelle 4-5 Geometrische Angaben und Rohdichte der Prüfkörper V1 $dD = 30\text{mm}$ (Dolle).....	155
Tabelle 4-6 Geometrische Angaben und Rohdichte der Prüfkörper V1 $dD = 30\text{mm}$ (Keil).....	156
Tabelle 4-7 Geometrische festgelegte Parameter und Holzarten für die V1 .....	157
Tabelle 4-8 Breite der Nut vor und nach dem Einbau des Keils und Eindringtiefe E.T. des Keils für $dD = 20\text{m}$ . ....	159
Tabelle 4-9 Breite der Nut vor und nach dem Einbau des Keils und Eindringtiefe E.T. des Keils für $dD = 30\text{mm}$ . Die mit ** kennzeichneten Dolle lassen sich in dem Schritt 0 leicht herausnehmen. ....	160
Tabelle 4-10 Prüfergebnisse der V1 für $dD = 20\text{mm}$ .....	168
Tabelle 4-11 Prüfergebnisse der V1 für $dD = 30\text{mm}$ .....	169
Tabelle 4-12 AD-Test: Anderson-Darling-Test, Vertrauensniveau 95%. ....	171
Tabelle 4-13 Auswertung der Ausreißer in der Versuchsreihe nach dem Dean-Dixon-Test.....	172
Tabelle 4-14 Festigkeitseigenschaften und Rohdichte der getesteten Holzkeildollen.....	172
Tabelle 4-15 Geometrische Angaben und Rohdichte der Prüfkörper SV: Bauteil .....	176
Tabelle 4-16 Geometrische Angaben und Rohdichte der Prüfkörper SV: Dolle.....	177
Tabelle 4-17 Geometrische Angaben und Rohdichte der Prüfkörper SV: Keil (Holzkeildolle).....	178
Tabelle 4-18 Geometrische festgelegte Parameter und Holzarten für die SV: Holzdolle und Holzkeildolle ...	178
Tabelle 4-19 Maße der Nut und Eindringtiefe des Keils in den SV – HKD .....	180
Tabelle 4-20 Prüfergebnisse der SV1. Einteilung in Versagensgruppen nach dem Verlauf der Prüfung.....	185
Tabelle 4-21 Charakteristische Festigkeitseigenschaften und Rohdichten der getesteten Holzkeildollen....	190
Tabelle 4-22 Bruchlasten und Verschiebungsmoduln der HKD und HD unter Abscherbeanspruchung .....	192
Tabelle 5-1 Zusammenfassung der im Nachweis (Gl. 21) enthaltenen Parameter für die Reparaturverbindung mit Holzkeildollen unter axialer Zugbeanspruchung.....	198
Tabelle 5-2 Charakteristische Werte der Tragfähigkeit für Holzkeildolle unter axialer Zugbelastung in Abhängigkeit von der Holzkombination. Charakteristische Werte aus den Versuche V1 ( $Rk$ , $HKD$ , $exp$ ) und nach dem vorgestellten Modell ( $Rk$ , $HKD$ , $mod$ ).....	203
Tabelle 5-3 Ergebnisse und Einschätzung der Abschertragfähigkeit der experimentellen Ergebnisse SV-HKD der Holzkeildolle nach dem Modell Perria und Modell Blaß [14].....	204

## Diagrammverzeichnis

Diagramm 3-1 Versagenshäufigkeit im Nutbodenbereich, Rissbildung auf der Oberfläche des Bauteils, Restkern (in %) der Prüfkörper.....	106
Diagramm 3-2 Statistiken über die Ergebnisse TV1: Restkern der geometrischen Kombinationen für a) H1 und b) H2; c) Mittelwerte der Eindringtiefe des Keils; d) Mittelwerte des Abrisses der Dolle (Eindringung + Riss).....	108
Diagramm 3-3 Statistiken über die Rissbildung in TV1 nach Holzart und $\varphi$ : a) b) c) geometrieabhängige Rissbildung für H1; d) e) f) geometrieabhängige Rissbildung für H2.....	109
Diagramm 3-4 Last-Verformungsdiagramme von TV2.....	121
Diagramm 3-5 Optische Messergebnisse für den Probekörper H2_T1-0_T2-90_G1d. a)BQ; b)BS; c)D05 .....	132
Diagramm 3-6 Last-Verformungsdiagramme von TV3.....	144
Diagramm 3-7 Prüfergebnisse (Bruchlasten) und charakteristische Werte der Tragfähigkeit auf axialem Zug für H1, H2 und H3 (TV3) .....	145
Diagramm 4-1 Last-Verformungsdiagramme von V1 für $dD = 20mm$ .....	165
Diagramm 4-2 Last-Verformungsdiagramme von V1 für $dD = 30cm$ .....	167
Diagramm 4-3 Tatsächliche Bruchlast in Abhängigkeit der Holznageldurchmesser a) H1, b) H2, c) H3 und d) Vergleich zwischen den charakteristischen Werten der Tragfähigkeit für Holzkombinationen und Durchmesser der Dolle.....	171
Diagramm 4-4 Vergleich zwischen den charakteristischen Werten der Tragfähigkeit für die Holzkombinationen und den Durchmesser der Dollen in der TV3 (für Holzdolle ohne Verkeilung) und V1 (für Holzkeildolle mit Verkeilung).....	174
Diagramm 4-5 Vergleich zwischen den experimentellen und charakteristischen Werten der Tragfähigkeit für Holzdolle und für Holzkeildolle unter Abscherbeanspruchung.....	189
Diagramm 4-6 Zusammenhang zwischen Bruchlast ( $F_{max,exp}$ ) und Bauteil- und Dollenrohdichte .....	191
Diagramm 5-1 Einschätzung der Abschertragfähigkeit der experimentellen Ergebnisse SV-HKD der Holzkeildolle nach dem Modell Perria und Modell Blaß [14].....	205

# Symbole

## Große lateinische Buchstaben

$E$	Elastizitätsmodul
E.T.	Eindringtiefe
HD	Holzdolle (nicht verkeilt)
HKD	Holzkeildolle
H1	Holzkombination 1. Dolle: Eiche; Bauteil: Fichte
H2	Holzkombination 2. Dolle: Eiche; Bauteil: Eiche
H3	Holzkombination 3. Dolle: Esche; Bauteil: Fichte
$LF$	Luftfeuchte
$F_t$	Zugkraft
$F_c$	Druckkraft
S1	Seite 1 / sichtbare Oberfläche der Verbindung
S1*	Seite 1 / innere Oberfläche der Verbindung
S2	Seite 2 / sichtbare Oberfläche der Verbindung
S2*	Seite 2 / innere Oberfläche der Verbindung
$T$	Temperatur
TV1	Tastversuche 1
TV2	Tastversuche 2
TV3	Tastversuche 3
$V$	Volumen
V1	Versuchsreihe 1
V1a	Versuchsreihe 1a
$X_B$	Bauteil, Eigenschaft
$X_{B,LOCH}$	Bohrloch, Eigenschaft
$X_D$	Dolle, Eigenschaft
$X_K$	Keil, Eigenschaft
$X_N$	Nut, Eigenschaft
$X_{20,65}$	Eigenschaft bei Normalklima: $T = 20^\circ C$ ; $LF = 65\%$ )

**Kleine lateinische Buchstaben**

$b$	Breite
$d$	Masse
$h$	Höhe
$k_s$	Bettungsmodul
$k_{s,\alpha}$	Wert des Bettungsmoduls mit einem Winkel zum Faserverlauf
$l$	Länge
$m$	Masse
$t$	Tiefe
$t_w$	Tiefe der Keilwirkung
$u$	Holzfeuchte
$v(z = 0)$	Spreizung (Verschiebungswert auf der Bauteiloberfläche)
$v(z \neq 0)$	Verschiebungswert in z-Richtung
$\rho_k$	Rohdichte, charakteristischer Wert
$\mu_0 \cdot$	Haftreibungskoeffizient

## Mitwirkende

### Autorinnen und Autoren

Dr.-Ing. Elena Perria (TU Braunschweig - Institut für Baukonstruktion und Holzbau)

Prof. Dr.-Ing. Mike Sieder (TU Braunschweig - Institut für Baukonstruktion und Holzbau)

Dipl.-Ing. Svenja Siegert (IGP Gockel PartGmbB - Ingenieure und Architektin)

Dipl.-Ing. Cordula Reulecke (Niedersächsisches Landesamt für Denkmalpflege)

### Weitere Mitwirkende

Dr.-Ing. Christina Krafczyk (Präsidentin, Niedersächsisches Landesamt für Denkmalpflege)

Zimmermeister und Restaurator im Zimmerhandwerk Michael Knop (Werkstätten für Denkmalpflege GmbH Quedlinburg)

Zimmerpolier Steffen Behrens (Werkstätten für Denkmalpflege GmbH Quedlinburg )

Dipl.-Ing. M. Sc. Architektin Tanja Gockel (IGP Gockel PartGmbB - Ingenieure und Architektin)

M. Sc. Xinyi Li (ehem. TU Braunschweig - Institut für Baukonstruktion und Holzbau)

### Projektpartner und weitere Fördermittelgeber

#### Forschende Stelle:

TU Braunschweig - Institut für Baukonstruktion und Holzbau  
Schleinitzstraße 21 A, 38106 Braunschweig

Niedersächsisches Landesamt für Denkmalpflege  
Scharnhorststraße 1, 30175 Hannover  
Präsidentin Dr.-Ing. Christina Krafczyk

#### Projektpartner:

IGP Gockel PartGmbB - Ingenieure und Architektin  
Kieler Straße 1, 34225 Baunatal

Werkstätten für Denkmalpflege GmbH Quedlinburg  
Am Langenberg 3, 06502 Thale OT Westerhausen

### Fachliche Betreuung

Dr.-Ing. Michael Brüggemann, Brüggemann Kisseler Ingenieure im Auftrag des BBSR, Referat WB 3 „Forschung im Bauwesen“

## Kurzbiographien Autoren



### Dr.-Ing. Elena Perria

Studium der Architektur an der Universität Florenz. Assistentin beim "Landesamt für Denkmalpflege für Florenz, Pistoia und Prato". Lehrbeauftragte für "Restaurierung und Konservierung historischer Gebäude", Universidad Santo Tomàs de Aquino (Kolumbien). 2016 Promotion zum Thema "Charakterisierung von schrägem Hackenblatt mit Keil" an der TU Braunschweig / Universität Florenz. Seit 2016 wissenschaftliche Mitarbeiterin und Post-Doc verantwortlich für die Lehrveranstaltung "Bauwerkserhaltung im Holzbau" am Institut für Baukonstruktion und Holzbau der Technischen Universität Braunschweig, Deutschland.



### Univ. Prof. Dr.-Ing. Mike Sieder

Studium des Bauingenieurwesens an der Bauhaus-Universität Weimar. 2003 Promotion am Lehrstuhl für Baukonstruktion, Holzbau und Bauphysik an der Ruhr-Universität Bochum. Freiberufler für material- und konstruktionsübergreifende Planung von Tragwerken. Vertretungsprofessur des Lehrstuhls für Holzbau und Baukonstruktion an der Technischen Universität München. Seit 2014 Leiter des Instituts für Baukonstruktion und Holzbau, Technische Universität Braunschweig. Öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Holzbau und tragende Bauteile (Statik und Konstruktion) im Holzbau. Mitglied in verschiedenen nationalen und internationalen Normungsgremien und Ausschüssen auf dem Gebiet des Holzbau sowie Vorsitzender des NA 005-04-01 AA "Holzbau".



### Dipl.-Ing. Svenja Siegert geb. Gockel.

Bauingenieurstudium an der Universität Kassel. Während ihres Bauingenieurstudiums Angestellte im Ingenieurbüro Brenker und Gockel. Seit 2008 selbstständige Ingenieurin. Schwerpunkte: Sanierung denkmalgeschützter Gebäude, beginnend bei der Analyse und Bewertung des Bestands in ingenieurtechnischen Untersuchungen, Sanierungskonzeptentwicklung unter Beachtung der bauhistorisch und konstruktiv vorgegebenen, gebäudespezifischen Möglichkeiten und sorgsamen und minimalinvasiven Umgangs mit dem historischen Bestand, planerische Umsetzung der Sanierung unter Aspekten der Konstruktions- und Materialgerechtigkeit. Energie-Effizienz-Expertin, Nachweisberechtigte für Statik und Wärmeschutz, Beratende Ingenieurin. Seit 2016 firmiert das Büro unter IGP Gockel PartGmbB.



### Dipl.-Ing. Cordula Reulecke

Architekturstudium an der Universität Kassel. Praxissemester auf Baustellen, in der Werkstatt einer bundesweit tätigen Restaurierungsfirma und beim Landeskonservator Berlin; dort kunsthistorisches Begleit-Semester an der FU Berlin. Kurzvolontariat beim Hessischen Landesamt für Denkmalpflege, Marburg. Inventarisorin beim niedersächsischen Institut für Denkmalpflege, danach Leiterin der Abteilung Denkmalschutz im Landkreis Marburg-Biedenkopf, Seit 1991 in der Region Braunschweig tätig, beginnend bei der Bezirksregierung, Obere Denkmalschutzbehörde, als Kulturdezernentin und Bezirkskonservatorin, 2005 Abordnung an das Niedersächsische Landesamt für Denkmalpflege, seit 2014 (bis 02/2024) Referatsleiterin Bau- und Kunstdenkmalpflege in Braunschweig.