



P. Fellmoser

Druckrohrleitungen aus Holz – Anwendung und Bemessung



P. Fellmoser

Druckrohrleitungen aus Holz – Anwendung und Bemessung

**Band 9 der Reihe
Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau**

Herausgeber

Universität Karlsruhe (TH)

Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen

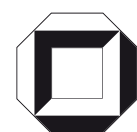
Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. J. Blaß

Druckrohrleitungen aus Holz – Anwendung und Bemessung

von

P. Fellmoser

Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen
Universität Karlsruhe (TH)



universitätsverlag karlsruhe

Dissertation, genehmigt von der
Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften der
Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH), 2007

Referenten: Univ.-Prof. Dr.-Ing. H.J. Blaß
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. F. Nestmann

Impressum

Universitätsverlag Karlsruhe
c/o Universitätsbibliothek
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe
www.uvka.de



Dieses Werk ist unter folgender Creative Commons-Lizenz
lizenziert: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/de/>

Universitätsverlag Karlsruhe 2007
Print on Demand

ISSN: 1860-093X
ISBN: 978-3-86644-177-4

Druckrohrleitungen aus Holz

Anwendung und Bemessung

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für

Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften

der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Peter Fellmoser

aus Bühl

Tag der mündlichen Prüfung: 11. Juli 2007

Hauptreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. H.J. Blaß

Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c.mult. F. Nestmann

Karlsruhe 2007

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen der Universität Karlsruhe (TH). Das zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit finanziellen Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert.

Mein besonderer Dank gilt meinem Hauptreferenten Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans Joachim Blaß, der mich jederzeit mit wertvollen Hinweisen unterstützte. Sein Engagement und seine Bereitschaft, mir die erforderliche wissenschaftliche Freiheit zu lassen, haben diese Arbeit erst ermöglicht.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c.mult. Franz Nestmann, Universität Karlsruhe (TH), danke ich herzlich für die Initiierung des Verbundprojektes, für die Übernahme des Korreferates und die daraus entstandenen Anregungen.

Danken möchte ich auch Herrn Dr.-Ing. Rainer Görlacher, der mich mit Fragen, Kritik und Ideen befähigt hat, meine Arbeit weiterzuentwickeln.

Meinen Kollegen Alexander Klein, Michael Deeg, Manfred Hartmann, Hans Lafferthon, Martin Huber, Günter Kranz, Michael Pfeifer und Werner Waldeck möchte ich herzlich für ihre kreative Mitarbeit bei der Durchführung der Versuche danken.

Allen meinen Kollegen am Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen bin ich für ihre Hilfsbereitschaft und für das angenehme Arbeitsklima am Lehrstuhl sehr dankbar.

Peter Fellmoser

Kurzfassung

Druckrohrleitungen aus Holz wurden im 19. Jahrhundert überwiegend in Nordamerika als Zuleitung für Wasserkraftanlagen eingesetzt. Nach einem deutlichen Rückgang Mitte des 20. Jahrhunderts erhielt der Einsatz von Druckrohrleitungen aus Holz durch die zunehmende Bedeutung regenerativer Ressourcen in den letzten Jahren neue Impulse.

Im Hinblick auf die Nutzung unterirdischer Wasserressourcen auf der indonesischen Insel Java wurde im Rahmen dieser Arbeit der Einsatz von Druckrohrleitungen aus Holz als Zuleitung für Wasserkraftanlagen untersucht. Da Druckrohrleitungen aus Stahl oder Beton wegen des großen Gewichtes der Rohrschüsse in Zusammenhang mit der Enge und Unwegsamkeit in den Höhlen und den sich daraus ergebenden Schwierigkeiten beim Bau ausscheiden, bietet sich Holz als geeigneter Baustoff für die Druckrohrleitung an.

Die Herstellung von Druckrohrleitungen aus Holz kann in offener Bauweise entweder durch eine Verlegung im Graben auf kiesigem Untergrund mit anschließender Verfüllung oder, wie in den Karsthöhlen in Indonesien geplant, auf Sätteln als Auflager erfolgen.

Zunächst wurde der Einfluss der Holzfeuchte auf relevante Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften von Holz bestimmt. Vorgabe im Rahmen des Projektes war die Verwendung von lokal verfügbaren indonesischen Holzarten. Neben den ausgewählten indonesischen Holzarten Akasia, Jati, Puspa und Keruing wurde zum Vergleich die in Deutschland heimische Holzart Lärche einbezogen.

Die Ergebnisse dieser Versuche dienten als Eingangsdaten für ein Rechenmodell, mit dem das Trag- und Verformungsverhalten von aufgelagerten Druckrohrleitungen aus Holz bestimmt wurde. Durch umfangreiche experimentelle Untersuchungen wurde die Eignung des Rechenmodells nachgewiesen. Mit Hilfe einer Parameterstudie wurden Bemessungstabellen erstellt, mit denen eine schnelle Bemessung von aufgelagerten Druckrohrleitungen aus Nadelholz der Festigkeitsklasse C24 durchgeführt werden kann.

Zusätzlich zu den Bemessungstabellen für aufgelagerte Druckrohrleitungen aus Holz wird für die Bemessung von erdverlegten Druckrohrleitungen aus Holz basierend auf Ergebnissen von experimentellen und theoretischen Untersuchungen ein praxisgerechtes, vereinfachtes Bemessungskonzept vorgestellt.

Abschließend werden hydraulische Gesichtspunkte, insbesondere instationäre Strömungsvorgänge, im Hinblick auf die Bemessung von Druckrohrleitungen aus Holz genauer untersucht.

Abstract

Wood stave pipelines were mainly used in the 19th century in North America as inlet pipe for hydroelectric power stations. After a distinct decrease in the middle of the 20th century the application of wood stave pipelines got new impulses in the last years because of the increasing importance of regenerative resources.

With regard to the utilisation of underground water resources in mattock caves in Java, Indonesia studies for the application of wood stave pipelines as inlet pipe for hydroelectric power stations were performed. The access to the caves is very cramped; therefore pipelines of steel or concrete can not be transported in the caves. By contrast single wood staves may be transported separately into the caves and put together to a pipeline in situ.

Wood stave pipelines can be assembled in a ditch and subsequent filling of the ditch or on bearings as planned in the mattock caves in Java.

At first the influence of moisture content on basic properties of strength and stiffness of different wood species was determined. Requirement of the research project was the use of local Indonesian wood species. Beside the selected Indonesian wood species Acasia, Jati, Puspa and Keruing for comparison the German native species Larch was included.

The results of these tests were used as parameters for a finite element model. The finite element model was used for the determination of the complex stress condition and deformation behaviour of wood stave pipelines on bearings.

By extensive experimental studies the acceptability of the finite element model was proved. Based on a parameter study span tables were derived for the design of wood stave pipelines on bearings (softwood: strength class C24 according to DIN 1052 (08/2004))

Additionally to the span tables for wood stave pipelines on bearings a practice-orientated and simplified design of buried wood stave pipelines based on experimental and theoretical investigations was derived.

Concluding hydraulic aspects, especially transient flows, were analysed with regard to the design of wood stave pipelines.

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Ziel der Arbeit	2
1.3	Vorgehensweise	3
2	Eigenschaften ausgewählter Holzarten	5
2.1	Vorgaben	5
2.2	Auswahl und Eigenschaften	6
3	Feuchteaufnahme und -transport im Holz	7
3.1	Sorption des Holzes	7
3.2	Kenngößen der Holzfeuchte	8
4	Einfluss der Holzfeuchte	9
4.1	Abhängigkeit des Elastizitäts- und Schubmoduls	10
4.1.1	Kenntnisstand	10
4.1.2	Versuchsdurchführung und Auswertung	12
4.2	Abhängigkeit der Biegefestigkeit	19
4.2.1	Kenntnisstand	19
4.2.2	Versuchsdurchführung und Auswertung	20
4.3	Abhängigkeit der Querdruckfestigkeit	22
4.3.1	Kenntnisstand	22
4.3.2	Versuchsdurchführung und Auswertung	24
4.3.2.1	Querdruckbeanspruchung unter Vollbelastung	25
4.3.2.2	Querdruckbeanspruchung unter Teilflächenbelastung	29
4.4	Abhängigkeit der Scherfestigkeit	32
4.4.1	Kenntnisstand	32
4.4.2	Versuchsdurchführung und Auswertung	33
4.5	Abhängigkeit der Haftung und Reibung	36
4.5.1	Kenntnisstand	36
4.5.2	Versuchsdurchführung und Auswertung	36
4.6	Zusammenfassung der Untersuchungen zum Einfluss der Holzfeuchte	41
5	Quellverhalten von Holz	42
5.1	Freie Quellung	42
5.1.1	Kenntnisstand	42
5.1.2	Versuchsdurchführung und Auswertung	43
5.2	Behinderte Quellung	49
5.2.1	Kenntnisstand	49
5.2.2	Versuchsdurchführung und Auswertung	50
6	Herstellung und Verlegung von Druckrohrleitungen aus Holz	56
6.1	Allgemeines	56
6.2	Aufgelagerte Druckrohrleitungen aus Holz	59
6.3	Erdverlegte Druckrohrleitungen aus Holz	61

6.4	Anschlüsse und Sonderelemente	62
7	Experimentelle Untersuchungen von Druckrohrleitungen aus Holz	66
7.1	Quellverhalten	66
7.1.1	Versuchsdurchführung	66
7.1.2	Beanspruchung der Spannringe infolge Quellen	67
7.2	Trag- und Verformungsverhalten von aufgelagerten Druckrohrleitungen aus Holz	69
7.2.1	Versuchsdurchführung	69
7.2.2	Beanspruchung der Spannringe	71
7.2.3	Verformung in Längsrichtung und Querschnittsverformung	77
7.2.4	Einfluss des Auflagerabstandes	78
8	Berechnungsansatz für die Lastfälle Quellen und Vorspannung	80
8.1	Theoretische Untersuchung	80
8.2	Vergleich mit Versuchsergebnissen	86
9	FE-Modell für aufgelagerte Druckrohrleitungen aus Holz	90
9.1	Allgemeines	90
9.2	Geometrie	90
9.3	Materialien	92
9.4	Einwirkungen	92
9.4.1	Eigengewicht	93
9.4.2	Vorspannung	93
9.4.3	Quellen	94
9.4.4	Wasserinnendruck	95
9.5	FE-Modellierung	96
9.6	Vergleich mit Versuchsergebnissen	99
9.6.1	Beanspruchung der Spannringe	100
9.6.2	Verformung in Längsrichtung und Querschnittsverformung	102
9.6.3	Querdruckspannung der Holzdauben in Umfangsrichtung	104
9.6.4	Querdruckspannung der Holzdauben in radialer Richtung	105
9.6.5	Biegespannung der Holzdauben in Längsrichtung	106
9.6.6	Schubspannung der Holzdauben	109
9.6.7	Schubspannung in der Nut- und Federverbindung in Längsrichtung der Holzdauben	109
10	Bemessungskonzept	110
10.1	Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit	110
10.2	Bemessung von aufgelagerten Druckrohrleitungen aus Holz	112
10.3	Bemessung von erdverlegten Druckrohrleitungen aus Holz	117
10.3.1	Beanspruchung der Rohrleitung in Längsrichtung	117
10.3.2	Beanspruchung des Rohrquerschnitts infolge Erddruck und Auflasten	119

10.3.3	Beanspruchung des Rohrquerschnitts infolge Vorspannung, Wasserinnendruck und Quellungsdruck	123
11	Hydraulik von Rohrleitungssystemen	124
11.1	Wirkungsweise von Kleinwasserkraftanlagen	124
11.2	Strömungswiderstand und Rohrleitungsverluste	125
11.3	Vordimensionierung von Druckrohrleitungen aus Holz	127
11.4	Dynamische Strömungsvorgänge in Druckrohrleitungen (Druckstoß)	129
11.4.1	Druckwellengeschwindigkeit und Schließvorgang	129
11.4.2	Druckstoßberechnung	131
12	Zusammenfassung und Ausblick	135
13	Bezeichnungen	137
14	Literatur	143
15	Zitierte Normen	150
Anhang A	Anlagen zu Kapitel 2.2	151
Anhang B	Anlagen zu Kapitel 5.1	156
Anhang C	Anlagen zu Kapitel 5.2	162
Anhang D	Anlagen zu Kapitel 7.1	169
Anhang E	Anlagen zu Kapitel 7.2	171
Anhang F	Anlagen zu Kapitel 10.2	173
Anhang G	Anlagen zu Kapitel 10.3.2	194
Anhang H	Anlagen zu Kapitel 11	203

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Beweggründe zur wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit Druckrohrleitungen aus Holz als Bestandteil von Kleinwasserkraftanlagen sind in der Nutzung von Wasserressourcen zu sehen. Im Rahmen eines BMBF-Verbundprojektes zur Erschließung und Bewirtschaftung unterirdischer Karstfließgewässer in Mitteljava, Indonesien (vgl. Nestmann und Oberle (2002)) war geplant, die Nutzung dieser Wasserressourcen eingehend zu analysieren sowie die technologischen Grundlagen zu entwickeln und zu optimieren.

Das Untersuchungsgebiet, die Gunung Sewu, eine ca. 1400 km² große Karstlandschaft an der Südküste Javas (Bild 1-1), setzt sich aus einem dichten und harten Kalkstein zusammen. Der Karstkörper ist von Hunderten miteinander vernetzter Höhlen durchzogen; daraus resultiert der komplette Abfluss jeglichen Oberflächenwassers durch ein weit verzweigtes System im Untergrund. Das Wasser dieser unterirdischen Flüsse tritt fast vollständig erst wieder in Quellen an der Küste zutage.



Bild 1-1 Untersuchungsgebiet Gunung Sewu an der Südküste Javas

Durch die schnelle Versickerung des Niederschlags in den Karstaquifer und das Fehlen geeigneter Wasserspeicher leiden die Bewohner der Gunung Sewu in der Trockenzeit unter dem dadurch entstehenden Wassermangel (Bild 1-2). Die derzeitige Nutzung der Wasservorräte mittels über Dieselgeneratoren versorgter Pumpsysteme kann den momentanen Wasserbedarf nicht decken. Ebenso ist das bisherige Konzept der Wasserförderung aus wirtschaftlicher und ökologischer Sicht langfristig nicht zu verantworten.



Bild 1-2 Landwirtschaft während der Trockenzeit auf Java

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Bereich Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH) wurde deshalb ein Konzept zur Umsetzung der Wasser- und Energiebewirtschaftung von unterirdischen Karstfließgewässern erstellt.

1.2 Ziel der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Lösungskonzept erarbeitet mit dem Ziel, die Trink- und Brauchwasserversorgung der Bevölkerung auf Java während der Trockenzeit unter Nutzung regenerativer Energiequellen und den Bedingungen vor Ort angepasster Technologien zu verbessern. Während der Trockenzeit sind die unterirdischen Wasserressourcen die maßgebende Quelle der Wasserversorgung (Bild 1-3). Ein Konzept zur Nutzung dieser Wasserressourcen ist der Einsatz einer Druckrohrleitung aus Holz als Bestandteil einer unterirdischen Wasserkraftanlage.

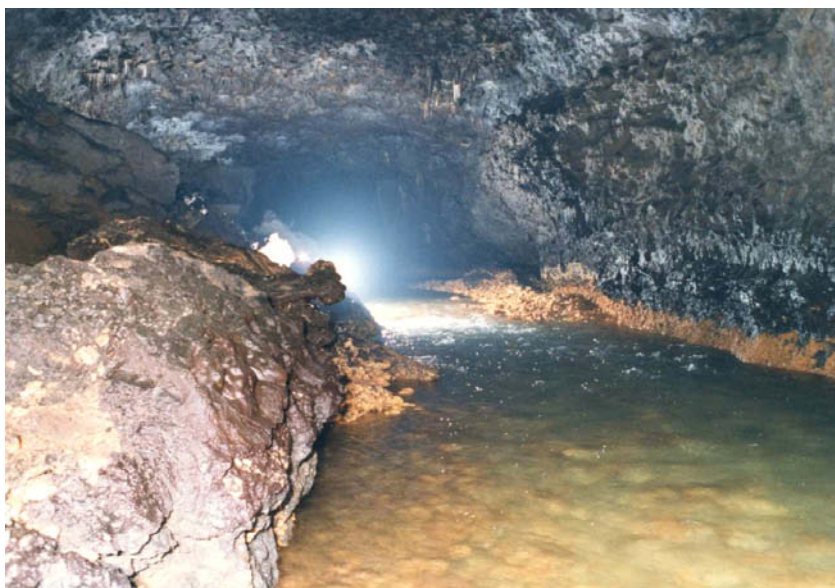


Bild 1-3 unterirdische Karstfließgewässer auf Java (Gua Bribin)

Der Zugang zu den Höhlen ist in vielen Fällen nur über einen steilen Schacht bzw. Dolineneinbruch oder über einen engen Stollen möglich. Da Druckrohrleitungen aus Stahl oder Beton wegen des großen Gewichtes der Rohrschüsse in Zusammenhang mit der Enge und Unwegsamkeit in der Höhle und den sich daraus ergebenden Schwierigkeiten beim Bau ausscheiden, bietet sich Holz als geeigneter Baustoff für die Druckrohrleitung an.

Das Ziel dieser Arbeit bestand folglich in der Entwicklung eines Bemessungskonzeptes für Druckrohrleitungen aus Holz sowie der Lösung von Problemstellungen im Zusammenhang mit der Verlegung der Rohrkonstruktion in einer Höhle.

Mit Hilfe dieser nachhaltigen Variante der Energiegewinnung und Wasserförderung ist eine Bewirtschaftung von Karstfließgewässern in Höhlen realisierbar, in denen der partielle Einstau der Höhle aufgrund von Wasserverlusten oder geostatischen Problemen nicht möglich ist.

Zusätzlich soll durch diese Arbeit infolge der Vermittlung von Wert und Nutzen einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung ein wertvoller Beitrag zum „sustainable development“ in Indonesien geleistet werden.

1.3 Vorgehensweise

Um Druckrohrleitungen aus Holz in unterirdischen Karstfließgewässern in Mitteljava bauen zu können, sind zwei Themenbereiche zu untersuchen: der erste betrifft den Baustoff Holz, da in Südostasien und speziell in Indonesien völlig andere Holzarten verfügbar sind als in Europa, zum zweiten sind Probleme in Zusammenhang mit der Rohrkonstruktion in der Höhle zu lösen.

Der erste Arbeitsschritt war zunächst das Finden geeigneter Holzarten, die in Indonesien lokal verfügbar sind und sich als Baustoff für Holzdaubenrohre eignen. Anhand experimenteller Untersuchungen wurde der Einfluss der Holzfeuchte auf physikalische und elasto-mechanische Eigenschaften an ausgewählten Holzarten ermittelt:

- Abhängigkeit der elasto-mechanischen Eigenschaften von der Holzfeuchte (Elastizitäts- und Schubmodul sowie Biege-, Schub- und Querdruckfestigkeit);
- Quellverhalten im Hinblick auf die Beanspruchung der Spannringe aus Stahl nach dem Füllen der Druckrohrleitung;
- Abhängigkeit der Haftung und Reibung von der Holzfeuchte zur Bestimmung der Schubtragfähigkeit in der Nut- und Federverbindung in Längsrichtung der Holzdauben.

Die Ergebnisse dieser Versuche dienten als Eingangsdaten für ein Rechenmodell zur Bestimmung des Biegetragverhaltens von aufgelagerten Druckrohrleitungen aus

Holz. Durch umfangreiche experimentelle Untersuchungen wurde die Eignung des Rechenmodells nachgewiesen.

Zusammenfassend werden Bemessungsvorschläge für Druckrohrleitungen aus Holz vorgestellt. Mit Hilfe einer Parameterstudie wurden Bemessungstabellen erstellt, mit denen eine schnelle Bemessung von aufgelagerten Druckrohrleitungen aus Nadelholz der Festigkeitsklasse C24 durchgeführt werden kann. Für die Bemessung von erdverlegten Druckrohrleitungen aus Holz wird ebenso ein praxisgerechtes, vereinfachtes Bemessungskonzept vorgestellt.

2 Eigenschaften ausgewählter Holzarten

2.1 Vorgaben

Vorgabe im Rahmen des Projektes war die Verwendung von lokal verfügbaren indonesischen Holzarten (Bild 2-1). Durch nachhaltige Bewirtschaftung, Nutzung und Entwicklung des Tropenwaldes wird die Lebensqualität der Menschen verbessert und gleichzeitig die natürlichen und wirtschaftlichen Ressourcen des Waldes langfristig bereitgestellt und gewährleistet. Dadurch soll das Bewusstsein für den Wert des Waldes und des Holzes gefördert und ein Beitrag zum „sustainable development“ in Indonesien geleistet werden. Wird durch verantwortungsbewusstes Handeln ein Gleichgewicht zwischen Ökonomie und Ökologie geschaffen, dient eine sinnvolle Nutzung des Tropenwaldes seinem Fortbestand. Der Einsatz von Holz als regenerativer, umweltfreundlich produzierter Baustoff fördert somit eine nachhaltige Forstwirtschaft in den Tropen. Ein Instrument für den Schutz von Tropenhölzern ist die Zertifizierung. Das Zertifikat des Forest Stewardship Council (FSC) gilt wegen seiner eindeutig sozial und ökologisch ausgerichteten Richtlinien als akzeptabelstes Gütesiegel für die Waldwirtschaft. Die in diesem Projekt ausgewählten indonesischen Holzarten sind nach den Regeln des FSC zertifiziert.



Bild 2-1 Waldbewirtschaftung auf Java (Indonesien)

2.2 Auswahl und Eigenschaften

In Deutschland werden für Holzdaubenrohre bevorzugt die Nadelholzarten Kiefer, Lärche und Douglasie eingesetzt. Die in Indonesien verfügbaren Hölzer sind im Gegensatz zu den in Deutschland für Holzdaubenrohre verwendeten Holzarten sämtlich Laubhölzer. Ausgehend von einer gründlichen Literaturrecherche und lokalen Gegebenheiten wurden die in Tabelle 2-1 angegebenen indonesischen Holzarten für den Einsatz als Holzdaubenrohre näher untersucht. Kriterien für die Auswahl geeigneter Holzarten waren elasto-mechanische Eigenschaften (insbesondere bei Wassersättigung), Rohdichte, Schwind- und Quellverhalten, Trocknungsverhalten, Bearbeitbarkeit, Dauerhaftigkeit, Verfügbarkeit und Preis. Zusätzlich wurde zum Vergleich die in Deutschland heimische Holzart Lärche in die Untersuchungen einbezogen. Die untersuchten Hölzer wurden zu Beginn des Jahres 2004 eingekauft. Die indonesischen Holzarten wurden über den Holzhandel in Yogyakarta besorgt, die heimische Holzart Lärche wurde von einem Sägewerk in Donaueschingen geliefert.

Tabelle 2-1 ausgewählte Holzarten

Holzart	Botanische Benennung	Botanische Familie
Akasia	<i>Acacia leucophloea</i>	<i>Mimosaceae</i>
Jati	<i>Tectona grandis L.f.</i>	<i>Verbenaceae</i>
Keruing	<i>Dipterocarpus alatus Roxb.</i>	<i>Dipterocarpaceae</i>
Puspa	<i>Schima wallichii Korth.</i>	<i>Theaceae</i>
Lärche	<i>Larix decidua Mill.</i>	<i>Pinaceae</i>

Eigenschaften und Merkmale der ausgewählten Holzarten werden von Blaß und Fellmoser (2006) näher beschrieben. Zur genauen Untersuchung der in Tabelle 2-1 angegebenen Holzarten wurden Mikrofotografien mit Hilfe eines Lichtmikroskops in den drei anatomischen Schnittrichtungen durchgeführt. In Anhang A ist eine Auswahl der Aufnahmen zusammengestellt. Die Bestimmung erfolgte mit Hilfe von Beschreibungen und Mikrofotografien nach Prayitno (2003), Begemann (1981), Wagenführ (1996) und Schweingruber (1990).

3 Feuchteaufnahme und -transport im Holz

3.1 Sorption des Holzes

Holz besitzt als kapillarporöser Stoff hygroskopische Eigenschaften: der Feuchtegehalt von Holz ändert sich in Abhängigkeit vom jeweiligen Umgebungsklima. Die Aufnahme von Feuchte erfolgt dabei über die Luft oder durch direkte Befeuchtung mit einer Flüssigkeit. Alle mechanischen und physikalischen Eigenschaften von Holz werden mehr oder weniger stark vom Feuchtegehalt des Holzes beeinflusst.

Die Aufnahme von Feuchte aus der Luft wird durch das Mikrosystem reguliert, die direkte Aufnahme in flüssigem Medium (z.B. Wasser) findet über das Makrosystem statt. Der Feuchtetransport innerhalb des Makrosystems erfolgt dabei in Faserlängsrichtung durch die vorhandenen Hohlräume der Zellelemente. Über Tüpfel und zum Teil über Holzstrahlen kann Feuchte auch quer zur Faserrichtung transportiert werden. Die Eindringgeschwindigkeit in Faserlängsrichtung ist jedoch um ein Vielfaches höher. Die interzellulären Hohlräume im Mikrosystem sind für Wasser zugänglich und in ihnen wird Wasser auch über kurze Strecken geleitet. Die Wasserleitfähigkeit selbst wird durch Merkmale wie Tüpfelverklebungen und Einlagerung von Kernstoffen bestimmt, welche das hygroskopische Potential verringern. Bei Wassersättigung ist das Mikro- und das Makrosystem des Holzes, d.h. die Hohlräume in den Zellwänden und Tracheiden sowie die Gefäße, maximal mit Wasser gefüllt.

Die Wasseraufnahme von Holz in flüssigem oder gasförmigem Zustand wird als Sorption bezeichnet. Bei diesen Vorgängen im hygroskopischen Bereich stellt sich ein Gleichgewichtsfeuchtegehalt ein, der u.a. von der relativen Luftfeuchte, der Temperatur, dem Luftdruck und dem Aufbau des Holzes abhängig ist und als hygroskopisches Verhalten des Holzes bezeichnet wird. Die dabei auftretenden Sorptionskurven zeigen einen typischen S-förmigen Verlauf. Aufgrund des Hystereseeffektes ist der sich bei der Feuchteabgabe (Desorption) einstellende Feuchtegehalt des Holzes um ca. 1 % bis 2 % höher als bei der Feuchteaufnahme (Absorption), was Kollmann (1982) mit der Trägheit der Moleküle begründet.

Bis zum Fasersättigungsbereich treten bei der Sorption im hygroskopischen Bereich verschiedene Vorgänge auf (Niemz (1993)). Die Chemisorption als erste Phase der Sorption tritt bei einer Holzfeuchte von 0 % bis 6 % auf. Wassermoleküle werden über Wasserstoffbrücken zwischen benachbarten Celluloseketten eingelagert. Ursache hierfür sind molekulare Anziehungskräfte. Die Adsorption erfolgt bei einer Holzfeuchte zwischen 6 % und 15 %. Durch Anziehungskräfte der inneren Oberfläche des Holzes im Mikrosystem (van der Waalsche Kräfte oder elektrostatische Kräfte) wird Wasser in den Poren angelagert. Dabei wird eine polymolekulare Wasserschicht ausgebildet. Die anschließende Kapillarkondensation tritt bei einer Holzfeuchte von 15 % bis zum Fasersättigungsbereich auf. Aufgrund des Sättigungsdruckes konden-

siert ein Teil des Wasserdampfes in den Kapillaren und schlägt sich als Flüssigkeit auf der Holzoberfläche des Zellwandsystems nieder. Die Folge ist, dass zu jeder Temperatur und jedem Dampfdruck der Umgebung eine bestimmte Menge des Dampfes im Holz kondensiert. Mit zunehmendem Feuchtegehalt lagert sich dabei Wasser in den interzellulären und interfibrillären Hohlräumen ein. Bei Erreichen des Fasersättigungsbereiches von Holz kann sich die Zellwand nicht weiter ausdehnen und die Möglichkeit der Feuchteaufnahme im Mikrosystem ist erschöpft. Darüber hinaus wird Wasser in den makroskopischen Hohlräumen eingelagert. Dieses Wasser wird im Gegensatz zu dem gebundenen Wasser im hygroskopischen Bereich als „freies Wasser“ bezeichnet.

3.2 Kenngrößen der Holzfeuchte

Je nach Wasseranteil im Holz werden drei Grenzzustände (Darrtrocken, Fasersättigung und Wassersättigung) unterschieden. Der Wasseranteil des Holzes wird in gebundenes Wasser (Anteil des Wassers unterhalb des Fasersättigungsbereiches) und freies Wasser (zusätzlicher Anteil des Wassers oberhalb des Fasersättigungsbereiches) unterteilt.

Im darrtrockenen Zustand enthält das Holz praktisch kein Wasser. Dieser Zustand ist nur durch Trocknung (Darrmethode) zu erreichen. Der darrtrockene Zustand von Holz ist neben dem Feuchtegehalt im Normalklima 20/65 eine wichtige Bezugsgröße bei Angaben von Holzeigenschaften, die von der Holzfeuchte abhängig sind.

Der Fasersättigungsbereich kennzeichnet den höchstmöglichen Gehalt an gebundenem Wasser und wird erreicht, wenn das Holz mit wasserdampfgesättigter Luft umgeben ist. Der konkrete Feuchtegehalt bei Fasersättigung schwankt bei den in Deutschland heimischen Holzarten in einem Bereich zwischen 22 % und 35 % und liegt im Durchschnitt bei 28 % (Trendelenburg (1939)). Stevens (1938), Trendelenburg und Mayer-Wegelin (1955) sowie Kollmann (1982) geben sogar einen Bereich für die Fasersättigungsfeuchte von bis zu 60 % an. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Holzarten werden nach Niemz (1993) durch Differenzierungen im Zellwandfeinbau und im chemischen Aufbau hervorgerufen.

Beim Überschreiten des Fasersättigungsbereiches wird freies Wasser in das Makrosystem eingelagert. Bei dem als Wassersättigung bezeichneten Grenzzustand ist sowohl das Mikro- als auch das Makrosystem mit Wasser gefüllt.

Die praktische Bedeutung der Fasersättigungsfeuchte liegt in der Abhängigkeit der Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften: oberhalb des Fasersättigungsbereiches sind die Festigkeiten und Steifigkeiten unabhängig vom Feuchtegehalt, unterhalb weisen sie eine signifikante und stetige Abhängigkeit davon auf.

4 Einfluss der Holzfeuchte

Holz ist ein inhomogener, anisotroper und poriger Werkstoff, dessen Eigenschaften insbesondere durch Feuchte beeinflusst werden. Unabhängig von strukturellen Einflüssen von Holz bewirken klimatische Bedingungen, die in direktem Zusammenhang mit der Holzfeuchte stehen, Eigenschaftsänderungen. Dieser Einfluss der Holzfeuchte auf die elasto-mechanischen Eigenschaften des Holzes ist Bestandteil vieler Untersuchungen.

Die elasto-mechanischen Eigenschaften von Holz nehmen mit zunehmendem Feuchtegehalt im hygroskopischen Bereich ab. Dieser Prozess wird bei Erreichen des Fasersättigungsbereiches jedoch beendet; eine weitere Feuchteaufnahme bewirkt im kapillaren Bereich (oberhalb der Fasersättigung) keine Änderung der elasto-mechanischen Eigenschaften mehr (Bild 4-1).

Die Abnahme der Festigkeiten und Steifigkeiten von Holz mit zunehmender Holzfeuchte im hygroskopischen Bereich beruhen auf der Reduzierung der elektrostatischen Bindungen und der Nebervalenzkräfte, welche den Zusammenhalt der Molekülketten bewirken. Durch Einlagerung von Wasser in die intermizellaren und interfibrillaren Hohlräume rücken die Fibrillen weiter auseinander. Aus diesem Grund werden mit zunehmender Feuchteaufnahme die Anziehungskräfte geringer und das Holz wird leichter verformbar.

Die Festigkeiten werden dabei von der Holzfeuchte stärker beeinflusst als die Steifigkeiten. Zusätzlich ist der Einfluss der Holzfeuchte auf die Festigkeiten abhängig von der Beanspruchungsart (Biegung, Zug, Druck).

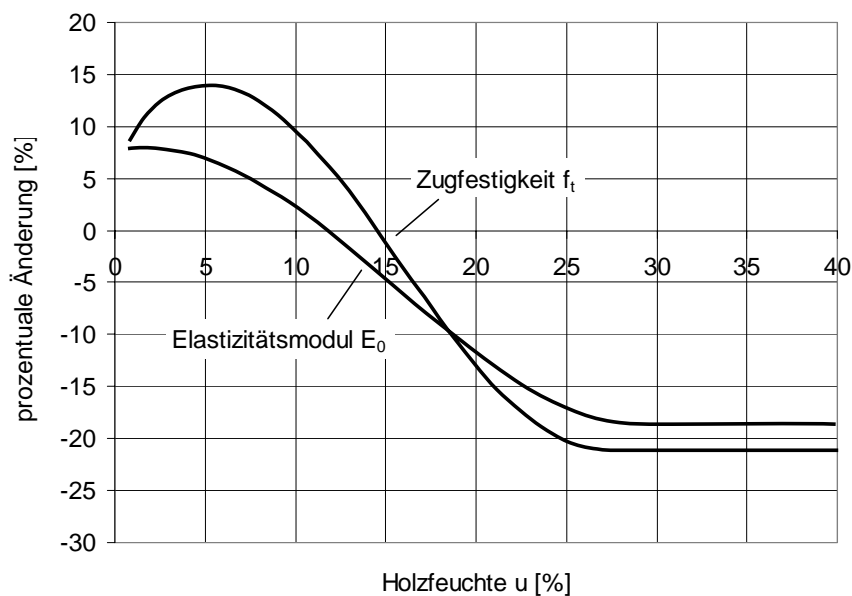


Bild 4-1 Einfluss der Holzfeuchte auf Holzeigenschaften nach Kufner (1978)
(Ausgleichskurven für Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit)

4.1 Abhängigkeit des Elastizitäts- und Schubmoduls

4.1.1 Kenntnisstand

Ein wesentlicher Einflussfaktor des Elastizitätsmoduls ist die Holzfeuchte. Grund hierfür ist der Aufbau der Zellstruktur: mit zunehmender Holzfeuchte steigt die Formänderung des Holzes bei mechanischer Beanspruchung stärker an.

Im folgenden Abschnitt wird bei der Untersuchung des Einflusses der Holzfeuchte auf den Elastizitätsmodul nicht nach der Art der Beanspruchung unterschieden (vgl. Toratti (1992), Hanhijärvi (1995), Hoffmeyer (1995)).

In vielen Beiträgen wird eine nichtlineare Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls von der Holzfeuchte im hygroskopischen Bereich festgestellt (Bild 4-2). Da dieser Zusammenhang jedoch sehr schwach ausgeprägt ist, kann vereinfacht ein linearer Zusammenhang zwischen Elastizitätsmodul und Holzfeuchte im hygroskopischen Bereich bei Holzfeuchten zwischen 5 % und 20 % angenommen werden.

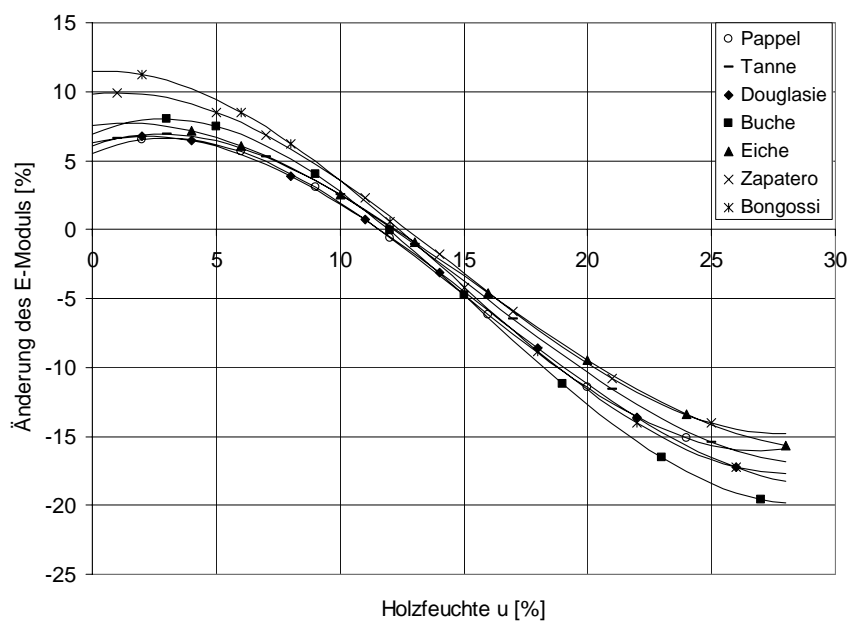


Bild 4-2 Änderung des Elastizitätsmoduls in Abhängigkeit der Holzfeuchte nach Kufner (1978)

Becker (2002) gibt in seiner Dissertation eine Zusammenfassung von Angaben zur Änderung des Elastizitätsmoduls bei Holzfeuchteänderung aus verschiedenen Beiträgen an. Tabelle 4-1 enthält eine Zusammenfassung dieser Angaben. Nach DIN EN 384 (05/2004) muss zur Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften eine Änderung des Elastizitätsmoduls von $2,0 \text{ \%}/\% \Delta u$ berücksichtigt werden.

Tabelle 4-1 Änderung des Elastizitätsmoduls bei Holzfeuchteänderung

	ΔE [%/% Δu]
Wilson (1932)	2,0
Thunell (1941)	1,4
Kollmann / Krech (1960)	1,4
Kollmann (1961)	1,5
Keith (1972)	1,5
Kufner (1978)	1,7
Glos (1978)	1,4 - 2,1
Hoffmeyer (1979)	1,1
Heimeshoff / Glos (1980)	1,0
Glos (1981)	0,0 ($E_{0,05}$)
	1,0 ($E_{0,mean}$)
	1,5 ($E_{0,95}$)
Neuhaus (1981)	0,7 - 0,8
Toratti (1992)	1,2
Fridley et al. (1992)	1,6
Carstensen (1993)	1,0
Hoffmeyer (1995)	1,5
Hanhijärvi (1995)	1,1
Dinwoodie (2000)	1,1
Zhou et al. (2000)	1,5
Bengtsson (2000)	1,0

Bei der Ermittlung des Elastizitätsmoduls wird in einigen Beiträgen eine Querschnittsänderung aufgrund von Quellen und Schwinden rechtwinklig zur Faserrichtung nicht berücksichtigt. Nach Glos (1981) werden jedoch die elasto-mechanischen Eigenschaften von Holz durch die Holzfeuchte in zweierlei Hinsicht beeinflusst. Die Festigkeit nimmt einerseits mit zunehmender Holzfeuchte ab, andererseits wirkt das Quell- und Schwindverhalten von Holz und die damit verbundene Querschnittsänderung diesem Einfluss entgegen.

Der Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung wird wesentlich stärker von der Holzfeuchte beeinflusst als der Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung. Nach

Neuhaus (1981) kann für Fichtenholz bei einer Holzfeuchte von 12 % ein Verhältnis der Elastizitätszahlen von $s_{11} / s_{22} = 28,6$ definiert werden; bei einer Holzfeuchte von 28 % steigt das Verhältnis von s_{11} / s_{22} auf einen Wert von 44,1.

4.1.2 Versuchsdurchführung und Auswertung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Einfluss der Holzfeuchte auf den Elastizitätsmodul durch Schwingungsmessungen an den Holzarten Akasia, Jati, Keruing, Puspa und Lärche untersucht.

Grundsätzlich sind zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls zwei Methoden geeignet: der statische Biegeversuch und die dynamische Schwingungsmessung. Machek et al. (2001) untersuchten den Einfluss der Holzfeuchte auf den Elastizitätsmodul mit Hilfe von dynamischen und statischen Messverfahren. Wie erwartet, veränderte sich der Elastizitätsmodul bei sich ändernden Holzfeuchten sowohl bei statischen als auch dynamischen Messungen mit vergleichbaren Trends. Für praktische Messungen war jedoch die Beobachtung wichtig, dass bei einer Vernachlässigung der Einbeziehung der durch Holzfeuchteänderung verursachten Dimensionsänderungen der dynamische Elastizitätsmodul in geringerem Maße von der Holzfeuchteänderung beeinflusst wird als der statische Elastizitätsmodul.

Der Zusammenhang von statischem und dynamischem Elastizitätsmodul ist Bestandteil mehrerer Untersuchungen. Im Vergleich stellten Kollmann und Krech (1960) fest, dass die dynamischen Elastizitätsmoduln aus Längsschwingung und Biegeschwingung nach einer durchgeführten Korrektur des Schubeinflusses nahezu übereinstimmen, der korrigierte statische Elastizitätsmodul jedoch ca. 4 % geringer ist. Machek et al. (2001) gibt für den dynamisch ermittelten Elastizitätsmodul 5 % bis 15 % höhere Werte an als für den statisch ermittelten Elastizitätsmodul. Nach Görlacher (1984) liegt der dynamische Elastizitätsmodul im Mittel um 9 % höher als der statisch bestimmte Elastizitätsmodul. Diese Unterschiede können teilweise durch Schubverformungseinflüsse erklärt werden. Dieser Einfluss ist umso größer, je geringer die Spannweite zwischen den Auflagerpunkten ist und muss bei Verhältnissen von $\ell / h < 15$ berücksichtigt werden.

Zur Bestimmung des dynamischen Elastizitätsmoduls von Holz eignen sich sowohl Längsschwingung (Longitudinalschwingung) als auch Biegeschwingung (Quer- oder Transversalschwingung). Die Eigenfrequenz eines zum Schwingen angeregten Körpers ist ein Maßstab für dessen elastische Konstanten. Die theoretischen Grundlagen für die Messung der Eigenfrequenz wurden ausführlich von Rayleigh (1929) beschrieben.

Bei einer Longitudinalschwingung treten nur Längenänderungen im Stab auf, eine Querbewegung erfolgt nicht (Bild 4-3).

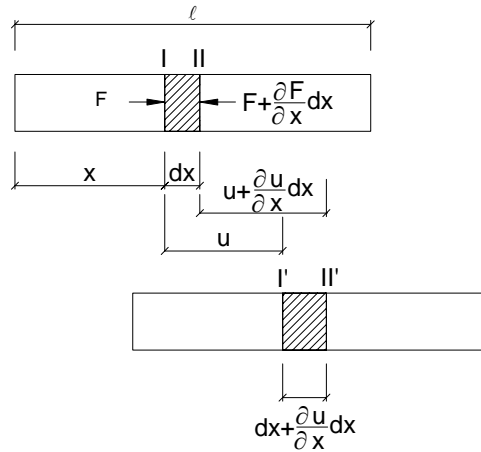


Bild 4-3 Longitudinalschwingung eines Stabes

Unter Vernachlässigung der Querkontraktion gilt Gleichung (1) (Klotter (1981)).

$$\rho \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = E_0 \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1)$$

Durch Umformen kann der Elastizitätsmodul aus der Eigenfrequenz f_0 mit Hilfe der Gleichung (2) ermittelt werden. Die Gleichung ist für große Verhältnisse von Stablänge zu Stabdicke gültig.

$$E_0 = \frac{4 \cdot \ell^2 \cdot f_0^2 \cdot \rho}{n} \quad \text{mit } n = 1 \quad (2)$$

Bei einer Biegeschwingung bewegen sich die Masseteilchen rechtwinklig zur Stabachse (Bild 4-4). Gleichzeitig verdreht sich die Querschnittsfläche, und es entstehen Schubverformungen.

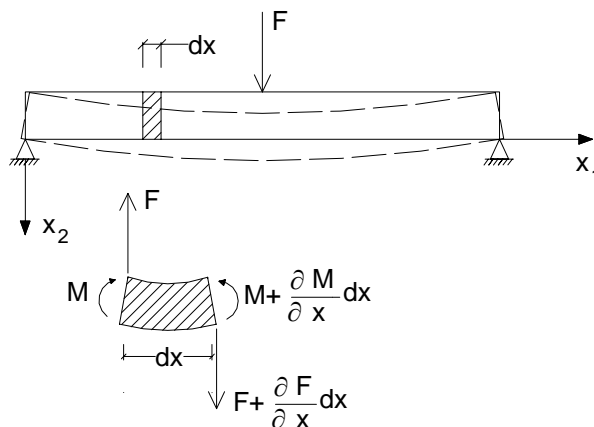


Bild 4-4 Biegeschwingung eines Stabes

Bei einer Biegeschwingung gilt folgende Gleichung (3) (Klotter (1981)).

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E_0}{\rho} \cdot \frac{I}{A} \cdot \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} \quad (3)$$

Mit Hilfe der Schwingungsgleichung (4) kann nach Görlacher (1984) der Elastizitätsmodul aus einer Biegeschwingung ermittelt werden.

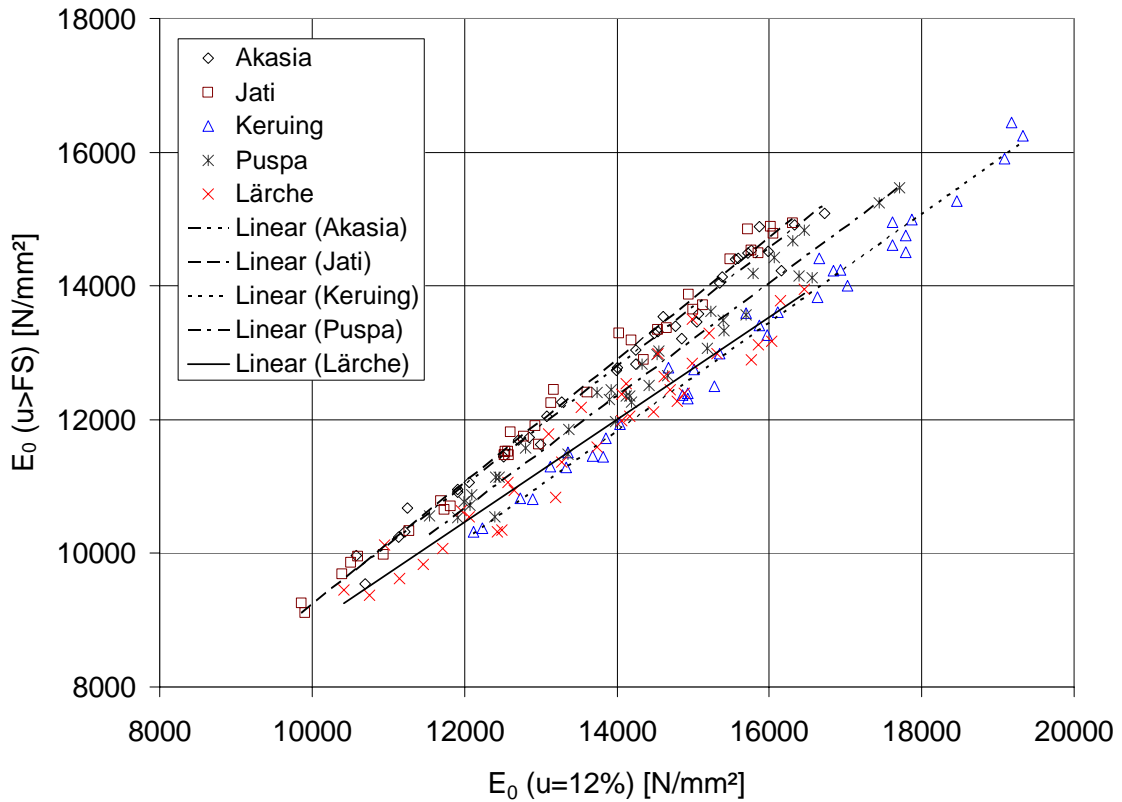
$$E = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot \ell^4 \cdot f_0^2 \cdot \rho}{m_n^4 \cdot i^2} \cdot \left(1 + \frac{i^2}{\ell^2} \cdot \left(K_1 + K_2 \cdot s \cdot \frac{E}{G} \right) - \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot s \cdot i^2 \cdot \rho \cdot f_0^2}{G} \right) \quad (4)$$

Im Rahmen dieser Arbeit wurde an jeweils 36 Proben der Holzarten Akasia, Jati, Ke-ruing, Puspa und Lärche mit den Abmessungen von ca. $b / h / \ell = 100 / 50 / 1000$ mm der Einfluss der Holzfeuchte auf den Elastizitätsmodul mittels zerstörungsfreier Schwingungsmessung untersucht. Die Proben wurden zuerst nach Lagerung im Normalklima 20/65 mit einer Holzfeuchte von ca. 12 % geprüft sowie nach mehreren Wochen Wasserlagerung mit einer Holzfeuchte über dem Fasersättigungsbereich.

Die Eigenfrequenz wurde mit Hilfe des Messgerätes GrindoSonic Mk 5 der Fa. Lemmens-Elektronika bestimmt. Neben dem Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung (E_0) wurde der Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung (E_{90}) und der Schubmodul (G) durch Schwingungsmessungen unterschiedlicher Ordnung ermittelt.

Der Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung wurde mit Hilfe von Longitudinalschwingungen ermittelt. Für jeden Prüfkörper liegt ein Wertepaar aus der Messung der Eigenfrequenz bei einer Holzfeuchte von ca. 12 % und bei Wassersättigung vor. Eine Regressionsanalyse ergab eine eindeutige Korrelation zwischen den beiden Werten.

In Bild 4-5 ist der Einfluss der Holzfeuchte auf den Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung der untersuchten Holzarten dargestellt. Je nach Holzart wurde eine Abnahme des Elastizitätsmoduls parallel zur Faserrichtung infolge Wassersättigung um maximal 18,5 % bestimmt. Tabelle 4-2 enthält eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Schwingungsmessungen zur Bestimmung des Einflusses der Holzfeuchte auf den Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung. Eine Auflistung der einzelnen Versuchsergebnisse für alle Holzarten ist in Blaß und Fellmoser (2006) angegeben.

Bild 4-5 Einfluss der Holzfeuchte auf den Elastizitätsmodul E_0 Tabelle 4-2 Einfluss der Holzfeuchte auf den Elastizitätsmodul E_0

Holzart		u = 12%			u > FS			Abfall red E_0 [%]
		ρ [kg/m ³]	u [%]	E_0 [N/mm ²]	ρ [kg/m ³]	u [%]	E_0 [N/mm ²]	
Akasia	min	635	11,1	10581	838	43,2	9542	88,0%
	mittel	735	12,5	13959	962	58,8	12759	91,5%
	max	847	14,1	16719	1079	82,6	15082	94,9%
	s	-	-	1775	-	-	1588	-
Jati	min	566	11,4	9861	818	48,6	9105	89,6%
	mittel	668	12,3	13285	935	67,1	12241	92,2%
	max	782	13,5	16303	1038	84,6	14933	94,7%
	s	-	-	1920	-	-	1768	-
Keruing	min	572	11,5	12114	885	51,4	10327	81,5%
	mittel	708	12,5	15630	1020	77,9	13148	84,2%
	max	833	13,9	19334	1201	107,5	16447	87,1%
	s	-	-	2059	-	-	1686	-
Puspa	min	590	11,4	11543	942	58,4	10530	85,1%
	mittel	703	12,4	14349	1063	83,5	12651	88,2%
	max	798	13,6	17706	1162	98,6	15472	91,4%
	s	-	-	1647	-	-	1407	-
Lärche	min	553	11,2	10413	633	41,5	9371	81,9%
	mittel	621	12,5	13684	702	48,3	11761	86,1%
	max	673	14,1	16459	767	58,3	13953	92,5%
	s	-	-	1666	-	-	1318	-

Mit den gleichen Prüfkörpern, an denen der Elastizitätsmodul parallel zur Faserichtung mittels Längsschwingung ermittelt wurde, wurden Biegeschwingungen 1., 2. und 3. Ordnung bei ca. 12 % Holzfeuchte sowie nach Wasserlagerung durchgeführt. Zur Messung der Eigenfrequenz wurden die Prüfkörper in den rechnerischen Knotenpunkten der Grundschwingung aufgelagert. Mit den aus den Biegeschwingungen gemessenen Eigenfrequenzen konnte für jede Schwingungsordnung ($n = 1, 2$ und 3) ein zugehöriger Elastizitätsmodul (E_1, E_2 und E_3) ermittelt werden.

Zur Bestimmung des Schubmoduls wurde der Elastizitätsmodul aus der Längsschwingung (ohne Schubeinfluss) in Gleichung (4) eingesetzt und der Schubmodul variiert, bis der berechnete Elastizitätsmodul aus der Biegeschwingung mit dem Elastizitätsmodul aus der Längsschwingung übereinstimmte. Zuverlässige Werte für den Schubmodul konnten somit aus der Biegeschwingung 2. und 3. Ordnung berechnet werden.

Bild 4-6 zeigt den Einfluss der Holzfeuchte auf den Schubmodul. Zwischen dem Schubmodul bei einer Holzfeuchte von ca. 12 % und bei Wassersättigung besteht eine gute Korrelation. Tabelle 4-3 enthält eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Schwingungsmessungen zur Ermittlung des Einflusses der Holzfeuchte auf den Schubmodul. Eine Auflistung der einzelnen Versuchsergebnisse für alle Holzarten ist in Blaß und Fellmoser (2006) angegeben.

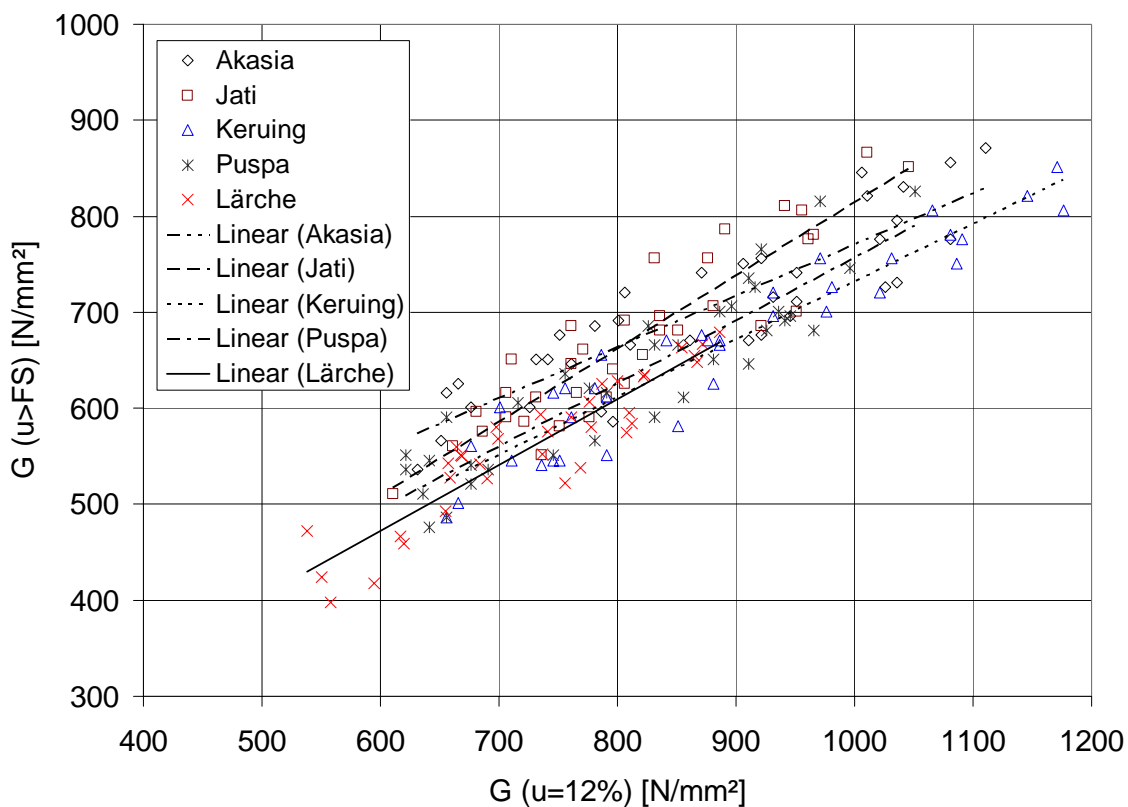


Bild 4-6 Einfluss der Holzfeuchte auf den Schubmodul

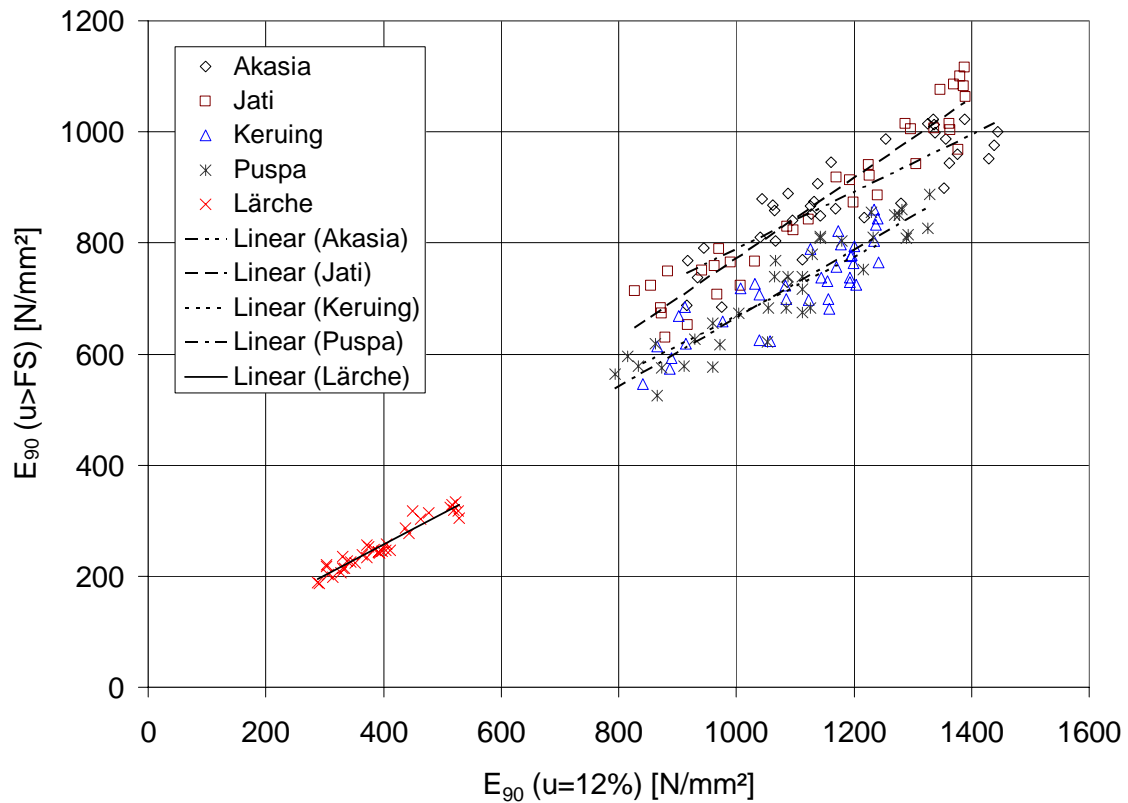
Tabelle 4-3 Einfluss der Holzfeuchte auf den Schubmodul

Holzart		u = 12%			u > FS			Abfall red G [%]
		ρ [kg/m ³]	u [%]	G [N/mm ²]	ρ [kg/m ³]	u [%]	G [N/mm ²]	
Akasia	min	635	11,1	631	838	43,2	536	70,6%
	mittel	735	12,5	872	962	58,8	702	81,3%
	max	847	14,1	1111	1079	82,6	871	94,0%
	s	-	-	141	-	-	85	-
Jati	min	566	11,4	611	818	48,6	511	73,7%
	mittel	668	12,3	814	935	67,1	672	82,7%
	max	782	13,5	1046	1038	84,6	866	91,6%
	s	-	-	106	-	-	89	-
Keruing	min	572	11,5	656	885	51,4	486	68,3%
	mittel	708	12,5	884	1020	77,9	662	75,3%
	max	833	13,9	1176	1201	107,5	851	85,7%
	s	-	-	153	-	-	97	-
Puspa	min	590	11,4	621	942	58,4	476	70,5%
	mittel	703	12,4	815	1063	83,5	636	78,3%
	max	798	13,6	1051	1162	98,6	826	90,1%
	s	-	-	125	-	-	90	-
Lärche	min	553	11,2	538	633	41,5	398	69,0%
	mittel	621	12,5	730	702	48,3	562	77,1%
	max	673	14,1	886	767	58,3	679	87,7%
	s	-	-	96	-	-	72	-

Der Einfluss der Holzfeuchte auf den Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung wurde an Proben der Größe $b / h / \ell = 100 / 50 / 10$ mm mittels Biegeschwingung 1. Ordnung bestimmt. Die Proben wurden zuerst nach Lagerung im Normalklima 20/65 mit einer Holzfeuchte von ca. 12 % geprüft sowie nach mehreren Wochen Wasserlagerung mit einer Holzfeuchte über dem Fasersättigungsbereich.

Nach Blaß und Fellmoser (2002) hat bei einer Biegeschwingung in Faserrichtung der Schubmodul einen relativ geringen Einfluss auf den Elastizitätsmodul. Somit kann in Gleichung (4) ein Schubmodul von 500 N/mm² als Annahme eingesetzt und der Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung mit Hilfe der gemessenen Eigenfrequenz der Biegeschwingung 1. Ordnung berechnet werden.

In Bild 4-7 wird der Einfluss der Holzfeuchte auf den Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung dargestellt. Der Einfluss der Holzart wird ebenfalls deutlich: im Vergleich zu den indonesischen Holzarten ist der Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung von Lärche relativ gering. Tabelle 4-4 enthält eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Schwingungsmessungen zur Ermittlung des Einflusses der Holzfeuchte auf den Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung. Eine Auflistung der einzelnen Versuchsergebnisse für alle Holzarten ist in Blaß und Fellmoser (2006) angegeben.

Bild 4-7 Einfluss der Holzfeuchte auf den Elastizitätsmodul E_{90} Tabelle 4-4 Einfluss der Holzfeuchte auf den Elastizitätsmodul E_{90}

Holzart		u = 12%			u > FS			Abfall red E_{90} [%]
		ρ [kg/m ³]	u [%]	E_{90} [N/mm ²]	ρ [kg/m ³]	u [%]	E_{90} [N/mm ²]	
Akasia	min	606	10,3	916	1050	86,7	685	66,4%
	mittel	710	11,8	1183	1170	107,5	882	75,0%
	max	815	13,7	1445	1250	128,3	1023	84,3%
	s	-	-	160	-	-	96	-
Jati	min	554	11,0	828	1029	82,5	629	70,3%
	mittel	662	12,1	1142	1134	100,9	875	76,8%
	max	741	13,3	1389	1200	114,9	1116	86,1%
	s	-	-	195	-	-	147	-
Keruing	min	588	11,5	841	1009	75,7	545	58,8%
	mittel	710	12,2	1097	1130	93,3	720	65,8%
	max	815	12,9	1242	1191	104,9	860	75,0%
	s	-	-	125	-	-	78	-
Puspa	min	631	11,1	795	1044	87,6	525	59,0%
	mittel	708	12,3	1083	1160	102,1	715	66,2%
	max	793	13,3	1329	1217	110,8	888	73,1%
	s	-	-	157	-	-	104	-
Lärche	min	544	10,3	288	959	91,5	187	57,6%
	mittel	622	11,9	395	1022	106,7	254	64,6%
	max	682	13,2	529	1108	119,6	333	72,9%
	s	-	-	75	-	-	43	-

Die Versuchsergebnisse bestätigen auch die Angaben von Neuhaus (1981), wonach der Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung wesentlich stärker von der Holzfeuchte beeinflusst wird als der Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung.

4.2 Abhängigkeit der Biegefestigkeit

4.2.1 Kenntnisstand

Die Festigkeit von Holz ist neben strukturellen Einflüssen maßgeblich von der Holzfeuchte abhängig. Im Allgemeinen werden die Festigkeiten von der Holzfeuchte deutlich stärker beeinflusst als die Steifigkeiten. Im kapillaren Bereich oberhalb der Fasersättigung ist der Einfluss der Holzfeuchte gering; die Festigkeitswerte bleiben hier nahezu konstant. Im hygroskopischen Bereich steigen die Festigkeiten mit abnehmender Holzfeuchte an.

Verschiedene Untersuchungen zeigten jedoch, dass dieser Anstieg nicht stetig bis zum Darrzustand verläuft. Nach Küch (in Kollmann (1982)) erreicht die Biegefestigkeit ähnlich wie die Zugfestigkeit bei etwa 3 % bis 5 % Holzfeuchte ein Maximum, bevor bei weiter abnehmender Holzfeuchte auch die Festigkeit abnimmt. Dieses Phänomen ist auf den Abbau von Spannungen zwischen den Cellulosemolekülen zurückzuführen, die im Bereich der Chemisorption auftreten.

Analog zum Elastizitätsmodul kann auch für die Biegefestigkeit vereinfacht ein linearer Zusammenhang zwischen Festigkeit und Holzfeuchte im hygroskopischen Bereich zwischen 8 % und 20 % Holzfeuchte angenommen werden.

Glos (1981) stellt in seinem Modell die Abhängigkeit der Festigkeit und deren charakteristischen Werte von der Holzfeuchte dar. Dabei wird der Einfluss der Querschnittsänderung durch das Quell- und Schwindverhalten, welcher der abnehmenden Festigkeit bei zunehmender Holzfeuchte entgegenwirkt, berücksichtigt. Dieser Einfluss ist bei Holz geringer Qualität kleiner als bei fehlerfreiem Holz mit höherer Festigkeit.

Tabelle 4-5 enthält eine Zusammenfassung von Angaben aus verschiedenen Beiträgen zur Änderung der Biegefestigkeit bei Holzfeuchteänderung. In DIN EN 384 (05/2004) wird zur Bestimmung von charakteristischen Werten für mechanische Eigenschaften keine Änderung der Biegefestigkeit angegeben, falls die Proben nicht bei einer Bezugsholzfeuchte von 12 % geprüft wurden.

Tabelle 4-5 Änderung der Biegefestigkeit bei Holzfeuchteänderung

	Δf_m [%/% Δu]
Schlyter und Winberg (1929)	2,7 - 3,2 %
Walldén (1939)	3,0 - 3,7 %
Küch (1943)	2,8 - 3,4 %
Küch (1943)	3,8 - 4,9 %
U.S. Forest Products Laboratory (1974)	4,0 %
Kollmann (1982)	4,0 %
Glos (1981)	0,0 ($f_{m,05}$)
	2,0 ($f_{m,mean}$)
	3,5 ($f_{m,95}$)
Niemz (1993)	4,0 %

4.2.2 Versuchsdurchführung und Auswertung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Einfluss der Holzfeuchte auf die Biegefestigkeit an den Holzarten Akasia, Jati, Keruing, Puspa und Lärche untersucht. Die Biegefestigkeit wurde nach DIN EN 408 (2003) im Vierpunkt-Biegeversuch an Prüfkörpern mit einer Holzfeuchte von ca. 12 % nach Lagerung im Normalklima 20/65 bzw. nach Wasserlagerung mit einer Holzfeuchte über dem Fasersättigungsbereich ermittelt. Zur Verfügung standen jeweils 36 Prüfkörper mit den Maßen $b / h / \ell = 110 / 50 / 950$ mm. Die Spannweite betrug das 18-fache der Prüfkörperhöhe, die Lasteinleitung erfolgte in den Drittelpunkten. Die Biegefestigkeit wurde nach DIN EN 408 (2003) mit Gleichung (5) bestimmt:

$$f_m = \frac{a \cdot F_{max}}{2 \cdot W} \quad (5)$$

Zusätzlich zu der Biegefestigkeit der geprüften Kanthölzer wurde vorab der Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung durch zerstörungsfreie dynamische Schwingungsmessungen (longitudinal) nach Gleichung (2) ermittelt.

Die Formänderung von Holz steigt bei mechanischer Beanspruchung mit zunehmender Holzfeuchte an. Sehr feuchtes Holz zeigt im Vergleich zu trockenem Holz wesentlich stärkere nichtlineare Formänderungen. Die Proportionalitätsgrenze sinkt mit zunehmender Holzfeuchte. Dieses Verhalten wird durch die Auswertungen der Last-Verformungskurven aus den Biegeversuchen bestätigt. Bild 4-8 zeigt exemplarisch

für die Holzart Akasia den Einfluss der Holzfeuchte: die wassergesättigten Prüfkörper zeigen ein deutlich duktileres Verhalten.

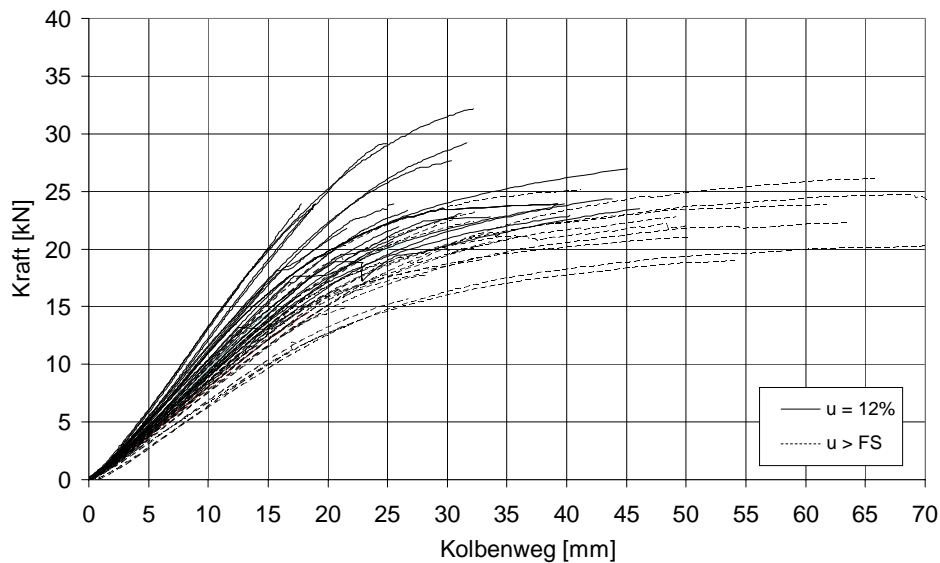


Bild 4-8 Einfluss der Holzfeuchte auf das Last-Verformungsverhalten
(Holzart: Akasia)

Der Einfluss der Holzfeuchte auf die Biegefestigkeit wird in Bild 4-9 exemplarisch für die Holzart Akasia dargestellt. Der Mittelwert der Biegefestigkeit der Prüfkörper mit einer Holzfeuchte von ca. 12 % liegt bei 80,6 N/mm², der Mittelwert der Biegefestigkeit der wassergesättigten Proben bei 67,3 N/mm². Dies entspricht im Mittel einer Reduzierung der Biegefestigkeit infolge Wassersättigung um 16,5 %. Die zugehörigen Elastizitätsmoduln, welche mit Hilfe der Schwingungsmessung zerstörungsfrei vor der Biegeprüfung im trockenen und wassergesättigten Zustand ermittelt wurden, weisen mit 9,2 % eine deutlich geringere Abnahme infolge Wassersättigung auf.

Die Ergebnisse bestätigen die Angaben aus früheren Untersuchungen, nach denen die Biegefestigkeit von der Holzfeuchte stärker beeinflusst wird als der zugehörige Biege-Elastizitätsmodul.

Tabelle 4-6 enthält eine Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Biegeversuchen zur Ermittlung des Einflusses der Holzfeuchte auf die Biegefestigkeit. Eine Auflistung der einzelnen Versuchsergebnisse für alle Holzarten ist in Blaß und Fellmoser (2006) angegeben.

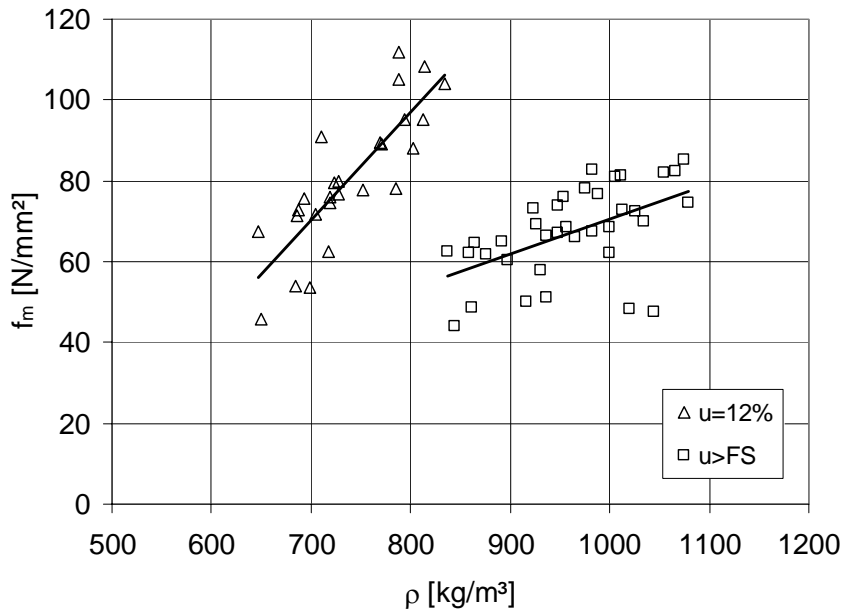


Bild 4-9 Biegefestigkeit in Abhängigkeit der Rohdichte (Holzart: Akasia)

Tabelle 4-6 Einfluss der Holzfeuchte auf die Biegefestigkeit

Holzart		u = 12%				u > FS				Abfall red E ₀ [%]	Abfall red f _m [%]
		ρ [kg/m ³]	u [%]	E ₀ [N/mm ²]	f _m [N/mm ²]	ρ [kg/m ³]	u [%]	E ₀ [N/mm ²]	f _m [N/mm ²]		
Akasia	min	647	11,4	10934	45,9	838	43,2	9542	44,0	-	-
	mittel	739	12,6	14053	80,6	962	58,8	12759	67,3	90,8%	83,5%
	max	834	13,6	16409	111,9	1079	82,6	15082	85,4	-	-
	s	-	-	1634	16,9	-	-	1588	11,1	-	-
Jati	min	542	11,4	9318	28,9	818	48,6	9105	26,9	-	-
	mittel	656	12,2	13043	74,7	935	67,1	12241	64,2	93,9%	85,9%
	max	767	13,7	16273	104,3	1038	84,6	14933	83,1	-	-
	s	-	-	1791	18,6	-	-	1768	12,6	-	-
Keruing	min	547	11,4	12164	53,8	885	51,4	10327	39,0	-	-
	mittel	721	12,8	15844	89,2	1020	77,9	13148	68,6	83,0%	76,9%
	max	851	13,9	19487	112,3	1201	107,5	16447	94,2	-	-
	s	-	-	2138	15,6	-	-	1686	12,6	-	-
Puspa	min	616	11,9	11655	52,2	942	58,4	10530	42,7	-	-
	mittel	704	12,8	14421	83,4	1063	83,5	12651	66,6	87,7%	79,9%
	max	768	13,4	17187	115,6	1162	98,6	15472	85,2	-	-
	s	-	-	1459	18,1	-	-	1407	9,7	-	-
Lärche	min	546	11,0	10984	26,3	633	41,5	9371	22,5	-	-
	mittel	620	12,6	13322	61,9	702	48,3	11761	46,2	88,3%	74,6%
	max	710	13,6	16355	87,4	767	58,3	13953	59,3	-	-
	s	-	-	1447	14,9	-	-	1318	10,4	-	-

4.3 Abhängigkeit der Querdruckfestigkeit

4.3.1 Kenntnisstand

Die Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der Holzfeuchte ist sehr ausgeprägt. Nach Wilson (1932) kann für die Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung eine Abnahme

der Druckfestigkeit von 4 % bis 6 % pro Prozent Holzfeuchteänderung im hygroskopischen Bereich angenommen werden. Die Querdruckfestigkeit ist in geringerem Maße von der Holzfeuchte abhängig.

In beiden Fällen (Beanspruchung parallel und rechtwinklig zur Faserrichtung) wird jedoch die Druckfestigkeit in wesentlich größerem Maße von der Holzfeuchte beeinflusst als der zugehörige Elastizitätsmodul.

Stamer (1920) führte erste Untersuchungen über den Einfluss der Holzfeuchte auf die Querdruckfestigkeit durch. In weiteren Beiträgen wird der Verlauf der Abhängigkeit allgemein als nichtlinear angegeben und kann durch einfach gekrümmte, teilweise auch doppelt gekrümmte Kurven beschrieben werden. Aufgrund der schwachen Krümmung und der Streuung der Ergebnisse kann in einem Feuchtebereich zwischen 8 % und 18 % eine lineare Beziehung zwischen Holzfeuchte und Querdruckfestigkeit angenommen werden.

Diese Angaben wurden von Kollmann (1982) bestätigt. Kollmann gibt für den hygroskopischen Bereich folgende lineare Abhängigkeit der Querdruckfestigkeit von der Holzfeuchte an (Gleichung (6)):

$$f_{c,90,1} = f_{c,90,2} \cdot \frac{40 - u_1}{40 - u_2} \quad (6)$$

Zusätzlich zur Holzfeuchte beeinflussen auch die Lage der Jahrringe und die Art der Beanspruchung (Voll- oder Teilbelastung) die Querdruckfestigkeit.

Damkilde et al. (1997) untersuchte den Einfluss der Jahrringlage auf die Querdruckfestigkeit. Die nach EN 1193 (1998) ermittelten Querdruckfestigkeiten von Fichtenholz lagen hierbei zwischen 2,0 N/mm² und 4,0 N/mm² (5%-Quantil: 2,3 N/mm² bis 2,4 N/mm²; mittlerer Elastizitätsmodul: 300 N/mm²). Bei einer Jahrringlage von etwa 45° erreichten die Querdruckfestigkeiten ein Minimum. Die in radialer Richtung ermittelten Querdruckfestigkeiten waren größer als in tangentialer Richtung.

Die Art der Beanspruchung beeinflusst bei Querdruckanschlüssen ebenfalls die Festigkeit. Kleine Lastaufstandsflächen und ausreichende Überstände beidseits der Aufstandsflächen (z.B. bei Schwellen, Auflager, etc.) führen zu einer bezogen auf die Aufstandsfläche höheren Tragfähigkeit.

Umfangreiche Untersuchungen wurden hierzu von Blaß und Görlacher (2004) durchgeführt. Die ermittelten Querdruckbeiwerte führen beim Tragfähigkeitsnachweis für den Fall Schwellendruck zu erhöhten Querdruckfestigkeiten. Weitere Untersuchungen wurden von Thelandersson und Mårtensson (1997), Gehri (1997) und Madsen (2000) durchgeführt.

4.3.2 Versuchsdurchführung und Auswertung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Einfluss der Holzfeuchte auf die Querdruckfestigkeit und den Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung an den Holzarten Akasia, Jati, Keruing, Puspa und Lärche untersucht. Die Versuche wurden an Prüfkörpern mit einer Holzfeuchte von ca. 12 % nach Lagerung im Normalklima 20/65 und nach Wasserlagerung mit einer Holzfeuchte über dem Fasersättigungsbereich durchgeführt.

Bei den experimentellen Untersuchungen wurde grundsätzlich zwischen zwei Fällen von Druckbeanspruchung rechtwinklig zur Faserrichtung unterschieden: Vollbelastung und Teilflächenbelastung (Schwellendruck). Das Verhalten des Holzes ist in beiden Fällen unterschiedlich. Die Querdruckfestigkeit und der zugehörige Elastizitätsmodul wurden sowohl durch Querdruckversuche nach DIN EN 408 (2003) mit Vollbelastung (Fall 1) als auch durch Versuche mit Teilflächenbelastung (Schwellendruck) (Fall 2) ermittelt (Bild 4-10).

Zur Verfügung standen für jede Holzart jeweils 36 Prüfkörper pro Versuchsreihe. Die Prüfkörper wurden in Längsrichtung der Kanthölzer genau hintereinander entnommen, so dass ein direkter Vergleich der Ergebnisse aus Fall 1 und Fall 2 möglich ist.

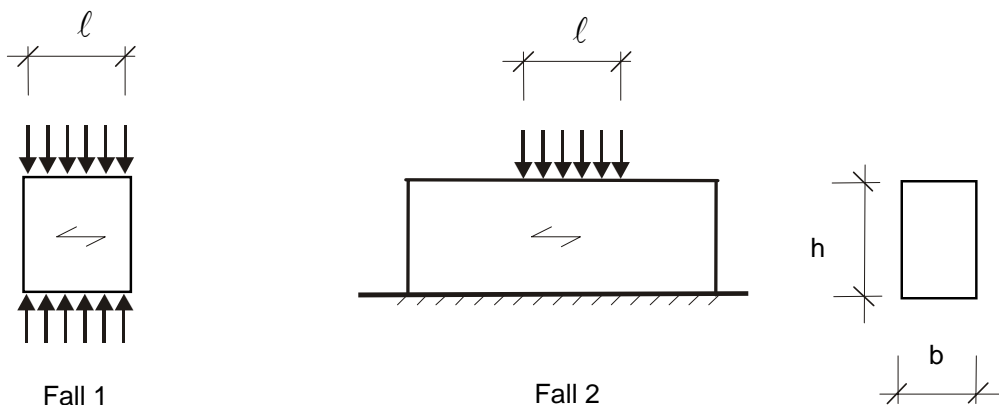


Bild 4-10 Querdruckbeanspruchung bei Vollbelastung (Fall 1) und Teilflächenbelastung (Schwellendruck) (Fall 2)

Unter Vollbelastung (Fall 1) liegt eine gleichmäßige Beanspruchung des Prüfkörpers vor. Das Versagen erfolgt an der schwächsten Stelle und besteht in einem übermäßigen Zusammendrücken mit seitlichem Ausweichen des Holzes unter der Voraussetzung, dass kein Stabilitätsversagen durch zu große Schlankheit des Prüfkörpers auftritt.

Bei einer Teilflächenbelastung, wie sie im Fall 2 bei Schwellendruck vorhanden ist, tritt ein lokales Versagen in der Kontaktfläche unabhängig von der Lastausbreitung

auf. Im Vergleich zu Fall 1 werden aufgrund des Mitwirkens von Überständen höhere Querdruckfestigkeiten erreicht. Nach dem lokalen Versagen aufgrund übermäßiger Eindrückungen auf der Holzoberfläche sind sogar noch weitere Laststeigerungen möglich.

Die Maße der Prüfkörper wurden im Fall 1 in Anlehnung an DIN EN 408 (2003) gewählt ($b / h / \ell = 45 / 60 / 70$ mm). Im Fall 2 entsprach der Querschnitt des Prüfkörpers den in der Praxis üblichen Maßen einer Holzdaube für eine Druckrohrleitung aus Holz ($b / h / \ell = 115 / 60 / 200$ mm) (Bild 4-11). Die Lasteinleitung erfolgte über Stahlplatten (Breite 60 mm), welche im Fall 2 genau den üblichen Maßen eines Stahlringes einer Holzrohrleitung entsprach.

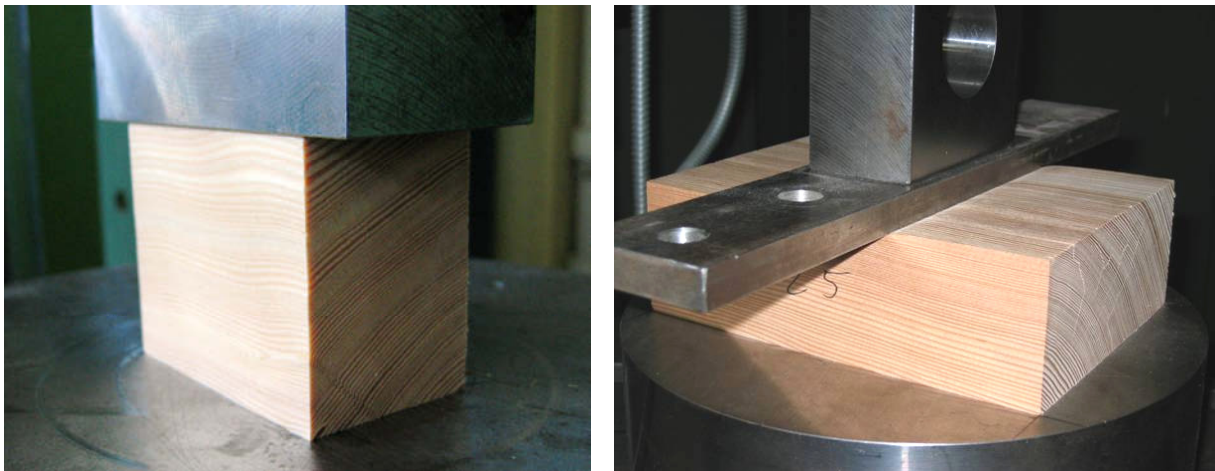


Bild 4-11 Versuchsaufbau für Querdruckbeanspruchung: Fall 1 und Fall 2

4.3.2.1 Querdruckbeanspruchung unter Vollbelastung

Die Querdruckfestigkeit im Fall 1 unter Vollbelastung wurde nach Gleichung (7) bestimmt. Die maximale Druckkraft $F_{c,90,max}$ wurde mit dem iterativen Verfahren nach DIN EN 408 (2003) ermittelt.

$$f_{c,90} = \frac{F_{c,90,max}}{b \cdot \ell} \quad (7)$$

Zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls rechtwinklig zur Faserrichtung im Fall 1 wurde die Dehnung über die gesamte Prüfkörperhöhe mittels dem Maschinenweg bestimmt (Gleichung (8)). Bei der Auswertung wurden Verformungen aus der Versuchseinrichtung durch Kalibrierung berücksichtigt.

$$E_{c,90} = \frac{(F_{40} - F_{10}) \cdot h}{(w_{40} - w_{10}) \cdot b \cdot \ell} \quad (8)$$

Da bei den wassergelagerten Prüfkörpern während der Versuchsdurchführung eine große Anfangsverformung auftrat, erfolgte die Auswertung der Laststeigerung und der Verformungszunahme abweichend von Gleichung (8) im linearen Bereich der Last-Verformungskurve zwischen 20 % und 40 % von $F_{c,90,max}$.

In Bild 4-12 wird das Last-Verformungsverhalten von Jati im Fall 1 bei einer Holzfeuchte der Prüfkörper von ca. 12 % dargestellt. Aufgrund der gleichmäßigen Beanspruchung des Prüfkörpers sind im Fall 1 die Spannungen und Dehnungen im σ / ε – Diagramm über die Prüfkörperhöhe konstant.

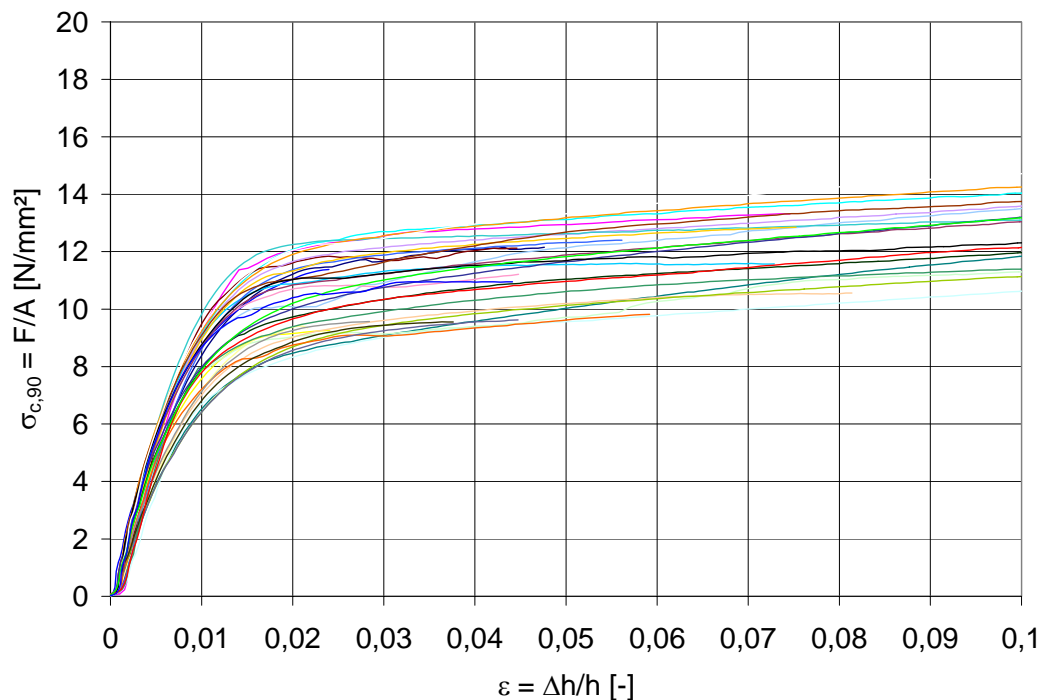


Bild 4-12 Spannungs-Dehnungsdiagramm Fall 1 (Holzart: Jati; Holzfeuchte: 12 %)

In Bild 4-13 wird der Einfluss der Holzfeuchte auf die Querdruckfestigkeit im Fall 1 für die untersuchten Holzarten dargestellt. Für die Holzart Jati liegt beispielsweise der Mittelwert der Querdruckfestigkeit der Prüfkörper mit einer Holzfeuchte von ca. 12 % bei 10,2 N/mm^2 , der Mittelwert der Querdruckfestigkeit der wassergesättigten Proben bei 7,2 N/mm^2 . Dies entspricht einer mittleren Abnahme der Querdruckfestigkeit infolge Wassersättigung von ca. 29 %.

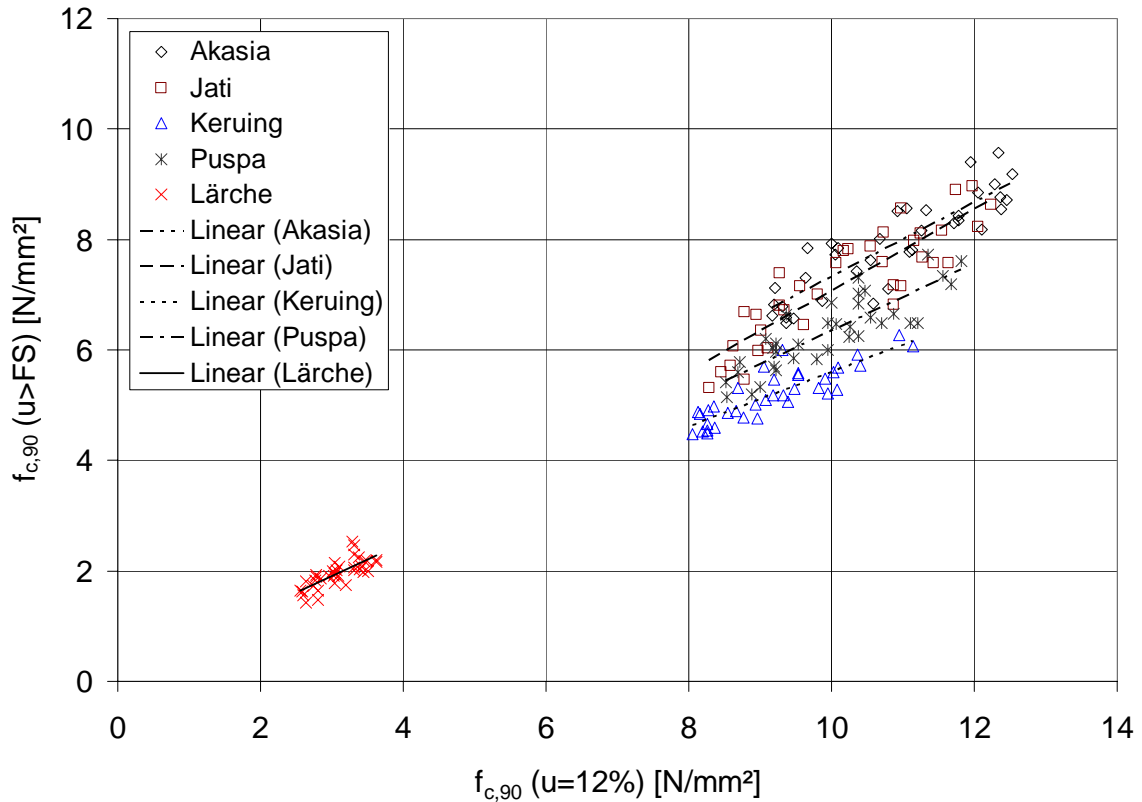


Bild 4-13 Einfluss der Holzfeuchte auf die Querdruckfestigkeit $f_{c,90}$ bei Querdruckbeanspruchung unter Vollbelastung (Fall 1)

Die zugehörigen Elastizitätsmoduln rechtwinklig zur Faserrichtung weisen eine geringere prozentuale Abnahme infolge Wassersättigung auf im Vergleich zur Querdruckfestigkeit. Für die Holzart Jati wurde beispielsweise eine Abnahme des Elastizitätsmoduls rechtwinklig zur Faserrichtung infolge Wassersättigung um 18 % (Mittelwert) bestimmt im Vergleich zur Abnahme der Querdruckfestigkeit um 29 %.

In Bild 4-14 ist der Einfluss der Holzfeuchte auf den Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung bei Querdruckbeanspruchung im Fall 1 dargestellt.

Tabelle 4-7 enthält eine Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Querdruckversuchen nach DIN EN 408 (2003) unter Vollbelastung zur Ermittlung des Einflusses der Holzfeuchte auf die Querdruckfestigkeit. Eine Auflistung der einzelnen Versuchsergebnisse für alle Holzarten ist in Blaß und Fellmoser (2006) angegeben.

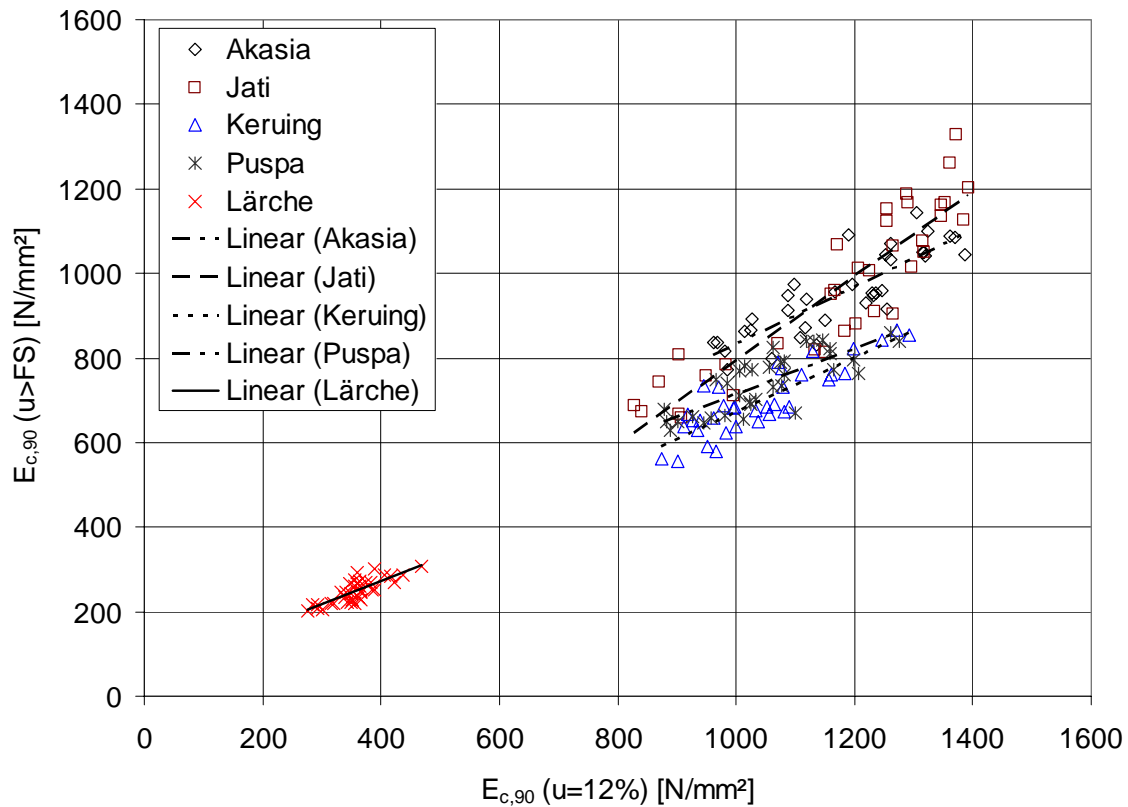


Bild 4-14 Einfluss der Holzfeuchte auf den Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung bei Querdruckbeanspruchung unter Vollbelastung (Fall 1)

Tabelle 4-7 Einfluss der Holzfeuchte auf die Querdruckfestigkeit und den Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung (Fall 1)

Holzart		u = 12%				u > FS				Abfall red $E_{c,90}$ [%]	Abfall red $f_{c,90}$ [%]
		ρ [kg/m ³]	u [%]	$E_{c,90}$ [N/mm ²]	$f_{c,90}$ [N/mm ²]	ρ [kg/m ³]	u [%]	$E_{c,90}$ [N/mm ²]	$f_{c,90}$ [N/mm ²]		
Akasia	min	620	10,8	962	9,2	981	50,5	772	6,5	73,0%	64,6%
	mittel	730	12,1	1177	10,8	1093	71,8	953	7,9	81,2%	73,0%
	max	820	13,9	1387	12,5	1185	97,5	1142	9,6	91,6%	81,1%
	s	-	-	124	1,1	-	-	98	0,9	-	-
Jati	min	517	10,4	828	8,3	939	61,1	658	5,3	70,8%	62,3%
	mittel	648	11,9	1172	10,2	1040	89,6	965	7,2	81,9%	70,7%
	max	781	13,8	1393	12,2	1154	122,5	1329	9,0	96,9%	79,8%
	s	-	-	173	1,2	-	-	189	1,0	-	-
Keruing	min	625	12,0	874	8,1	914	47,6	556	4,5	59,9%	52,4%
	mittel	710	12,7	1043	9,2	998	70,8	700	5,2	67,2%	56,7%
	max	811	13,6	1292	11,1	1093	91,8	865	6,3	77,7%	64,3%
	s	-	-	109	0,8	-	-	81	0,5	-	-
Puspa	min	583	11,4	878	8,5	968	66,9	628	5,1	61,0%	57,8%
	mittel	690	12,3	1052	10,0	1041	82,7	743	6,3	70,8%	63,6%
	max	800	13,4	1275	11,8	1125	101,1	861	7,7	77,7%	70,8%
	s	-	-	103	0,9	-	-	69	0,7	-	-
Lärche	min	565	10,6	277	2,6	799	63,3	200	1,4	61,8%	52,6%
	mittel	622	11,9	358	3,1	871	80,5	249	2,0	69,9%	63,3%
	max	672	12,8	468	3,6	929	107,7	306	2,5	81,5%	76,9%
	s	-	-	42	0,3	-	-	29	0,3	-	-

4.3.2.2 Querdruckbeanspruchung unter Teilflächenbelastung

Die Querdruckfestigkeit unter Teilflächenbelastung (Fall 2) wurde durch Schwellendruckversuche ermittelt. Im Folgenden wird bei der Auswertung dieser Schwellendruckversuche unterschieden zwischen:

- Fall 2a: Ansatz der Belastung auf die Lasteinleitungsfläche und Betrachtung der Dehnungen über die gesamte Höhe;
- Fall 2b: Berücksichtigung der Spannungsausbreitung und Mitwirken der Überstände beidseits der Lasteinleitungsfläche.

Wird die Belastung auf die Lasteinleitungsfläche bezogen und die Dehnung über die gesamte Prüfkörperhöhe betrachtet (Fall 2a), ergibt sich zwischen Fall 1 (Kapitel 4.3.2.1) und Fall 2a ein deutlich unterschiedliches Tragverhalten. In Bild 4-15 wird dies exemplarisch anhand der Versuche mit Lärche verdeutlicht.

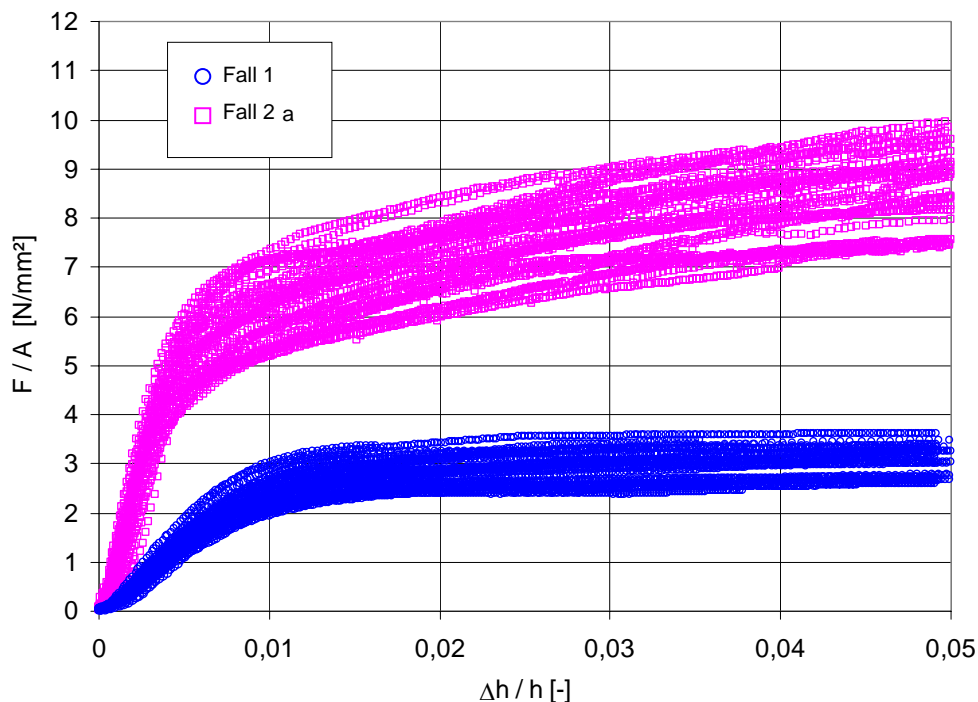


Bild 4-15 Spannungs-Dehnungs-Diagramm: Fall 1 und Fall 2a

(Holzart: Lärche; Holzfeuchte: 12 %)

Der Einfluss der Spannungsausbreitung und das Mitwirken der Überstände beidseits der Lasteinleitungsfläche bei Querdruckbeanspruchung (Fall 2b) wurde u.a. von Blaß und Görlacher (2004) untersucht. Unter der Annahme einer Spannungsausbreitung von 45° ergibt sich folgendes Bild 4-16:

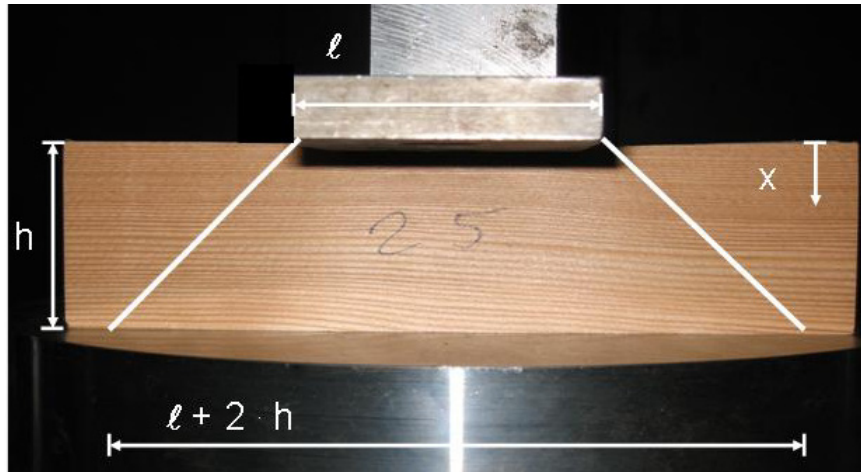


Bild 4-16 Spannungsausbreitung bei Querdruckbeanspruchung im Fall 2b

Für den Vergleich der Versuchsergebnisse aus Fall 1 (Kapitel 4.3.2.1) und Fall 2b werden die gemessenen Verformungen im Schwellendruckversuch durch einen Beiwert ξ dividiert. Der Faktor $\xi < 1$ berücksichtigt im Fall 2b den Einfluss der Spannungsausbreitung und die über die Prüfkörperhöhe veränderlichen Spannungen und Dehnungen. Bei einer Prüfkörperhöhe von $h = 60$ mm und einer Lasteinleitungslänge von $l = 60$ mm ergibt sich nach Blaß und Fellmoser (2006) ein Wert von $\xi = 0,549$. Für die Ermittlung der wirksamen Querdruckfläche wurde das Maß der tatsächlichen Lasteinleitungslänge l nach DIN 1052 (2004) beidseits um jeweils 30 mm verlängert.

Exemplarisch ist das Spannungs-Dehnungs-Diagramm für die im Fall 1 und Fall 2b durchgeführten Versuche mit Lärche in Bild 4-17 dargestellt. Aufgrund der Berücksichtigung des Mitwirkens der Überstände und der Spannungsausbreitung im Fall 2b ergeben sich ähnliche Spannungs-Dehnungs-Verläufe wie in Fall 1.

In Tabelle 4-8 und Tabelle 4-9 sind die Ergebnisse aus den Schwellendruckversuchen zur Ermittlung des Einflusses der Holzfeuchte auf die Schwellendruckfestigkeit zusammengefasst. In Tabelle 4-8 ist die Belastung auf die Lasteinleitungsfläche bezogen (Fall 2a). Im Vergleich dazu ist in Tabelle 4-9 der Einfluss der Spannungsausbreitung sowie das Mitwirken der Überstände beidseits der Lasteinleitungsfläche berücksichtigt (Fall 2b). Eine Auflistung der einzelnen Versuchsergebnisse für alle Holzarten ist in Blaß und Fellmoser (2006) angegeben.

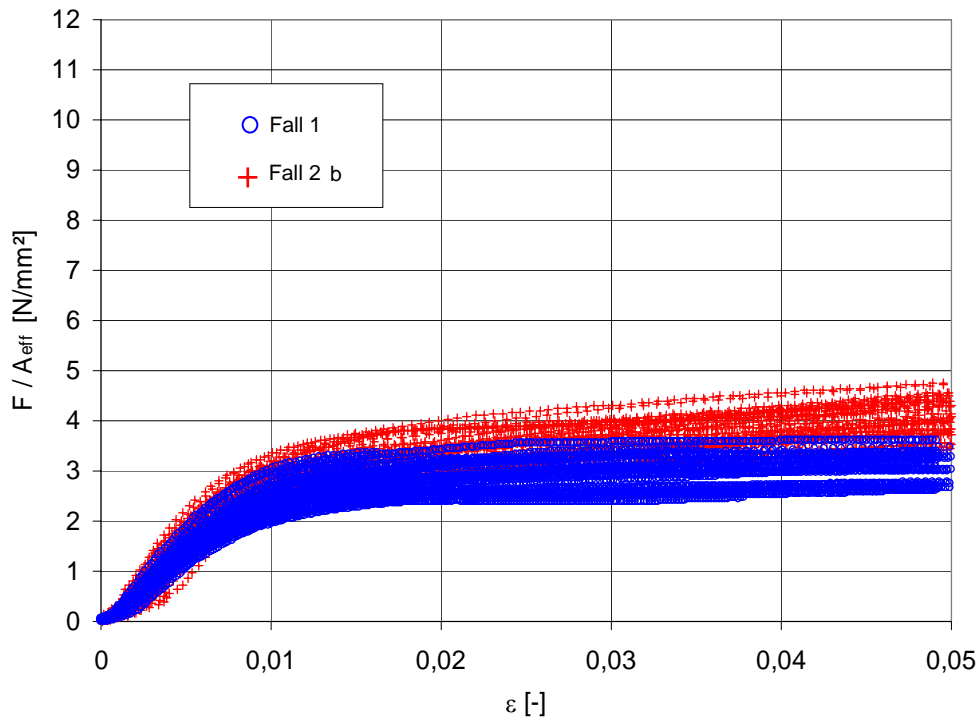


Bild 4-17 Spannungs-Dehnungs-Diagramm: Fall 1 und Fall 2b
(Holzart: Lärche; Holzfeuchte: 12 %)

Tabelle 4-8 Einfluss der Holzfeuchte auf die Querdrukfestigkeit und den Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung (Fall 2a)

Holzart		u = 12%				u > FS				Abfall red $E_{c,90}$ [%]	Abfall red $f_{c,90}$ [%]
		ρ [kg/m ³]	u [%]	$E_{c,90}$ [N/mm ²]	$f_{c,90}$ [N/mm ²]	ρ [kg/m ³]	u [%]	$E_{c,90}$ [N/mm ²]	$f_{c,90}$ [N/mm ²]		
Akasia	min	617	11,1	3755	19,5	968	54,6	3173	15,6	81,6%	77,2%
	mittel	746	12,3	4350	22,3	1045	72,2	3805	18,2	87,6%	81,7%
	max	843	14,1	4944	25,2	1156	98,5	4335	20,3	97,2%	88,7%
	s	-	-	358	1,8	-	-	304	1,4	-	-
Jati	min	550	11,1	3019	17,0	848	54,6	2791	13,1	75,4%	64,7%
	mittel	648	12,1	4461	20,9	954	72,7	3851	15,7	86,7%	75,3%
	max	763	12,9	5282	24,6	1105	100,2	4624	19,1	97,0%	84,4%
	s	-	-	642	2,2	-	-	536	1,4	-	-
Keruing	min	585	11,4	3249	16,4	816	46,6	2198	9,8	61,3%	56,0%
	mittel	707	12,2	3783	18,7	950	62,8	2676	11,4	70,8%	61,2%
	max	845	13,4	4484	22,1	1076	95,5	3519	13,5	87,7%	72,3%
	s	-	-	349	1,6	-	-	315	1,1	-	-
Puspa	min	596	11,4	3438	18,1	914	54,4	2716	12,2	71,4%	59,5%
	mittel	697	12,6	4103	21,3	990	73,3	3216	14,1	78,5%	66,2%
	max	793	13,4	4862	24,9	1062	90,1	3845	16,4	86,0%	73,1%
	s	-	-	332	1,8	-	-	273	1,1	-	-
Lärche	min	572	11,0	1150	5,6	749	49,6	867	3,8	66,9%	61,6%
	mittel	618	12,8	1429	6,7	799	62,4	1110	4,6	77,7%	67,9%
	max	656	14,8	1817	7,9	863	75,4	1419	5,4	90,0%	75,5%
	s	-	-	154	0,6	-	-	132	0,4	-	-

Tabelle 4-9 Einfluss der Holzfeuchte auf die Querdruckfestigkeit und den Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung (Fall 2b)

Holzart		u = 12%				u > FS				Abfall red E _{c,90} [%]	Abfall red f _{c,90} [%]
		ρ [kg/m ³]	u [%]	E _{c,90} [N/mm ²]	f _{c,90} [N/mm ²]	ρ [kg/m ³]	u [%]	E _{c,90} [N/mm ²]	f _{c,90} [N/mm ²]		
Akasia	min	617	11,1	1081	9,8	968	54,6	909	7,8	81,1%	77,2%
	mittel	746	12,3	1252	11,1	1045	72,2	1089	9,1	87,1%	81,7%
	max	843	14,1	1431	12,6	1156	98,5	1241	10,2	96,8%	88,7%
	s	-	-	103	0,9	-	-	87	0,7	-	-
Jati	min	550	11,1	839	8,5	848	54,6	771	6,6	75,1%	64,7%
	mittel	648	12,1	1241	10,5	954	72,7	1064	7,8	86,1%	75,3%
	max	763	12,9	1470	12,3	1105	100,2	1280	9,6	96,3%	84,4%
	s	-	-	179	1,1	-	-	149	0,7	-	-
Keruing	min	585	11,4	944	8,2	816	46,6	620	4,9	59,6%	56,0%
	mittel	707	12,2	1100	9,4	950	62,8	760	5,7	69,2%	61,2%
	max	845	13,4	1302	11,1	1076	95,5	1005	6,8	85,8%	72,3%
	s	-	-	101	0,8	-	-	90	0,6	-	-
Puspa	min	596	11,4	983	9,1	914	54,4	771	6,1	70,4%	59,5%
	mittel	697	12,6	1174	10,6	990	73,3	907	7,0	77,3%	66,2%
	max	793	13,4	1391	12,5	1062	90,1	1083	8,2	84,8%	73,1%
	s	-	-	95	0,9	-	-	78	0,6	-	-
Lärche	min	572	11,0	309	2,8	749	49,6	232	1,9	66,3%	61,6%
	mittel	618	12,8	385	3,4	799	62,4	296	2,3	77,1%	67,9%
	max	656	14,8	490	4,0	863	75,4	376	2,7	89,1%	75,5%
	s	-	-	41	0,3	-	-	35	0,2	-	-

4.4 Abhängigkeit der Scherfestigkeit

4.4.1 Kenntnisstand

Wesentliche Einflussfaktoren auf die Scherfestigkeit von Holz sind Rohdichte, Holzfeuchte sowie Schnitt- und Faserrichtung.

Ähnlich wie die Biegefestigkeit steigt die Scherfestigkeit bei zunehmender Holzfeuchte bis zu einem Feuchtegehalt von etwa 5 % bis 8 % an und fällt danach bis zum Erreichen des Fasersättigungsbereiches ab. Wilson (1932) bestimmte die Änderung der Scherfestigkeit im hygroskopischen Bereich mit 3 %/Δu. Nach Schlyter und Winberg (in Kollmann (1982)) besitzt die Holzfeuchte einen noch geringeren Einfluss auf die Scherfestigkeit.

Die Abhängigkeit der Scherfestigkeit von der Holzorientierung wurde u.a. von Keylwerth (in Kollmann (1982)) genauer untersucht. Bei einer Scherung unter einem Winkel von 45° zu den Jahrringen erreicht die Scherfestigkeit einen Maximalwert. Bei Scherbeanspruchung parallel zur Faserrichtung ist zwischen dem Verlauf der Scherebene in Radial- und Tangentialfläche zu unterscheiden: bei Lärche ist die Scherfestigkeit in der Radialfläche größer als in der Tangentialfläche. Die Streuung ist bei Beanspruchung in der Tangentialebene am stärksten, da die Bruchfläche einer Frühholzschicht zwischen den Jahrringen folgen kann und dabei verhältnismäßig niedrige Werte bestimmt werden.

Aufgrund der Versuchsanordnung ist beim Scherversuch zu berücksichtigen, dass neben Schubspannungen auch Nebenspannungen durch Druck, Schwellenpressung und Biegung auftreten. Die ermittelten Scherfestigkeiten sind deshalb stets kleiner als die beispielsweise in einem Torsionsversuch bestimmten Schubfestigkeiten. Schwindrisse und der Verlauf der Bruchfläche beeinflussen ebenfalls das Ergebnis.

4.4.2 Versuchsdurchführung und Auswertung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Einfluss der Holzfeuchte auf die Scherfestigkeit parallel zur Faserrichtung an den Holzarten Akasia, Jati, Keruing, Puspa und Lärche untersucht. Die Versuche wurden an Prüfkörpern mit einer Holzfeuchte von 12 % nach Lagerung im Normalklima 20/65 und nach Wasserlagerung mit einer Holzfeuchte über dem Fasersättigungsbereich durchgeführt.

Zur Berücksichtigung des Einflusses der Schnittrichtung auf die Scherfestigkeit parallel zur Faserrichtung wurden Prüfkörper mit Scherebene in Radial- und Tangentialfläche geprüft. Zur Verfügung standen für jede Holzart jeweils 36 Prüfkörper pro Versuchsreihe. Die Prüfkörper wurden in Längsrichtung der Kanthölzer genau hintereinander entnommen, so dass ein direkter Vergleich der Ergebnisse möglich ist. Die Maße der Prüfkörper betragen in Anlehnung an ASTM Standard D 143-83 (1993) $b / h / \ell = 50 / 40 / 45$ mm (Scherfläche: $b / h^* = 50 / 40$ mm) (Bild 4-18).

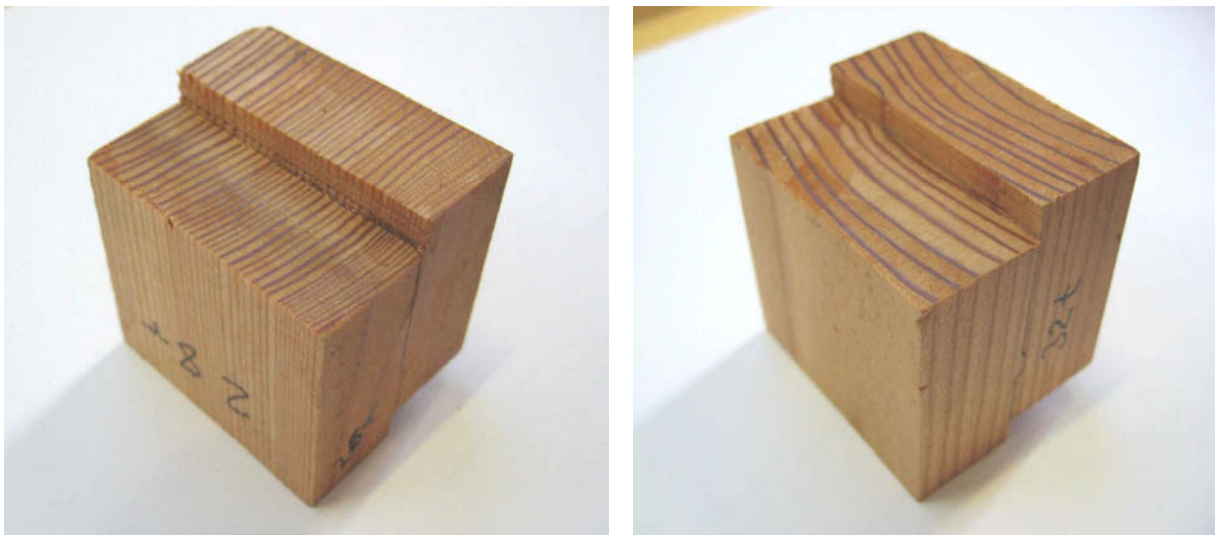


Bild 4-18 Scherebene in (a) Radialfläche und (b) Tangentialfläche

Die Scherfestigkeit wurde nach Gleichung (9) bestimmt:

$$f_v = \frac{F_{\max}}{b \cdot h^*} \quad (9)$$

In Bild 4-19 ist der Einfluss der Holzfeuchte auf die Scherfestigkeit parallel zur Faserrichtung dargestellt. Die untersuchten Holzarten weisen bei Verlauf der Scherebene in der Radialfläche eine höhere Scherfestigkeit parallel zur Faserrichtung auf als bei Verlauf der Scherebene in der Tangentialfläche. Je nach Holzart wurde eine Abnahme der Scherfestigkeit parallel zur Faserrichtung infolge Wassersättigung um maximal 47 % bestimmt.

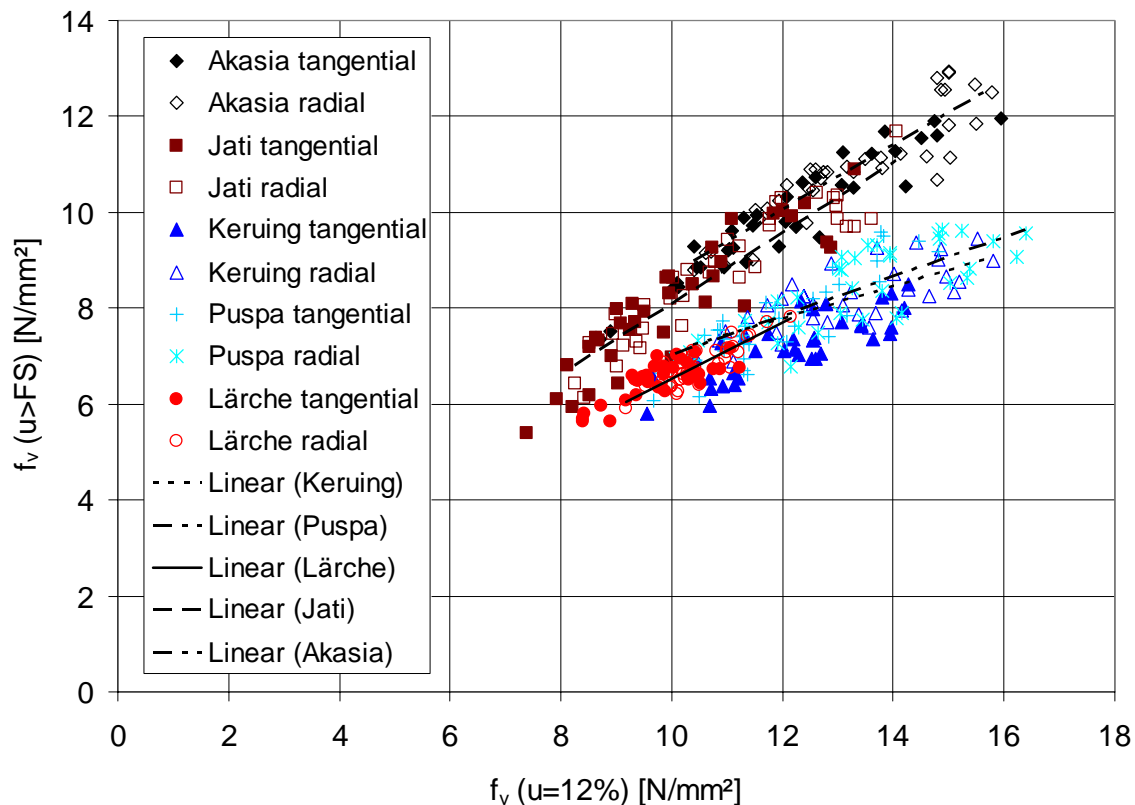


Bild 4-19 Einfluss der Holzfeuchte auf die Scherfestigkeit f_v

Tabelle 4-10 enthält eine Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Scherversuchen zur Ermittlung des Einflusses der Holzfeuchte auf die Scherfestigkeit parallel zur Faserrichtung. Eine Auflistung der einzelnen Versuchsergebnisse für alle Holzarten ist in Blaß und Fellmoser (2006) angegeben.

Tabelle 4-10 Einfluss der Holzfeuchte auf die Scherfestigkeit f_v

Holzart	Scher- ebene		u = 12%			u > FS			Abfall red f_v [%]
			ρ [kg/m ³]	u [%]	f_v [N/mm ²]	ρ [kg/m ³]	u [%]	f_v [N/mm ²]	
Akasia	Radial- fläche	min	659	11,3	10,4	1023	56,0	8,8	72,3%
		mittel	751	13,6	13,2	1088	74,5	10,9	82,6%
		max	833	15,6	15,8	1158	121,3	12,9	87,5%
		s	-	-	1,6	-	-	1,2	-
	Tangen- tialfläche	min	651	11,7	8,6	976	54,0	7,4	74,2%
		mittel	743	13,4	11,9	1076	74,5	9,8	82,5%
		max	850	15,3	16,0	1149	99,5	12,0	89,3%
		s	-	-	1,8	-	-	1,3	-
Jati	Radial- fläche	min	548	11,5	8,3	957	67,4	6,1	72,4%
		mittel	659	12,4	10,9	1057	87,0	8,8	80,4%
		max	775	13,2	14,1	1150	113,8	11,7	87,7%
		s	-	-	1,7	-	-	1,3	-
	Tangen- tialfläche	min	550	11,4	7,4	938	59,7	5,4	69,5%
		mittel	642	12,2	10,0	1032	87,4	8,1	80,6%
		max	771	13,0	13,3	1104	115,2	10,9	88,8%
		s	-	-	1,6	-	-	1,3	-
Keruing	Radial- fläche	min	575	13,0	10,4	1005	54,9	6,9	55,3%
		mittel	704	13,5	13,2	1055	80,4	8,2	62,4%
		max	815	14,0	15,8	1106	114,3	9,5	69,8%
		s	-	-	1,4	-	-	0,7	-
	Tangen- tialfläche	min	597	11,6	9,5	1001	50,2	5,8	53,5%
		mittel	709	11,9	12,1	1063	81,0	7,2	59,8%
		max	825	12,4	14,3	1137	110,2	8,5	68,1%
		s	-	-	1,3	-	-	0,7	-
Puspa	Radial- fläche	min	604	12,7	10,1	1066	77,1	6,8	55,4%
		mittel	692	13,1	13,4	1119	96,1	8,4	63,2%
		max	788	13,7	16,4	1177	129,3	9,7	69,8%
		s	-	-	1,7	-	-	0,9	-
	Tangen- tialfläche	min	606	12,8	9,7	1063	77,9	6,1	57,7%
		mittel	695	13,2	11,9	1116	95,5	7,7	64,9%
		max	800	13,6	14,8	1170	116,9	9,6	70,9%
		s	-	-	1,3	-	-	0,9	-
Lärche	Radial- fläche	min	550	11,1	9,2	840	65,4	5,9	60,9%
		mittel	620	12,1	10,5	890	83,8	6,8	65,0%
		max	693	13,7	12,2	962	108,7	7,8	69,4%
		s	-	-	0,7	-	-	0,4	-
	Tangen- tialfläche	min	574	11,0	8,4	869	65,9	5,6	60,2%
		mittel	638	12,5	9,8	919	85,9	6,5	66,4%
		max	724	14,3	11,2	964	107,7	7,2	71,9%
		s	-	-	0,7	-	-	0,4	-

4.5 Abhängigkeit der Haftung und Reibung

4.5.1 Kenntnisstand

Die einzelnen Holzdauben einer Druckrohrleitung aus Holz wirken über Haftung in ihrer Nut- und Federverbindung in Längsrichtung der Holzdauben als Gesamtquerschnitt. Eine Druckrohrleitung aus Holz kann somit als Träger mit kreisförmigem Querschnitt aus vielen Einzelquerschnittsteilen betrachtet werden. Für nachfolgende Untersuchungen des Trag- und Verformungsverhaltens von Druckrohrleitungen aus Holz wurden für ausgewählte Holzarten die Haftungs- und Reibungskoeffizienten experimentell ermittelt. Aus den Ergebnissen dieser Versuche kann die Schubtragfähigkeit in der Nut- und Federverbindung in Längsrichtung der Holzdauben ermittelt werden.

Reibung wird als Widerstand zweier sich berührender Körperflächen gegen ihre Verschiebung definiert. Als Kenngröße dient der Haftungs- (μ_H) bzw. Reibungskoeffizient (μ_G). Wird die Haftung überschritten, tritt Bewegung ein; deshalb wird zwischen Haftungs- und Reibungskoeffizient unterschieden. Der Widerstand ist umso größer, je weicher, rauher und nasser die Körperflächen sind.

Möhler und Maier (1969) untersuchten die Haftung von Fichtenholz in Abhängigkeit von der Flächenpressung. Bei trockenem und halbtrockenem Fichtenholz in sägerauem Zustand ermittelten sie Haftungskoeffizienten von 0,4 bis 0,7, im nassen Zustand von 0,9 bis 1,0. Bei gehobelten Flächen ergaben sich bei trockenem und halbtrockenem Fichtenholz Haftungskoeffizienten von 0,25 bis 0,35, im nassen Zustand von 0,7 bis 0,9. Die Flächenpressung hatte nur bei Werten unter 0,2 N/mm² einen günstigen Einfluss auf die Haftungskoeffizienten; darüber konnte kein Einfluss festgestellt werden.

In weiterführenden Versuchen von Möhler und Herröder (1979) wurden Haftungskoeffizienten von Fichtenholz für die Kombinationen Holz / Holz, Holz / Stahl und Holz / Beton ermittelt.

4.5.2 Versuchsdurchführung und Auswertung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Einfluss der Holzfeuchte auf die Haftungs- und Reibungskoeffizienten an den Holzarten Akasia, Jati, Keruing, Puspa und Lärche untersucht. Die Versuche wurden an Prüfkörpern mit einer Holzfeuchte von 12 % nach Lagerung im Normalklima 20/65 und nach Wasserlagerung mit einer Holzfeuchte über dem Fasersättigungsbereich durchgeführt. Zusätzlich wurde der Querdruck variiert (0,1 N/mm², 0,5 N/mm², 1,0 N/mm²), um den Einfluss der Flächenpressung bzw. Vorspannung auf die Haftungs- und Reibungskoeffizienten zu berücksichtigen.

Die Maße der Prüfkörper betragen $b / h / \ell = 60 / 50 / 200$ mm (Bild 4-20). Die Prüfkörper wurden dreiteilig hergestellt, so dass jeweils zwei Reibungsflächen vorhanden waren. Die Oberflächen der Prüfkörper waren gehobelt. Die beiden äußeren Prüfkörperteile wurden während des Versuchs unverschieblich gehalten, das mittlere, länger ausgeführte Teil mit zunehmender Horizontalkraft H belastet. Die Vertikalkraft F_v wurde während der Versuchsdurchführung konstant über den Kolben einer Prüfmaschine aufgebracht. Zur Verfügung standen für jede Holzart pro Versuchsreihe 12 Prüfkörper mit gehobelten Oberflächen. Bei der Holzart Lärche wurden zusätzlich die Haftungs- und Reibungskoeffizienten einer Nut- und Federverbindung bestimmt.

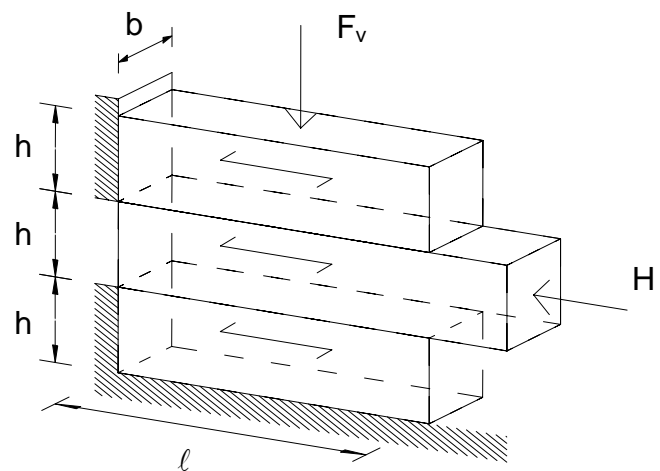


Bild 4-20 Versuchsaufbau zur Ermittlung der Haftungs- und Reibungskoeffizienten

Die Haftungskoeffizienten μ_H und die Reibungskoeffizienten μ_G wurden mit den Gleichungen (10) und (11) bestimmt.

$$\mu_H = \frac{H_{\max}}{2 \cdot F_v} \quad (10)$$

$$\mu_G = \frac{H_G}{2 \cdot F_v} \quad (11)$$

In Bild 4-21 sind zwei typische Kraft-Weg-Diagramme dargestellt. Typ A zeigt einen relativ steilen Anstieg bis zum Erreichen der maximalen Horizontalkraft. Bei Überschreiten der Haftung setzt das Gleiten des Mittelholzes ein. Beim kontinuierlichen Gleitvorgang fällt die Horizontalkraft parabelförmig ab. Im Gegensatz dazu verläuft

der Gleitvorgang bei Typ B nicht mehr kontinuierlich, sondern stoßweise. Nach Überschreiten der Haftung und einsetzendem Gleitvorgang fängt sich der Prüfkörper wieder und die Horizontalkraft steigt an bis zu einem erneuten Gleiten, wobei die Werte der Horizontalkraft unterhalb des Maximums zu Versuchsbeginn liegen.

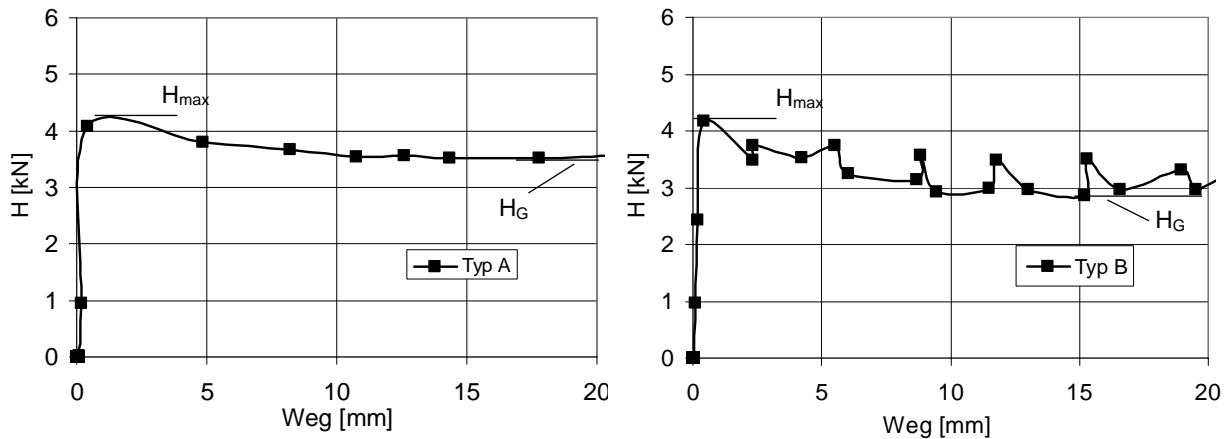


Bild 4-21 typische Kraft-Weg-Diagramme aus Reibungsversuchen

(Holzart: Jati; Vorspannung: $0,5 \text{ N/mm}^2$; Holzfeuchte $> \text{FS}$)

Bild 4-22 zeigt den Einfluss der Holzfeuchte und der Vorspannung auf den Haftungskoeffizienten (Mittelwert aus jeder Versuchsreihe). Für die ermittelten Reibungskoeffizienten ergibt sich ein ähnlicher Verlauf. Bei einer Holzfeuchte von etwa 12 % wurden für Jati die geringsten Haftungs- und Reibungskoeffizienten bei gehobelter Oberfläche ermittelt, für Keruing die größten.

Die Versuche bestätigen die Angaben von Möhler und Maier (1969), dass nur sehr geringe Vorspannungen die Haftungs- und Reibungskoeffizienten günstig beeinflussen. Bei einer Flächenpressung von $0,5 \text{ N/mm}^2$ und $1,0 \text{ N/mm}^2$ wurden annähernd gleiche Koeffizienten für die jeweilige Holzart bestimmt, während bei einer geringeren Flächenpressung von $0,1 \text{ N/mm}^2$ deutlich höhere Werte ermittelt wurden.

Je nach Vorspannung und Holzart steigt der Haftungskoeffizient infolge Wassersättigung um bis zu 80 % an. Bei Keruing ist der Einfluss der Holzfeuchte auf den Haftungskoeffizienten am geringsten, bei Lärche am größten.

Die Nut- und Federverbindung wirkt sich im Vergleich zur glatten, gehobelten Oberfläche positiv auf die Koeffizienten aus. Bei einer Holzfeuchte von 12 % weisen Prüfkörper mit einer Nut- und Federverbindung im Vergleich zu Prüfkörpern mit gehobelter Oberfläche etwa 30 % höhere Haftungskoeffizienten auf. Bei wassergesättigten Prüfkörpern relativiert sich dieser Unterschied: der Haftungskoeffizient einer Nut- und Federverbindung ist etwa 18 % größer als bei einer gehobelten Oberfläche.

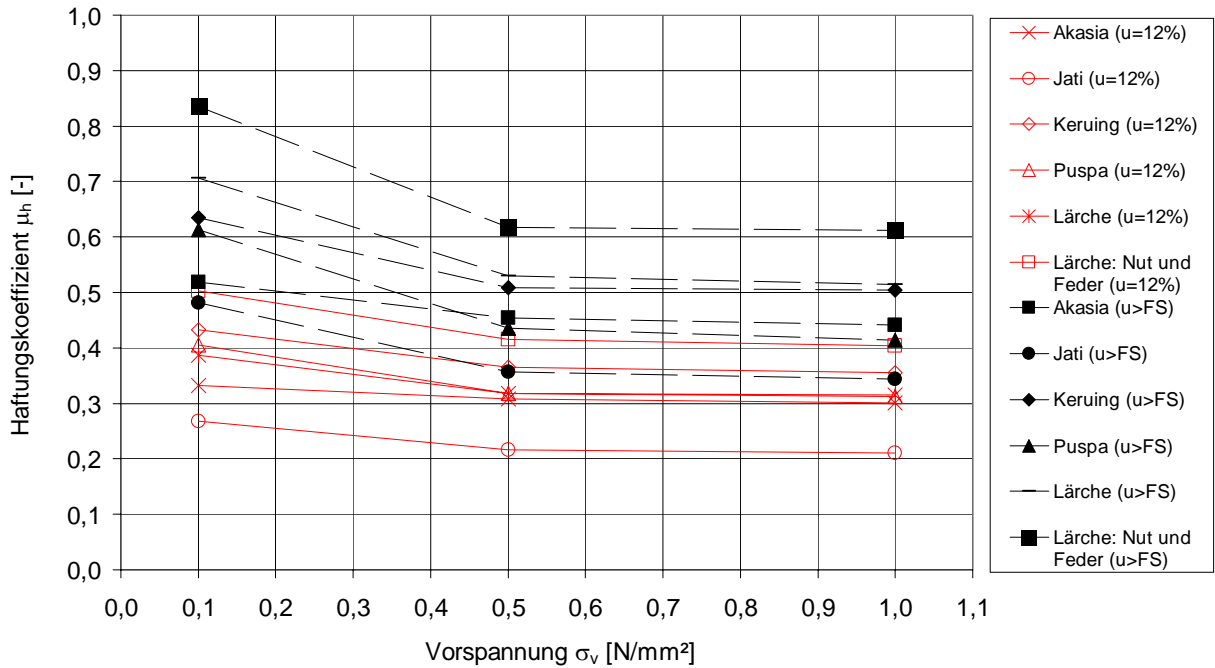


Bild 4-22 Einfluss von Holzfeuchte und Vorspannung auf den Haftungskoeffizient

Tabelle 4-11 enthält eine Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Versuchen zur Ermittlung des Einflusses der Holzfeuchte und der Vorspannung auf die Haftungs- und Reibungskoeffizienten. Eine Auflistung der einzelnen Versuchsergebnisse für alle Holzarten ist in Blaß und Fellmoser (2006) angegeben.

Tabelle 4-11 Einfluss von Holzfeuchte und Vorspannung auf Haftungs- und Reibungskoeffizienten

Holzart	Holzfeuchte u [%]	Flächenpressung σ_v [N/mm ²]	Haftungskoeffizient			Reibungskoeffizient			μ_G / μ_H		
			min	mittel	max	min	mittel	max	min	mittel	max
Akasia	12	0,1	0,275	0,332	0,387	0,250	0,297	0,357	0,803	0,897	0,963
		0,5	0,231	0,308	0,376	0,219	0,278	0,348	0,832	0,907	0,976
		1,0	0,253	0,300	0,363	0,228	0,264	0,303	0,780	0,884	0,959
	> FS	0,1	0,449	0,519	0,598	0,373	0,425	0,502	0,766	0,820	0,854
		0,5	0,414	0,454	0,484	0,327	0,369	0,402	0,716	0,814	0,913
		1,0	0,410	0,441	0,480	0,318	0,342	0,381	0,716	0,778	0,857
Jati	12	0,1	0,180	0,268	0,362	0,165	0,231	0,329	0,734	0,858	0,929
		0,5	0,158	0,216	0,264	0,143	0,189	0,225	0,799	0,877	0,970
		1,0	0,161	0,211	0,247	0,143	0,189	0,230	0,852	0,900	0,958
	> FS	0,1	0,411	0,482	0,549	0,339	0,398	0,461	0,760	0,826	0,902
		0,5	0,306	0,356	0,410	0,266	0,290	0,317	0,699	0,822	0,923
		1,0	0,303	0,344	0,388	0,238	0,260	0,301	0,656	0,761	0,927
Keruing	12	0,1	0,346	0,433	0,498	0,300	0,353	0,387	0,733	0,821	0,960
		0,5	0,322	0,365	0,406	0,277	0,300	0,317	0,743	0,825	0,943
		1,0	0,307	0,355	0,408	0,267	0,293	0,321	0,731	0,828	0,922
	> FS	0,1	0,579	0,635	0,682	0,371	0,430	0,472	0,641	0,676	0,712
		0,5	0,435	0,509	0,571	0,276	0,319	0,366	0,523	0,630	0,737
		1,0	0,434	0,505	0,569	0,245	0,296	0,341	0,518	0,590	0,768
Puspa	12	0,1	0,332	0,405	0,485	0,263	0,305	0,356	0,643	0,757	0,849
		0,5	0,237	0,318	0,381	0,171	0,248	0,317	0,680	0,779	0,840
		1,0	0,233	0,313	0,376	0,178	0,240	0,285	0,655	0,766	0,875
	> FS	0,1	0,555	0,613	0,679	0,331	0,403	0,481	0,575	0,656	0,714
		0,5	0,379	0,436	0,482	0,220	0,283	0,358	0,491	0,650	0,777
		1,0	0,363	0,414	0,465	0,211	0,276	0,358	0,525	0,670	0,838
Lärche	12	0,1	0,285	0,386	0,438	0,205	0,296	0,354	0,688	0,764	0,852
		0,5	0,210	0,318	0,397	0,164	0,251	0,324	0,643	0,786	0,871
		1,0	0,232	0,316	0,372	0,182	0,227	0,337	0,617	0,719	0,905
	> FS	0,1	0,623	0,707	0,787	0,368	0,449	0,539	0,545	0,635	0,694
		0,5	0,455	0,530	0,587	0,240	0,293	0,353	0,469	0,555	0,671
		1,0	0,441	0,514	0,565	0,244	0,314	0,369	0,452	0,613	0,725
Lärche mit Nut- und Federverbindung	12	0,1	0,427	0,503	0,578	0,346	0,418	0,506	0,716	0,830	0,932
		0,5	0,336	0,415	0,503	0,263	0,355	0,442	0,722	0,853	0,924
		1,0	0,340	0,404	0,511	0,269	0,343	0,431	0,710	0,847	0,904
	> FS	0,1	0,749	0,836	0,934	0,503	0,585	0,663	0,648	0,700	0,744
		0,5	0,554	0,618	0,698	0,341	0,405	0,485	0,614	0,654	0,754
		1,0	0,534	0,612	0,691	0,313	0,401	0,477	0,528	0,660	0,804

4.6 Zusammenfassung der Untersuchungen zum Einfluss der Holzfeuchte

Tabelle 4-12 enthält eine Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Untersuchungen zum Einfluss der Holzfeuchte auf Festigkeiten und Steifigkeiten der Holzarten Akasia, Jati, Keruing, Puspa und Lärche. Die Angaben in Tabelle 4-12 beziehen sich auf den Festigkeits- bzw. Steifigkeitsverlust in [%] infolge der Holzfeuchtezunahme von 12 % auf einen Wert über dem Fasersättigungsbereich bei Wasserlagerung. Die Angaben sind Mittelwerte der jeweiligen Versuchsreihe aus Kapitel 4.

Tabelle 4-12 Festigkeits- bzw. Steifigkeitsverlust infolge Holzfeuchtezunahme

(Anfangsholzfeuchte: 12 %; Holzfeuchtezunahme auf einen Wert über dem Fasersättigungsbereich)

Verlust [%]	Akasia	Jati	Keruing	Puspa	Lärche
E_0	8,5	7,8	15,8	11,8	13,9
E_{90}	25,0	23,2	34,2	33,8	35,4
G	18,7	17,3	24,7	21,7	22,9
f_m	16,5	14,1	23,1	20,1	25,4
$f_{c,90}^*$	27,0	29,3	43,3	36,4	36,7
f_v	17,5	19,5	38,9	36,0	34,3

* Fall 1: Vollbelastung nach DIN EN 408 (2003)

Die Versuchsergebnisse bestätigen die Angaben aus früheren Beiträgen, dass i.a. die Festigkeiten von der Holzfeuchte deutlicher beeinflusst werden als die Steifigkeiten. Des Weiteren ist aus Tabelle 4-12 ersichtlich, dass die untersuchten Holzarten in zwei Gruppen eingeteilt werden können. Bei Keruing, Puspa und Lärche ist der Einfluss der Holzfeuchte auf die Festigkeiten und Steifigkeiten deutlich größer als bei Akasia und Jati. Ursachen hierfür sind Unterschiede beim rheologischen Verhalten und holzanatomischen Aufbau.

5 Quellverhalten von Holz

Unterhalb des Fasersättigungsbereiches von Holz treten Quell- und Schwinderscheinungen auf. Dieses Phänomen wird beim Einsatz von Druckrohrleitungen aus Holz als praktische Gebrauchseigenschaft zu Nutzen gemacht: die Dichtigkeit von Druckrohrleitungen aus Holz wird durch das Quellen der einzelnen Holzdauben gewährleistet. Die Holzdauben werden mit einer Holzfeuchte von ca. 16 % bis 18 % eingebaut. Aufgrund des entstehenden Quellungsdruckes nach dem Füllen des Rohres mit Wasser werden die Spannringe aus Stahl auf Zug beansprucht. Die Größe des Quellungsdruckes ist neben dem Wasserinnendruck somit entscheidend für die Bemessung der Spannringe. Zu diesem Zweck wurden für die ausgewählten Holzarten Akasia, Jati, Keruing, Puspa und Lärche die maximalen Quellmaße bei freier Quellung und der maximale Quellungsdruck bei behinderter Quellung bestimmt.

5.1 Freie Quellung

5.1.1 Kenntnisstand

Unterhalb des Fasersättigungsbereiches quillt Holz durch Einlagerung von Wassermolekülen in den Zellwänden und es erfolgt somit ein Ausdehnen der Zellwände. Nach Kollmann (1982) beginnt in Bereichen kleinster Holzfeuchte die Quellung zunächst konkav. Im Holzfeuchtebereich von etwa 5 % bis 20 % steigt die Quellung nahezu linear mit der Holzfeuchte an. In diesem Bereich kann deshalb die Steigung der Quellungskurve als prozentuales Quellmaß je 1 % Holzfeuchteänderung angegeben werden (differentielles Quellmaß). Anschließend nimmt die Quellung bis zum Fasersättigungsbereich einen konvexen Verlauf an. Mit Erreichen der Fasersättigung werden zugleich die Quellvorgänge abgeschlossen.

Das Quellverhalten von Holz wird überwiegend durch Rohdichte, Spätholzanteil, anatomischen Aufbau und Ligninanteil bestimmt. Der umgekehrte Vorgang der Quellung wird als Schwindung bezeichnet.

Das Längsquellmaß europäischer Hölzer liegt im Durchschnitt nach Knigge und Schulz (1966) bei 0,4 %, das Radialquellmaß bei 4,3 % und das Tangentialquellmaß bei 8,3 %. Die geringe Längsquellung wird mit der Orientierung der Fibrillen in Faserrichtung und dem relativ geringen Anteil quer zur Faserrichtung liegender Zellwände erklärt. Die Mikrofibrillen in der S₂-Schicht der Sekundärwand der Holzzelle sind in der Regel nur unter einem kleinen Winkel zur Faserrichtung geneigt. Feuchtebedingte Verformungen treten somit hauptsächlich in radialer und tangentialer Querrichtung auf. Unterschiede in Radial- und Tangentialrichtung können mit dem größeren Durchmesser der radial verlaufenden quellfähigen Mittellamellen, unter-

schiedlicher Fibrillenaufbau von Radial- und Tangentialwand und mit der in Radialrichtung besseren Verankerung der Zellwände durch die Holzstrahlen erklärt werden. Der Zellwandaufbau mit S_1 -, S_2 - und S_3 -Schicht ist auch der Grund dafür, dass eigentlich nicht von einer „freien“ Quellung gesprochen werden kann. Die einzelnen Schichten behindern durch die jeweilige Anordnung der Fibrillen unter verschiedenen Winkeln zueinander mehr oder weniger die Quellung. Durch die gegenseitige Absperrwirkung entstehen somit bereits im submikroskopischen Bereich primäre Spannungen (Keylwerth (1962a)).

5.1.2 Versuchsdurchführung und Auswertung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Quellverhalten der Holzarten Akasia, Jati, Keruing, Puspa und Lärche untersucht. Hierzu wurden die maximalen Quellmaße nach DIN 52 184 (1979) bestimmt. Je Holzart wurden drei Versuchsreihen mit unterschiedlichen Holzfeuchten zu Versuchsbeginn ($u = 0 \%$, 12% und 18%) durchgeführt, um den Einfluss der Anfangsholzfeuchte auf das Quellverhalten im Hinblick auf die praktische Herstellung von Druckrohrleitungen aus Holz zu untersuchen. Das Versuchsprogramm zur Ermittlung der maximalen Quellmaße bei freier Quellung ist in Tabelle 5-1 zusammengefasst. Pro Holzart wurden aus 30 Kanthölzern jeweils drei Prüfkörper zugeschnitten, die in Längsrichtung der Kanthölzer direkt hintereinander lagen. Die drei Prüfkörper pro Kantholz wurden in die Versuchsreihen 1 bis 3 eingeteilt.

Tabelle 5-1 Versuchsprogramm zur freien Quellung

Versuchsreihe	maximales Quellmaß α	Ausgangsholzfeuchte u_0	Versuche je Holzart
1	radial, tangential, longitudinal	0 %	30
2		12 %	30
3		18 %	30

Unter Berücksichtigung der Schwindvorgänge wurden die Versuchskörper zunächst grob vorgeschnitten und bis auf Versuchsreihe 3 im Normalklima 20/65 nach DIN 50 014 (1985) bis zur Gewichtskonstanz gelagert. Anschließend wurden zur Ermittlung der radialen und tangentialen Quellmaße die Proben mit quadratischem Querschnitt von 20 mm Kantenlänge und einer Länge in Faserrichtung von 10 mm hergestellt (Bild 5-1). Versuchsreihe 1 wurde im Wärmeschrank bis zum darrtrockenen Zustand getrocknet. Abweichend von DIN 52 184 (1979) wurde an den Proben zusätzlich das longitudinale Quellmaß bestimmt.

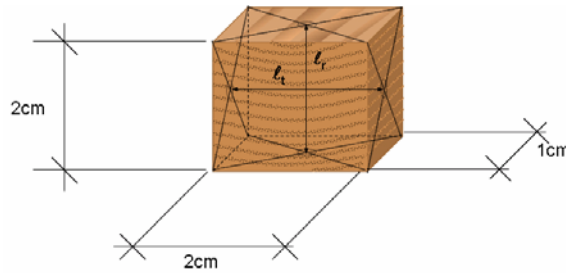


Bild 5-1 Prüfkörper zur Bestimmung der maximalen Quellmaße (DIN 52 184 (1979))

Die Prüfkörper wurden nach Erreichen der vorgegebenen Ausgangsholzfeuchte zu Versuchsbeginn in ein Wasserbad mit einer Temperatur von ca. 20° C getaucht und so lange unter Wasser gelagert, bis der maximale Quellungszustand erreicht wurde. Während der Wasserlagerung wurden die Maße in radialer, tangentialer und longitudinaler Richtung sowie die Masse der Prüfkörper fortlaufend bestimmt.

Das maximale lineare Quellmaß α_{\max} in radialer, tangentialer und longitudinaler Richtung wurde nach DIN 52 184 (1979) mit folgender Gleichung (12) ermittelt:

$$\alpha_{\max} = \frac{\ell_w - \ell_0}{\ell_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (12)$$

Dabei ist ℓ_w das Maß des nassen Holzes in einer bestimmten holzanatomischen Richtung, dessen Feuchte über dem Fasersättigungsbereich liegt, und ℓ_0 das Maß des Holzes zu Versuchsbeginn bei 0 %, 12 % und 18 % Holzfeuchte.

Das Volumenquellmaß α_v kann näherungsweise durch Addition der linearen Quellmaßen der drei Hauptrichtungen des Holzes bestimmt werden.

Die Versuchsergebnisse der freien Quellung werden anhand der radialen und tangentialen Quellmaße der Versuchsreihe 1 erläutert. In Bild 5-2 sind die radialen und tangentialen Quellungskurven (Mittelwerte) mit einer Holzfeuchte zu Versuchsbeginn von 0 % dargestellt. Die untersuchten Holzarten lassen sich in zwei Gruppen einteilen:

- Akasia, Jati: schwach quellende Holzarten mit einem maximalen Quellmaß in tangentialer Richtung zwischen 4,6 % und 5,1 % sowie in radialer Richtung zwischen 2,3 % und 2,6 % (Mittelwerte der Versuchsreihe 1)
- Keruing, Puspa, Lärche: stark quellende Holzarten mit einem maximalen Quellmaß in tangentialer Richtung zwischen 7,7 % und 8,8 % sowie in radialer Richtung zwischen 3,6 % und 3,9 % (Mittelwerte der Versuchsreihe 1)

Der Unterschied zwischen schwach und stark quellenden Holzarten kann nach Keylwerth (1962a) auf die Sorptionskontraktion des Wassers und des Holzes bei den schwach quellenden Holzarten zurückgeführt werden.

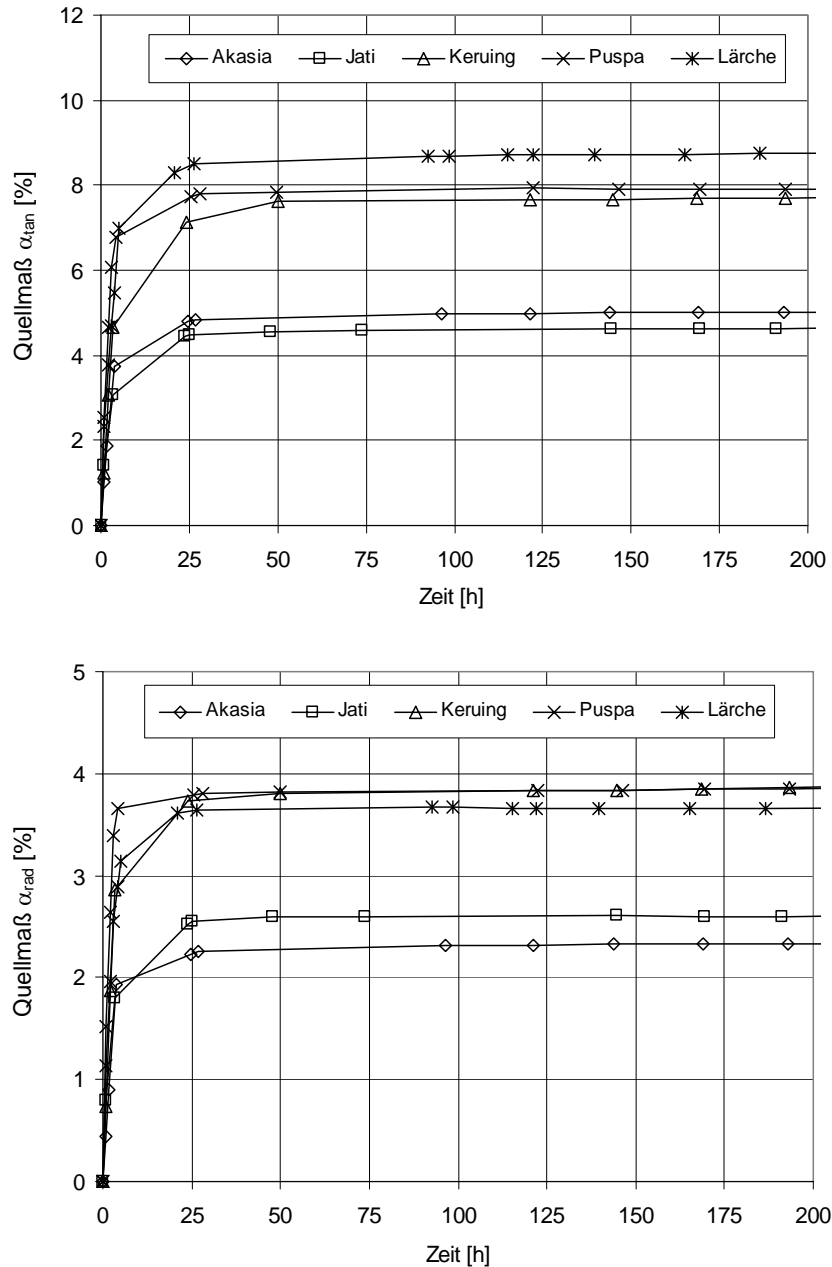


Bild 5-2 zeitlicher Verlauf der (a) tangentialen und (b) radialen Quellkurven (Mittelwerte der Versuchsreihe 1: Holzfeuchte zu Versuchsbeginn 0 %)

Tabelle 5-2 enthält die maximalen Quellmaße bei freier Quellung mit unterschiedlichen Holzfeuchten zu Versuchsbeginn. Eine graphische Darstellung der Versuchsergebnisse für alle Holzarten sowie die zugehörigen Regressionskurven (Mittelwerte) befinden sich in Anhang B.

Die maximalen Quellmaße wurden bei einer Holzfeuchte zu Versuchsbeginn von 0 % erreicht. Die Quellmaße bei einer Anfangsholzfeuchte von 12 % bzw. 18 % sind, da bereits Wasser in den intermizellaren und interfibrillaren Hohlräume der Zellwand vorhanden ist, dementsprechend kleiner.

Tabelle 5-2 maximales Quellmaß bei freier Quellung

Holzart	Holzfeuchte zu Versuchsbeginn [%]		maximales Quellmaß			
			α_{tan} [%]	α_{rad} [%]	α_{long} [%]	α_{Vol} [%]
Akasia	0	min	4,39	1,96	0,30	7,00
		mittel	5,01	2,33	0,50	7,85
		max	5,92	2,66	0,61	8,97
	12	min	2,56	1,44	0,20	4,35
		mittel	3,02	1,72	0,36	5,09
		max	3,47	2,10	0,69	6,02
	18	min	1,26	0,75	0,17	2,25
		mittel	1,86	0,96	0,35	3,17
		max	2,41	1,25	0,55	3,90
Jati	0	min	3,32	1,96	0,30	5,84
		mittel	4,66	2,60	0,43	7,69
		max	6,55	3,25	0,69	10,19
	12	min	1,93	1,09	0,22	3,52
		mittel	2,45	1,34	0,42	4,21
		max	3,10	1,79	0,67	5,18
	18	min	0,89	0,64	0,19	1,81
		mittel	1,18	0,76	0,33	2,27
		max	1,44	0,90	0,41	2,70
Keruing	0	min	6,27	2,89	0,97	10,52
		mittel	7,72	3,87	1,18	12,77
		max	9,01	5,08	1,47	15,18
	12	min	3,94	2,28	0,54	7,39
		mittel	4,99	2,73	0,74	8,46
		max	5,94	3,28	0,97	9,79
	18	min	2,91	0,99	0,39	4,75
		mittel	3,31	1,43	0,58	5,32
		max	3,99	1,91	0,81	6,35
Puspa	0	min	7,28	3,54	0,45	11,58
		mittel	7,94	3,85	0,64	12,43
		max	8,63	4,10	0,81	13,10
	12	min	5,03	2,56	0,34	8,13
		mittel	5,39	2,80	0,54	8,72
		max	5,76	3,01	0,75	9,22
	18	min	3,48	1,53	0,32	5,64
		mittel	4,13	1,80	0,51	6,44
		max	4,85	2,09	0,75	7,32
Lärche	0	min	7,79	2,87	0,20	11,00
		mittel	8,74	3,67	0,35	12,76
		max	9,81	4,58	0,60	14,54
	12	min	5,79	1,87	0,19	8,23
		mittel	6,52	2,44	0,31	9,27
		max	7,13	3,04	0,50	10,26
	18	min	3,66	1,31	0,10	5,21
		mittel	4,09	1,68	0,24	6,02
		max	4,47	2,08	0,38	6,69

Zur Bestimmung des differentiellen Quellmaßes ist in Bild 5-3 exemplarisch das Quellverhalten von Puspa in Abhängigkeit von der Holzfeuchte dargestellt. Deutlich ist im Bereich geringer Holzfeuchte das Anwachsen der differentiellen Quellung zu erkennen, die annähernde Konstanz dieser Quellung im Bereich praktischer Holzfeuchten und schließlich der Abfall der Quellung zur Fasersättigungsfeuchte hin.

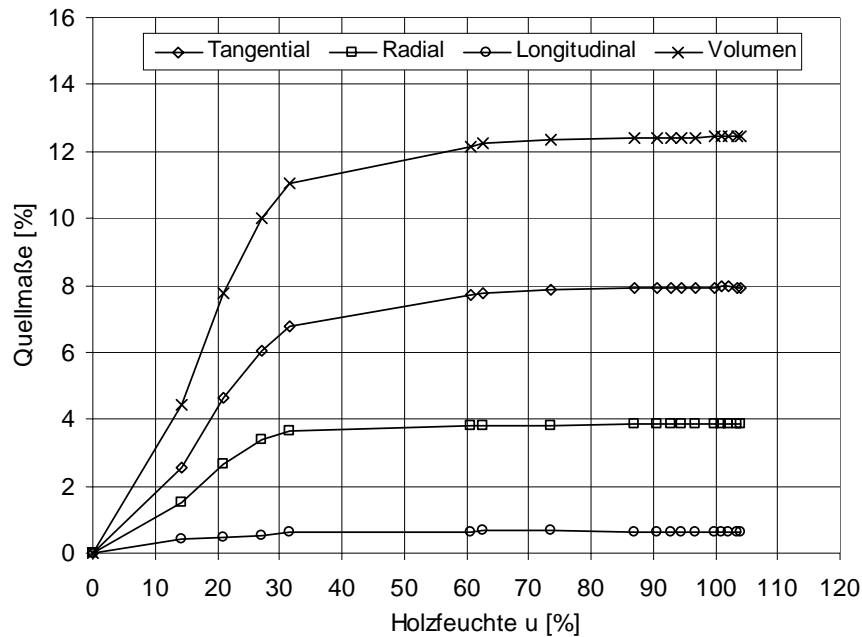


Bild 5-3 Quellmaß in Abhängigkeit der Holzfeuchte

(Holzart: Puspa; Mittelwerte der Versuchsreihe 1: Holzfeuchte zu Versuchsbeginn: 0 %)

Wie in Kapitel 5.1.1 erläutert, steigt im Holzfeuchtebereich von 5 % bis 20 % die Quellung nahezu linear mit dem Feuchtegehalt an. Bei der Versuchsauswertung wurde in diesem Bereich die Steigung der Quellungskurve als prozentuales Quellmaß je 1 % Holzfeuchteänderung (differentielles Quellmaß) angegeben.

Das Anisotropieverhältnis der differentiellen Quellmaße in radialer und tangentialer Richtung liegt bei den untersuchten Holzarten zwischen 1,6 und 1,8. Jedoch kann nach Keylwerth (1962a) vom Anisotropieverhältnis der Quellung im Bereich von 5 % bis 20 % Holzfeuchte nicht auf dieselbe Anisotropie der maximalen Quellungswerte geschlossen werden.

Tabelle 5-3 enthält eine Zusammenstellung der differentiellen Quellmaße und der Quellungsanisotropie (Mittelwerte) aus der Versuchsreihe 1 mit einer Holzfeuchte zu Versuchsbeginn von 0 %.

Tabelle 5-3 differentielles Quellmaß und Quellungsanisotropie bei freier Quellung

Holzart	differentielles Quellmaß		Anisotropie
	q_{tan} [%/%]	q_{rad} [%/%]	$q_{\text{tan}} / q_{\text{rad}}$ [-]
Akasia	0,27	0,15	1,80
Jati	0,27	0,16	1,69
Keruing	0,34	0,21	1,62
Puspa	0,31	0,17	1,82
Lärche	0,29	0,17	1,71

Während oberhalb der Fasersättigung kein Quellvorgang mehr stattfindet, nimmt die Masse aufgrund des in die Kapillaren des Zellkörpers eingedrungenen Wassers weiter zu. Das Volumen hingegen bleibt konstant, da kein Wasser mehr in der Zellwand gebunden werden kann. Die Rohdichte, die als Quotient aus Masse und Volumen definiert ist, weist oberhalb der Fasersättigungsfeuchte somit einen größeren Anstieg in Abhängigkeit von der Holzfeuchte auf als unterhalb der Fasersättigung (Bild 5-4). Dieser „Knick“ im Kurvenverlauf kennzeichnet den Fasersättigungspunkt. Tatsächlich findet der Übergang nicht abrupt statt; es handelt sich vielmehr um einen Übergangsbereich. Die Größe dieses Fasersättigungsbereiches ist von der Darrrohichte des Holzes abhängig. Zum Vergleich mit den Versuchsergebnissen ist in Bild 5-4 die Rohdichte in Abhängigkeit von der Holzfeuchte nach Kollmann (1982) aufgetragen.

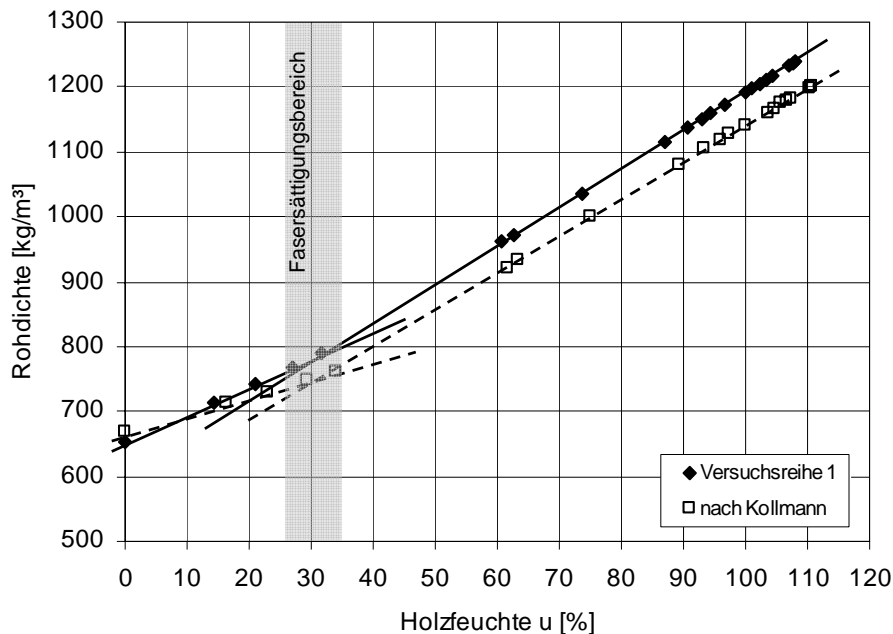


Bild 5-4 Rohdichte in Abhängigkeit der Holzfeuchte

(Holzart: Puspa; Mittelwerte der Versuchsreihe 1: Holzfeuchte zu Versuchsbeginn: 0 %)

5.2 Behinderte Quellung

5.2.1 Kenntnisstand

Wird die Quellung durch äußere Krafteinwirkung behindert, so treten Quelldruckspannungen auf. Perkitny (1958) definiert den Quellungsdruck des Holzes als eine ansteigende und nach Überschreitung eines Höchstwertes wieder absinkende Druckspannung, die auf eine trockene Holzprobe in einer Richtung ausgeübt werden muss, um ihre ursprüngliche in Druckrichtung gemessene Höhe bei gleichzeitiger Befeuchtung der Probe konstant zu halten. Der Quellungsdruck steigt zu Beginn der Befeuchtung proportional mit der Holzfeuchte an. Bei Erreichen des Höchstwertes führen plastische Formänderungen bzw. Veränderungen des Zellgefüges bei weiterer Befeuchtung zu einem Absinken des Quellungsdruckes (Kollmann (1982)). Der spätere Abfall der Spannungen entspricht dem rheologischen Verhalten von Holz mit Plastifizierung und Relaxation.

Die Höhe des Quellungsdruckes wird nicht vom Quellmaß bei freier Quellung bestimmt, sondern vom elastischen und rheologischen Verhalten des Holzes. Der Quellungsdruck ist insbesondere von der Holzart, der Druckrichtung, der Anfangs- und Endfeuchte des Holzes, der Vorbehandlung des Holzes, der Befeuchtung des Holzes (Wasserlagerung bzw. wassergesättigte Luft) und dem Vorspannungsgrad, der auf die noch trockene Probe vor der Befeuchtung aufgebracht wird, abhängig.

Kingston und Perkitny (1972) geben in ihrer Veröffentlichung eine Zusammenstellung der Ergebnisse von verschiedenen Untersuchungen über den maximalen Quellungsdruck unterschiedlicher Holzarten an. Bei Befeuchtung mit Wasser wurden maximale Werte des Quellungsdruckes von bis zu 6 N/mm² ermittelt. Mit steigender Rohdichte nimmt auch der Quellungsdruck zu. Der radiale Quellungsdruck kann teils größer, teils kleiner als der tangentialer Quellungsdruck sein. Im Allgemeinen wird ein ausgeprägtes Druckspannungsmaximum nach verhältnismäßig kurzer Zeit ausgebildet. Bei Laubhölzern ist der Quellungsdruck in der Regel in radialer Richtung größer als in tangentialer. Diese Tatsache ist darin begründet, dass die Proportionalitätsgrenze bei Druckbeanspruchung quer zur Faserrichtung in radialer Richtung größer ist als in tangentialer. Bei Nadelhölzern sind die Verhältnisse genau umgekehrt. Jedoch gibt es auf der Grundlage der bisher durchgeführten Untersuchungen auch Überschneidungen beider Bereiche.

Untersuchungen von Perkitny und Helińska (1963) über den Einfluss der Befeuchtung des Holzes und des Vorspannungsgrades auf den Quellungsdruck ergaben je nach Holzart Maximalwerte von bis zu 4 N/mm² (tangentialer Quellungsdruck bei Befeuchtung in wassergesättigter Luft).

Der Einfluss des Vorspannungsgrades auf den Quellungsdruck ist nach Perkitny und Helińska (1963) bei Befeuchtung in Wasser am größten: tangential bzw. radial ge-

richtete Vorspannungen von 2 N/mm² bzw. 1 N/mm² waren ausreichend, um einen durch die Quellung hervorgerufenen Anstieg der Druckspannungen nicht nur auszuschalten, sondern im Gegenteil in einen stetigen Druckabfall umzuwandeln.

Versuche von Keylwerth (1962b) belegen, dass Holz von höherer Anfangsfeuchte im Vergleich zu sehr trockenem Holz nach einem kürzeren Anstieg auf ein niedrigeres Spannungsmaximum einen geringeren Spannungsabfall nach weiterer Befeuchtung aufweist. Dies bedeutet, dass das weichere feuchte Holz die einmal entwickelte Quellungsspannung nachhaltiger trägt als trockenes Holz. Die Ergebnisse seiner Untersuchungen über die behinderte Quellung wurden von Keylwerth (1962b) in einem elastischen Modellansatz zusammengefasst.

Keylwerth (1962c) untersuchte die parallel zur Faserrichtung behinderte Quellung. In diesem Fall wird zwar nur die sehr viel geringere Längsquellung des Holzes wirksam, jedoch ist der Elastizitätsmodul in Faserrichtung etwa um den Faktor 20 größer als rechtwinklig zur Faserrichtung. In sehr trockenem Holz mit hohem Elastizitätsmodul wurden messbare Quelldruckspannungen nachgewiesen. Im Bereich üblicher Gebrauchsfeuchten sind jedoch in der Praxis diese Spannungen meist vernachlässigbar klein.

5.2.2 Versuchsdurchführung und Auswertung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Quellverhalten der Holzarten Akasia, Jati, Keruing, Puspa und Lärche bei behinderter Quellung untersucht. In Abhängigkeit vom Vorspannungsgrad und der Holzfeuchte zu Versuchsbeginn wurde der Quellungsdruk in radialer und tangentialer Richtung bestimmt. Die Versuchsreihen wurden bei einer Holzfeuchte zu Versuchsbeginn von 12 % und 18 % durchgeführt, um den Einfluss der Holzfeuchte auf den Quellungsdruk zu untersuchen. Zusätzlich wurde unmittelbar vor Versuchsbeginn in tangentialer bzw. radialer Richtung ein Vorspannungsgrad von 0 N/mm², 0,5 N/mm² und 1,5 N/mm² aufgebracht, um den Einfluss der Vorspannung auf den Verlauf des Quellungsdruk zu bestimmen. Die Versuche wurden mit Wasserlagerung bei einer Temperatur von ca. 20° C durchgeführt.

Tabelle 5-4 enthält eine Zusammenfassung des Versuchsprogramms zur behinderten Quellung. Die Prüfkörper wurden in Anlehnung an die Versuche zur freien Quellung nach DIN 52 184 (1979) als quadratische Proben mit 20 mm Kantenlänge und einer Länge in Faserrichtung von 10 mm hergestellt. Für die Probenentnahme wurden die gleichen Kanthölzer verwendet wie bei den Untersuchungen zur freien Quellung. Somit ist ein direkter Vergleich der Ergebnisse aus den Versuchen zur behinderten Quellung mit denen der freien Quellung möglich.

Tabelle 5-4 Versuchsprogramm zur behinderten Quellung

Versuchsreihe	Quellungsdruck	Holzfeuchte zu Versuchsbeginn u_0 [%]	Vorspannungsgrad [N/mm ²]	Versuche je Holzart
1	radial	12	0	8
2			0,5	8
3			1,5	8
4		18	0	8
5			0,5	8
6			1,5	8
7	tangential	12	0	8
8			0,5	8
9			1,5	8
10		18	0	8
11			0,5	8
12			1,5	8

Der zur Bestimmung des Quellungsdruckes bei behinderter Quellung konzipierte Versuchsaufbau ist in Bild 5-5 dargestellt. Aufgrund der Quellung der Holzproben bei Wasserlagerung erfolgt eine Dehnung der Schraubschrauben. Diese Dehnungen werden mittels Dehnmessstreifen, die in einer mittigen Bohrung in den Schrauben eingeklebt sind, automatisch in einem Zyklus von fünf Minuten gemessen und somit der Quellungsdruck bestimmt. Die Vorspannung von 0,5 N/mm² bzw. 1,5 N/mm² wurde vor der Wasserlagerung über die Schrauben aufgebracht. Die Steifigkeit der Schrauben mit eingeklebten Dehnmessstreifen wurde vorab in Zugversuchen ermittelt.



Bild 5-5 Versuchsaufbau zur Bestimmung des Quellungsdruckes bei behinderter Quellung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen zur behinderten Quellung zusammengefasst. Die Kurven in den Diagrammen sind Mittelwerte aus der jeweiligen Versuchsreihe. Bei allen Versuchsreihen war der tangentiale Quellungsdruck

größer als der radiale (Bild 5-6). Die Holzarten Keruing, Puspa und Lärche zeigten einen ähnlichen Verlauf der Quelldruckspannungen, welcher – im Gegensatz zu dem Verlauf bei den Holzarten Akasia und Jati – durch einen Spannungsabfall nach Erreichen eines Maximums gekennzeichnet ist. Der Spannungsverlust beträgt je nach Holzart, Anfangsfeuchte und Vorspannungsgrad bis zu 40 %. Bemerkenswert ist, dass bei den Holzarten Akasia und Jati, welche bei der freien Quellung als schwach quellende Holzarten eingestuft wurden (Keruing, Puspa und Lärche: stark quellende Holzarten), der Spannungsabfall des Quellungsdruckes nach Erreichen eines Maximalwertes vernachlässigbar gering ist.

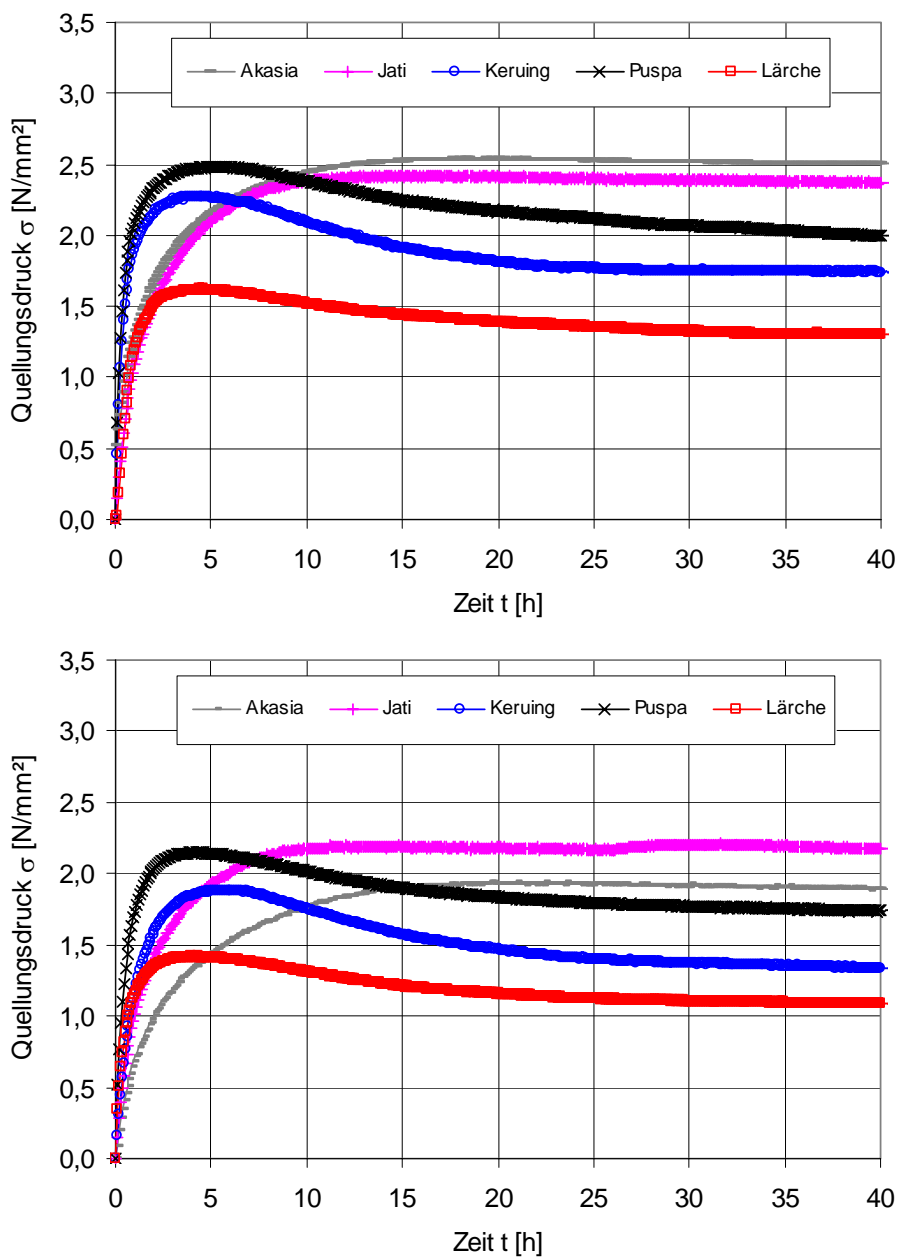


Bild 5-6 (a) tangentialer und (b) radialer Quellungsdruck
(Holzfeuchte zu Versuchsbeginn: 12 %, Vorspannung: 0 N/mm²)

Die Versuchsergebnisse bestätigen, dass der Vorspannungsgrad einen bedeutenden Einfluss auf den Verlauf des Quellungsdruckes besitzt. Der Wert des maximalen Quellungsdruckes nimmt mit dem Grad der Vorspannung zu (Bild 5-7). Jedoch ist bei hoher Vorspannung der spätere Abfall des Quellungsdruckes bei den Holzarten Keruing, Puspa und Lärche größer. Teilweise sinkt der Quellungsdruck nach dem Erreichen eines Maximums aufgrund einer zu hohen Vorspannung und der damit verbundenen plastischen Verformung und Relaxation auf einen Wert ab, der unterhalb des Quellungsdruckes der Proben mit einem geringeren Vorspannungsgrad liegt.

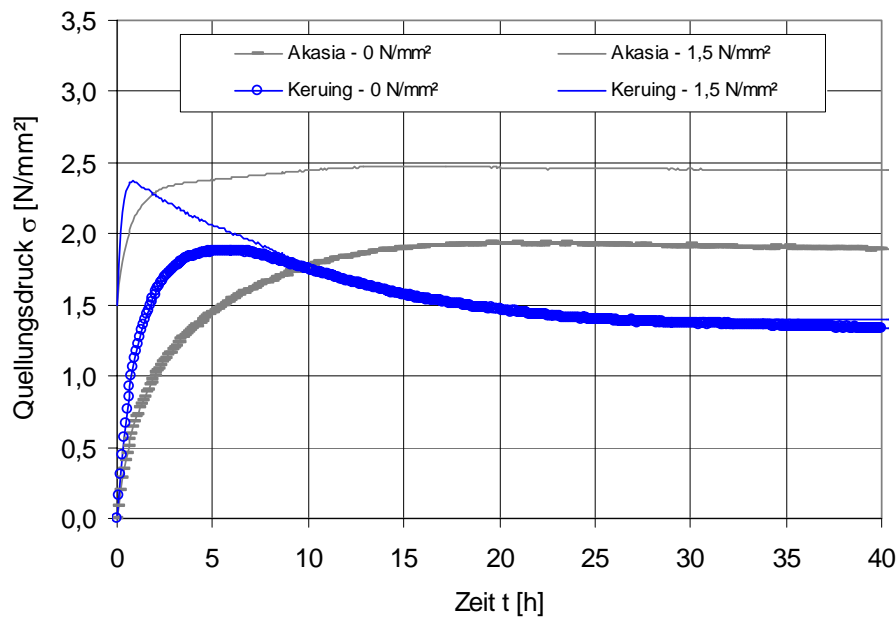


Bild 5-7 Einfluss der Vorspannung auf den radialen Quellungsdruck
(Holzfeuchte zu Versuchsbeginn: 12 %, Vorspannung: 0 - 1,5 N/mm²)

Neben dem Vorspannungsgrad hat auch die Holzfeuchte zu Versuchsbeginn einen bedeutenden Einfluss auf den Quellungsdruck. Der maximale Quellungsdruck ist bei einer geringeren Holzfeuchte zu Versuchsbeginn größer. Jedoch ist auch der Spannungsabfall nach dem Erreichen des Maximalwertes bei einer geringeren Anfangsfeuchte größer. Die richtige Wahl der Anfangsfeuchte ist deshalb bei der Herstellung von Druckrohrleitungen aus Holz von besonderer Bedeutung, da in diesem Fall der Quellungsdruck als praktische Gebrauchseigenschaft benötigt wird. Die verhältnismäßig hohe Verarbeitungsfeuchte von Holzdauben mit 16 % bis 18 % hat neben den oben genannten technologischen Gründen zudem auch einen wirtschaftlichen Vorteil.

In Tabelle 5-5 sind die maximalen Quelldruckspannungen in radialer und tangentialer Richtung sowie die zugehörigen Spannungsverluste nach Erreichen des Maximalwertes für die untersuchten Holzarten in Abhängigkeit von der Holzfeuchte zu Ver-

suchsbeginn und dem Vorspannungsgrad angegeben. Der Verlauf des Quellungsdruckes (Mittelwert für die jeweilige Versuchsreihe) ist in Anhang C graphisch dargestellt.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die Einteilung der Holzarten bei freier Quellung in schwach quellende (Akasia, Jati) und stark quellende Holzarten (Keruing, Puspa, Lärche) sich auch auf die Untersuchungen bei behinderter Quellung übertragen lässt. Die stark quellenden Holzarten weisen bei behinderter Quellung nach Erreichen eines Maximalwertes der Quelldruckspannung einen Spannungsabfall auf ein konstantes Maß auf. Bei den schwach quellenden Holzarten hingegen ist der Spannungsabfall vernachlässigbar klein.

Jedoch sind die aus der freien Quellung ermittelten Quellmaße einer Holzart ein unzureichendes Kriterium, um Rückschlüsse auf die Größe des Quellungsdruckes bei behinderter Quellung zu schließen. Die Quelldruckspannungen bei behinderter Quellung werden vom elastischen und rheologischen Verhalten des Holzes bestimmt. Die Größe des Quellungsdruckes wird maßgeblich von mechanischen Eigenschaften des Holzes (Verformungsmodul, elastischer Anteil der Quellungen deformation) beeinflusst. Plastische Verformungen und Relaxation vermindern die Quellspannungen.

Tabelle 5-5 Quellungsdruck und Spannungsabfall bei behinderter Quellung

Holzart	Holzfeuchte zu Versuchsbeginn [%]	Vorspannung σ_v [N/mm ²]	maximaler Quellungsdruck						mittlerer Quellungsdruck nach 25 h						Abfall		Anisotropie		
			max σ_{lian} [N/mm ²]			max σ_{rad} [N/mm ²]			σ_{lian} [N/mm ²]			σ_{rad} [N/mm ²]			red $\Delta\sigma_{\text{lian}}$ [%]	red $\Delta\sigma_{\text{rad}}$ [%]	maximaler Quellungsdruck [-]	mittlerer Quellungsdruck [-]	
			min	mittel	max	min	mittel	max	min	mittel	max	min	mittel	max	min	mittel	max	mittel	max
Akasia	12	0,0	2,23	2,55	2,92	1,76	1,95	2,18	2,23	2,51	2,80	1,65	1,89	2,14	99,0%	96,9%	mittel	1,31	1,33
		0,5	3,22	3,54	3,93	1,96	2,34	2,51	3,15	3,47	3,83	1,95	2,32	2,50	98,0%	99,1%	mittel	1,51	1,50
		1,5	3,44	3,78	4,09	2,21	2,48	2,70	3,33	3,66	3,92	2,19	2,45	2,62	96,8%	99,0%	mittel	1,52	1,49
Akasia	18	0,0	2,20	2,42	2,61	1,57	1,78	2,03	2,10	2,35	2,54	1,54	1,74	1,99	97,1%	97,8%	mittel	1,36	1,35
		0,5	3,20	3,42	3,72	1,95	2,19	2,47	3,08	3,31	3,63	1,89	2,12	2,41	96,8%	96,8%	mittel	1,56	1,56
		1,5	3,37	3,64	3,98	2,02	2,41	2,69	3,27	3,51	3,81	1,94	2,34	2,61	96,4%	97,1%	mittel	1,51	1,50
Jaiti	12	0,0	2,23	2,46	2,73	1,90	2,22	2,50	2,14	2,38	2,70	1,87	2,18	2,49	96,7%	98,2%	mittel	1,11	1,09
		0,5	2,90	3,23	3,46	2,34	2,59	2,86	2,89	3,19	3,36	2,24	2,52	2,82	98,8%	97,3%	mittel	1,25	1,27
		1,5	3,14	3,39	3,67	2,52	2,79	3,01	3,09	3,37	3,66	2,51	2,71	2,88	99,0%	97,0%	mittel	1,22	1,24
Keruing	18	0,0	2,06	2,34	2,54	1,69	2,03	2,25	2,02	2,25	2,41	1,62	1,96	2,14	96,2%	96,6%	mittel	1,15	1,15
		0,5	2,85	3,10	3,31	2,15	2,44	2,72	2,77	2,99	3,15	2,09	2,34	2,60	96,5%	95,9%	mittel	1,27	1,28
		1,5	2,98	3,29	3,54	2,35	2,64	2,94	2,82	3,11	3,42	2,32	2,55	2,87	94,5%	96,6%	mittel	1,25	1,22
Keruing	12	0,0	2,12	2,32	2,56	1,64	1,90	2,09	1,49	1,76	2,01	1,14	1,34	1,56	76,0%	70,5%	mittel	1,22	1,31
		0,5	2,43	2,69	2,97	1,97	2,34	2,67	1,67	1,95	2,16	1,32	1,61	1,89	72,0%	68,8%	mittel	1,15	1,21
		1,5	2,61	2,84	3,12	2,13	2,38	2,56	1,66	1,92	2,24	1,14	1,41	1,77	67,0%	59,0%	mittel	1,19	1,36
Puspa	18	0,0	1,88	2,13	2,38	1,41	1,65	1,86	1,53	1,78	2,01	1,09	1,27	1,44	83,0%	77,0%	mittel	1,29	1,40
		0,5	2,41	2,54	2,71	1,85	2,06	2,28	1,76	2,02	2,20	1,35	1,54	1,82	79,5%	74,8%	mittel	1,23	1,31
		1,5	2,54	2,74	3,00	1,84	2,21	2,41	1,95	2,08	2,28	1,04	1,34	1,52	76,0%	60,6%	mittel	1,24	1,55
Puspa	12	0,0	2,26	2,52	2,71	1,84	2,18	2,47	1,82	2,05	2,36	1,52	1,74	2,05	81,0%	80,0%	mittel	1,16	1,18
		0,5	3,08	3,39	3,76	2,29	2,60	2,93	2,40	2,61	2,93	1,72	2,09	2,47	77,0%	80,0%	mittel	1,30	1,25
		1,5	3,23	3,60	3,96	2,56	2,81	3,07	2,19	2,56	2,96	1,67	2,06	2,39	71,0%	73,0%	mittel	1,28	1,24
Lärche	18	0,0	2,00	2,36	2,72	1,67	1,94	2,22	1,78	1,98	2,24	1,30	1,55	1,83	84,0%	80,0%	mittel	1,22	1,28
		0,5	2,99	3,24	3,55	2,02	2,38	2,71	2,33	2,61	2,85	1,69	1,89	2,15	81,0%	79,0%	mittel	1,36	1,38
		1,5	3,04	3,43	3,92	2,34	2,64	2,87	2,25	2,58	2,86	1,77	2,02	2,25	75,0%	77,0%	mittel	1,30	1,28
Lärche	12	0,0	1,27	1,65	1,94	1,25	1,43	1,60	0,94	1,31	1,59	0,85	1,09	1,26	79,0%	76,0%	mittel	1,15	1,20
		0,5	1,83	2,13	2,38	1,59	1,74	1,99	1,37	1,61	1,93	1,12	1,29	1,41	75,0%	74,0%	mittel	1,22	1,25
		1,5	2,04	2,33	2,65	1,71	1,93	2,21	1,33	1,53	1,85	0,95	1,10	1,28	66,0%	58,0%	mittel	1,21	1,39
Lärche	18	0,0	1,27	1,45	1,60	1,03	1,24	1,43	1,08	1,20	1,39	0,89	1,00	1,14	83,0%	80,0%	mittel	1,17	1,20
		0,5	1,81	2,00	2,22	1,41	1,56	1,79	1,27	1,58	1,81	1,10	1,20	1,28	79,0%	77,0%	mittel	1,28	1,32
		1,5	1,83	2,11	2,31	1,54	1,67	1,81	1,25	1,43	1,72	0,83	1,08	1,30	68,0%	64,0%	mittel	1,26	1,32

6 Herstellung und Verlegung von Druckrohrleitungen aus Holz

6.1 Allgemeines

Blaß und Fellmoser (2005) geben einen Überblick über den Einsatz von Druckrohrleitungen aus Holz. Maßgebend für den optimalen Einsatz und die Lebensdauer einer Druckrohrleitung aus Holz ist ein sorgfältiger Herstellungsprozess. Die Herstellung der Druckrohrleitungen kann in offener Bauweise entweder durch eine Verlegung im Graben mit anschließender Verfüllung oder auf Sätteln als Auflager erfolgen. Die Variante der unter- bzw. oberirdischen Verlegung einer Holzrohrleitung ist unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen vor Ort sowie der technischen Lösung der Problemstellung zu wählen.

Druckrohrleitungen aus Holz werden in der Regel mit einem Durchmesser von 0,50 m bis 4,0 m hergestellt und für eine Bruttofallhöhe von bis zu 60 m ausgelegt. Die Rohrlänge kann aufgrund der geringen Empfindlichkeit gegenüber Temperaturschwankungen mehrere Kilometer betragen, ohne dass Dehnvorrichtungen eingebaut werden müssen. Die Rohrleitung besteht aus einzelnen Bohlen oder Kanthölzern, die gegeneinander versetzt und mit Stahlringen zusammengehalten werden (Bild 6-1). Durch den Versatz der Längsstöße der Dauben entsteht ein leichtes Rohr ohne durchgehende Stöße. Der Zusammenbau der einzelnen Holzdauben und Spannringe zu einer Druckrohrleitung erfolgt mit Hilfe von Innen- und Außenlehren.



Bild 6-1 Verlegung einer Druckrohrleitung aus Holz (von Zwick Holzbau GmbH)

Die Dauben weisen an den Längsseiten und Stirnseiten Nut- und Federverbindungen auf. Die einzelnen Holzdauben besitzen einen trapezförmigen Querschnitt (Dicke d_D)

≈ 50 mm bis 90 mm) und eine Länge ℓ_D von ca. 4 m. Der trapezförmige Querschnitt und die Nut- und Federverbindung werden mit einer Fräsmaschine hergestellt (Bild 6-2), wobei je nach Rohrdurchmesser für die Herstellung von Holzdauben verschiedene Fräsköpfe mit unterschiedlicher Neigung β eingesetzt werden ($\beta \approx 4^\circ$ bis 6°). Die mittlere Breite der Holzdauben b_D sollte zwischen 10 cm und 15 cm betragen. Die Anzahl der Holzdauben, die zu einem Kreisquerschnitt zusammengesetzt werden, ergibt sich aus dem Rohrumfang und der mittleren Breite der Holzdauben.

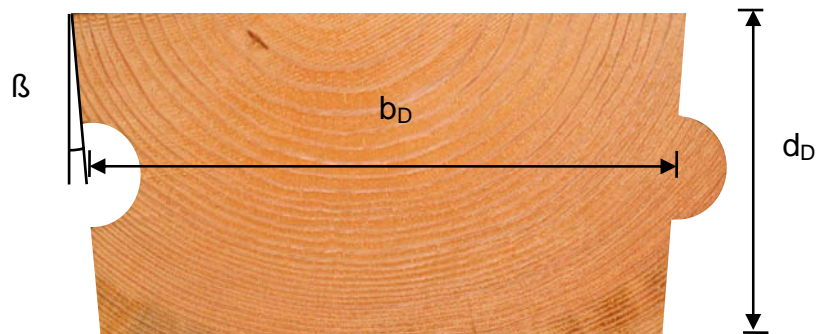


Bild 6-2 Querschnitt einer Holzdaube

An den Stirnseiten wird eine Fremdfeder aus Sperrholz, Metall oder Kunststoff eingesetzt (Bild 6-3). Die Feuchte der Holzdauben sollte beim Einbau ca. 16 % bis 18 % betragen. Die richtige Wahl der Holzfeuchte ist für die Herstellung von Druckrohrleitungen aus Holz deshalb von besonderer Bedeutung, da in diesem Fall der entstehende Quellungsdruck bei Wasserfüllung des Rohres als praktische Gebrauchseigenschaft benötigt wird. Die Dichtigkeit der Rohrleitung wird durch das Quellen des Holzes gewährleistet und die stetige Wassersättigung des Holzes verhindert zuverlässig einen Pilzbefall.



Bild 6-3 Detail Nut- und Federverbindung

Bei der Verlegung von Druckrohrleitungen aus Holz werden die Spannringe leicht vorgespannt, um den Zusammenbau zu ermöglichen und die einzelnen Holzdauben hinreichend dicht zusammenzupressen. Die Stahlringe bestehen in der Regel aus feuerverzinkten Flachstahlbändern. Setzsicherungen können zur Sicherung der Muttern am Spannschloss eingesetzt werden. Eine spiralförmige Anordnung der Spannschlösser der einzelnen Spannringe in Längsrichtung der Rohrleitung gewährleistet eine gleichmäßige Verteilung der Vorspannkraft (Bild 6-4). Bei sehr großen Rohrdurchmessern können die Spannringe in verschiedene Segmente aufgeteilt werden. Der Abstand der Spannringe in Längsrichtung der Rohrleitung wird entsprechend dem hydrostatischen Druckverlauf angepasst.



Bild 6-4 Anordnung der Spannringe

Durch unterschiedliche Daubenlängen und aufgrund der Flexibilität der Rohrleitung kann die Trassenführung dem Gelände optimal angepasst werden (Bild 6-5). Rohrkrümmungen mit Radien bis zum 30-fachen des Rohrdurchmessers können somit problemlos hergestellt werden; kleinere Radien verlangen den Einsatz von Sonderbauteilen. Durch die Verformbarkeit der Rohrleitung können zudem Setzungen des Baugrundes bis zu einem bestimmten Maß ausgeglichen werden.



Bild 6-5 Krümmung einer Druckrohrleitung aus Holz (von Zwick Holzbau GmbH)

Der Einsatz von Druckrohrleitungen aus Holz bietet gegenüber konventionellen Rohrleitungen aus Stahl oder Beton Vorteile. Mit zunehmender Betriebsdauer minimieren sich die Reibungsverluste bei Druckrohrleitungen aus Holz im Gegensatz zu Stahl- oder Betonrohren. Durch das geringe Gewicht der einzelnen Holzdauben und Spannrings kann eine Verlegung auch in unwegsamem Gelände erfolgen. Zusätzlich entstehen durch kompakte Holzpakete nur geringe Transportkosten. Die Lebensdauer von Druckrohrleitungen aus Holz beträgt zwischen 60 und 100 Jahren. Äußere Witterungseinflüsse (z.B. Sonneneinstrahlung) und eine Entleerung des Rohres über einen längeren Zeitraum beeinträchtigen die Lebensdauer. Eine Druckrohrleitung aus Holz ist nur dann ausreichend beständig, wenn die Rohrleitung nicht über einen längeren Zeitraum entleert wird und somit die Gefahr des Austrocknens der Holzdauben besteht. Eine regelmäßige Kontrolle des Zustandes der Druckrohrleitung wird empfohlen.

6.2 Aufgelagerte Druckrohrleitungen aus Holz

Eine Variante der Verlegung von Druckrohrleitungen aus Holz ist die Auflagerung der Rohrleitung auf Sätteln (Bild 6-6). Für die Bemessung stellt sich bei diesem System aus Dauben und Stahlrings, das in regelmäßigen Abständen auf Sattelkonstruktionen aufgelagert ist, unter den Beanspruchungen Eigengewicht und Wasserlast mit Innendruck ein komplexer Spannungs- und Verformungszustand ein. Die Auflager können aus Stahl-, Beton- oder Holzkonstruktionen errichtet werden.



Bild 6-6 aufgelagerte Druckrohrleitung aus Holz (von Boxholm Produktion AB, Canbar Inc.)

Die Auflager dienen bei der Verlegung der Druckrohrleitung zugleich als Lehre für den unteren Querschnittsteil der Rohrleitung; der obere Querschnittsteil wird mit Hilfe von Innenlehren erstellt. Der Abstand der Auflager wird in der Praxis i.a. mit der halben Daubenlänge angesetzt. Die Breite der Auflager wird in der Regel zwischen 10 cm und 20 cm gewählt. Der Umschließungswinkel der Druckrohrleitung im unteren Bereich durch die Auflagerkonstruktion sollte zwischen 90° und 120° betragen, um eine ausreichende Lastverteilung zu gewährleisten. Der Umschließungswinkel beeinflusst maßgebend die Auflagerpressung und die Querschnittsverformung der Druckrohrleitung. Ausführliche Untersuchungen über den Einfluss der Auflagerkonstruktion auf das Trag- und Verformungsverhalten von Rohren und Kreiszyllindern werden von Mang (1970) beschrieben.

6.3 Erdverlegte Druckrohrleitungen aus Holz

Die Verlegung von Druckrohrleitungen aus Holz im Graben mit anschließender Verfüllung (Bild 6-7) ist eine Alternative gegenüber der Auflagerung von Rohrleitung auf Sattelkonstruktionen. Bei aufgelagerten Rohrleitungen mit großen Durchmessern sind aufgrund des geforderten Umschließungswinkels der Rohrleitung durch die Auflagerkonstruktion große Lagersockel erforderlich. Des Weiteren können bei solchen Rohrleitungen die Beanspruchungen aus Eigengewicht des Rohres und aus Wassergewicht die Beanspruchungen überwiegen, die durch den Wasserinnendruck hervorgerufen werden. Im Vergleich zu Holzrohrleitungen auf Sattelkonstruktionen werden bei erdverlegten Rohrleitungen die Biegemomente in Längsrichtung der Rohrleitung und die durch die Auflagerreaktionen hervorgerufene Querschnittsverformungen durch die elastische Bettung wesentlich abgemindert. Diese Vorteile sind gegenüber dem Aufwand für die Erdarbeiten bei erdverlegten Rohrleitungen abzuwägen. Eine Überwachung des Zustandes der Rohrleitung oder Reparaturmaßnahmen wie der Austausch von einzelnen Holzdauben und Spannringen ist bei erdverlegten Rohrleitungen nur bedingt möglich. Die Herstellungskosten für erdverlegte Druckrohrleitungen aus Holz sind aufgrund der Erdarbeiten im Vergleich zu aufgelagerten Rohrleitungen in der Regel geringfügig höher.



Bild 6-7 erdverlegte Druckrohrleitung aus Holz (von Zwick Holzbau GmbH)

Der konventionelle Einbau von erdverlegten Druckrohrleitungen aus Holz in offener Bauweise kann in Anlehnung an ATV-DVWK-A 127 (08/2000) und ATV-DVWK-A 139 (06/2001) ausgeführt werden (Bild 6-8). Im Hinblick auf die Sicherheit und Wirtschaft-

lichkeit von erdverlegten Rohrleitungen sind bei der Verlegung die Verfüllmaterialien und deren Einbringung in den Leitungsraben von Bedeutung. Als Verfüllmaterial können grundsätzlich entweder das Aushubmaterial (in ursprünglicher oder aufbereiteter Form) oder Austauschmaterialien verwendet werden. Anforderungen an das Verfüllmaterial bestehen im Hinblick auf Tragfähigkeit, Steifigkeit, Verträglichkeit mit Leitungsmaterialien und anstehendem Boden sowie Beständigkeit gegenüber Oberflächen- und Grundwasser. Grober Kies, Steinbrocken oder anderes porös lagerndes Material ist für das Verfüllen des Rohrgrabens nicht geeignet. Hingegen werden feinkörnige mineralische Materialien als günstig für die Lebensdauer von erdverlegten Druckrohrleitungen aus Holz eingestuft.

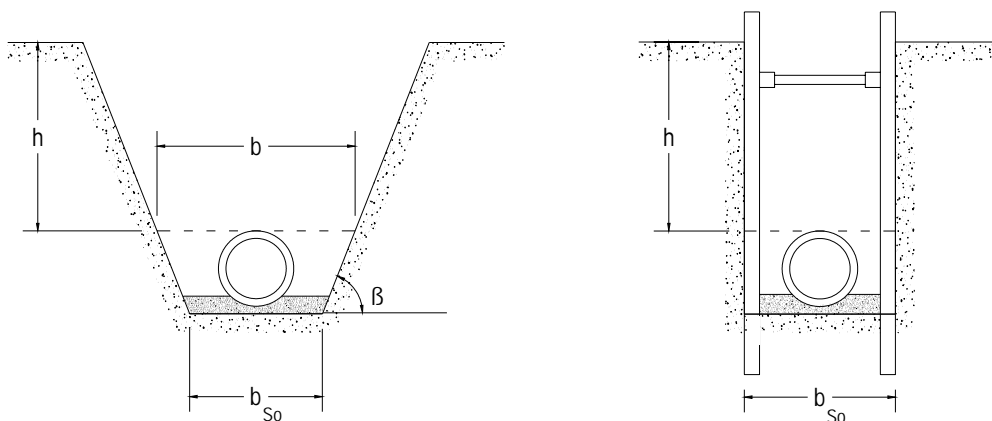


Bild 6-8 Graben mit geböschten und parallelen Wänden

Für die Rohrauf Lagerung auf der Grabensohle ist die Bettung so auszubilden, dass Längsbiegungen und punktuelle Belastungen, die zu einer lokalen Überbeanspruchung der Rohrleitung führen können, vermieden werden. Im Bereich der Rohrleitungszone (Rohrauf Lager und Einbettung) darf nur verdichtungsfähiger Boden verwendet werden, um nachträgliche Setzungen zu vermeiden. Die erforderliche Verdichtungsarbeit der Rohrgrabenverfüllung ist umso größer, je geringer die Steifigkeit des bestehenden Boden ist. Die Verfüllung und Verdichtung in der Rohrleitungszone sollte bei großen Rohrdurchmessern lagenweise in Schichten von etwa 30 cm ausgeführt werden, wobei Ovalisierungen der Druckrohrleitung zu vermeiden sind.

6.4 Anschlüsse und Sonderelemente

Ein Vorteil von Druckrohrleitungen aus Holz gegenüber Stahl- oder Betonrohren ist die optimale Anpassung an die Geländeform. Durch unterschiedliche Daubenlängen und aufgrund der Flexibilität der Rohrleitung kann die Trassenführung dem Gelände angepasst werden. Krümmungsradien bis zum 30-fachen des Rohrdurchmessers können problemlos hergestellt werden; kleinere Radien verlangen den Einsatz von

Sonderbauteilen (Krümmer). Bislang wurden Krümmer meist aus gebogenen Stahlrohrschüssen ausgeführt. Schwachpunkt dieser Lösung ist die Undichtigkeit am Übergang von Holz- zu Stahlrohr. Ähnliche Probleme treten am Flanschanschluss von Holzrohr am Einlauf bzw. Auslauf der Rohrleitung auf (z.B. bei Staumauern, Wasserbehältern und Einlaufbauwerken) (Bild 6-9).



Bild 6-9 Anschluss Druckrohrleitung aus Holz an Turbinenhaus mittels Stahlflansch

In einem Bauteilversuch wurde ein optimierter Anschluss am Übergang von Holzrohr zu Beton geprüft. Dabei wurde ein 1,0 m langer Rohrabschnitt mit dem Innendurchmesser von 1,4 m an zwei Stahlbetonplatten angeschlossen und ein Wasserinnendruck von 1,8 bar aufgebracht. Am Rohrabschnitt wurden Spannrings im Abstand von 20 cm angeordnet (Bild 6-10).

Die Herstellung des Anschlusses ist in Bild 6-11 dargestellt. Die Holzdauben werden zunächst 5 cm tief eingeschlitzt (Bild 6-11a). Anschließend müssen die Fugen zwischen den einzelnen Holzdauben abgeklebt werden (Bild 6-11b). Das Klebeband verhindert später beim Betonieren ein Eindringen von Betonschlemme in die Fugen. Dies würde das Schließen der Fugen zwischen den einzelnen Holzdauben beim Quellen behindern und somit zu Undichtigkeiten des Anschlusses führen. Zur Einleitung von Zugkräften aus den Holzdauben in die Stahlbetonplatten infolge Wasserinnendruck werden Vollgewindeschrauben (8 x 200 mm) unter einem Winkel von 45° zur Hälfte in die Holzdauben eingedreht (Bild 6-11c). Abschließend wird ein 10 cm breites Stahlblech (Dicke $t = 1$ mm) in den eingeschlitzten Holzdauben angeordnet (Bild 6-11d). Das Stahlblech, welches 5 cm übersteht, wird später zur Hälfte einbetoniert und sorgt für die Dichtigkeit des Anschlusses.



Bild 6-10 Versuch: optimierter Anschluss Holz - Beton

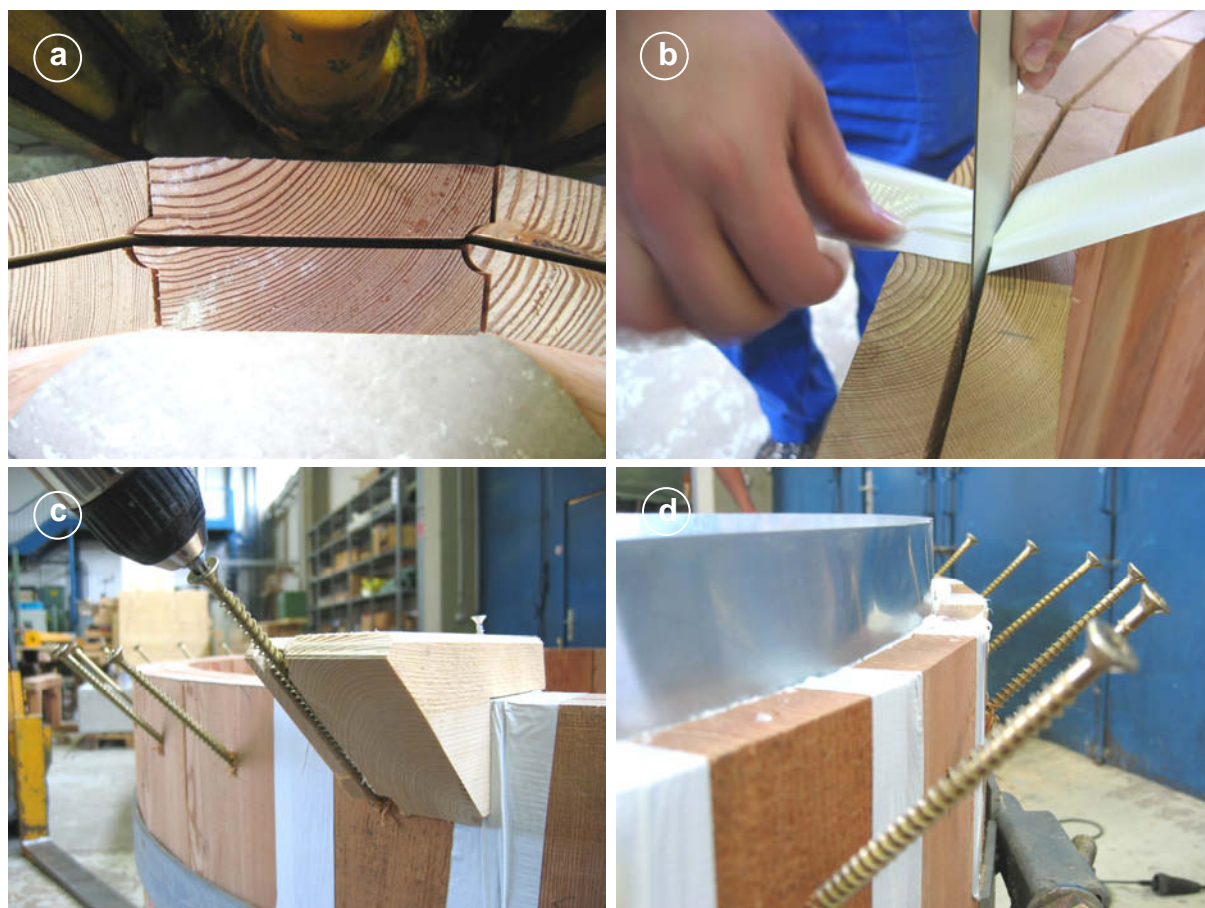


Bild 6-11 Herstellung des optimierten Anschlusses

Neben dem Anschluss des Holzrohres am Einlauf bzw. Auslauf der Rohrleitung können auf die gleiche Art Rohrkrümmungen hergestellt werden (Bild 6-12). Der Krümmer aus Stahlbeton muss entsprechend dem vorhandenen Wasserinnendruck bewehrt werden. Die aus den Umlenkräften entstehenden Beanspruchungen des Rohrkrümmers können beispielsweise durch Rückverankerung oder durch Erhöhung des Eigengewichtes in den Untergrund abgeleitet werden.

Der Anschluss einer Druckrohrleitung aus Holz an Stahlarmaturen, Stahlrohre etc. kann in ähnlicher Bauweise erfolgen. Der Übergang von Holz zu Stahl erfolgt mit Hilfe einer Muffenkonstruktion (Bild 6-13).

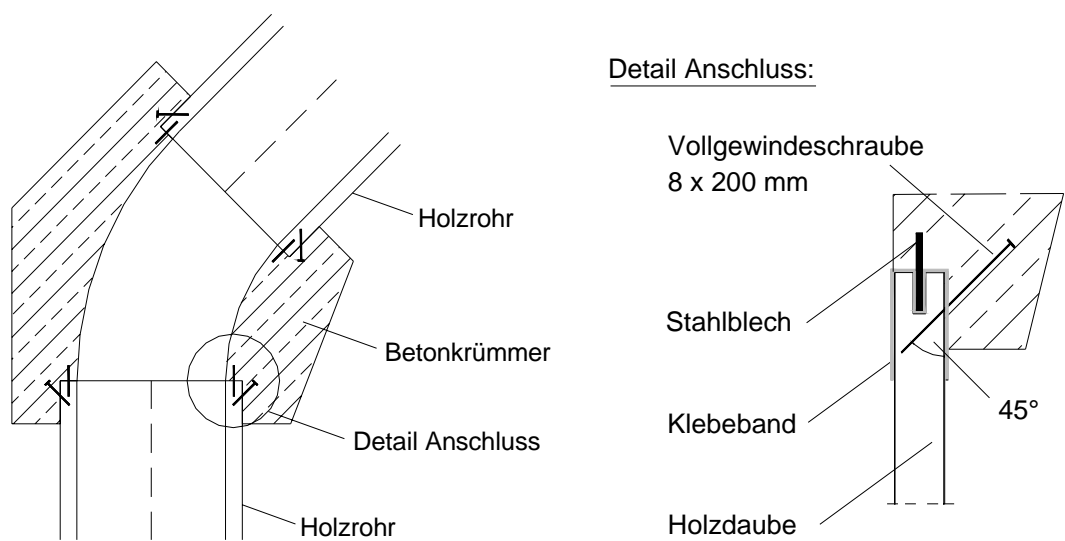


Bild 6-12 Betonkrümmer und Anschlussdetail

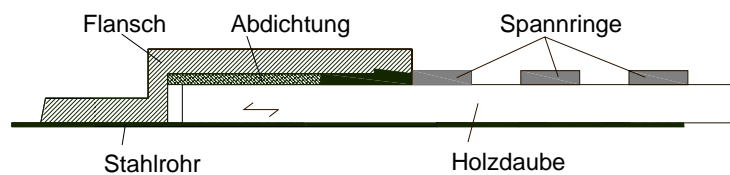


Bild 6-13 Anschluss an Stahlarmaturen bzw. -rohre

7 Experimentelle Untersuchungen von Druckrohrleitungen aus Holz

7.1 Quellverhalten

7.1.1 Versuchsdurchführung

Das Quellverhalten von Druckrohrleitungen aus Holz wurde anhand stehender Rohrabschnitte untersucht (Bild 7-1). Die 2,0 m hohen Rohrabschnitte mit einem Innendurchmesser von 1,40 m wurden aus jeweils 36 Holzdauben (Lärchenholz) der Festigkeitsklasse C24 mit dem Querschnitt $b_D / d_D = 128 / 68$ mm zusammengesetzt. Die Holzdauben wurden mit einer Holzfeuchte von etwa 16 % eingebaut. Der Abstand der Spannringe aus S235 mit einem Querschnitt von $b_R / d_R = 60 / 6$ mm und Spannschloss (aufgeschweißter Gewindebolzen M27 aus S235) betrug 50 cm.

Die durch das Quellen der Holzdauben bei Wasserfüllung der Rohrabschnitte entstehende Beanspruchung der Spannringe wurde mit Hilfe von Dehnmessstreifen bestimmt, die an jeweils zwei Spannringen pro Rohrabschnitt (zweiter und dritter Spannring von oben) in den Viertelpunkten angeordnet waren. Die Spannringe wurden zunächst leicht vorgespannt, um den Zusammenbau zu ermöglichen und die einzelnen Holzdauben hinreichend dicht zusammenzupressen.



Bild 7-1 stehende Rohrabschnitte zur Untersuchung des Quellverhaltens von Druckrohrleitungen aus Holz

Zur Ermittlung des Einflusses des Vorspannungsgrades der Spannringe auf das Quellverhalten von Holzrohren wurde der erste stehende Rohrabschnitt 1 im Mittel mit einer Vorspannkraft von 5 kN pro Spannring, der zweite Rohrabschnitt 2 mit 20 kN pro Spannring vorgespannt. Der Wasserspiegel wurde mittels Pumpen von Versuchsbeginn an konstant auf $H = 2,0$ m gehalten.

7.1.2 Beanspruchung der Spannringe infolge Quellen

In Bild 7-2 ist der Verlauf der Zugkraft in den Spannringen, die durch das Quellen der Holzdauben bei Wasserfüllung der Rohrabschnitte entsteht, dargestellt. Die Kurven sind Mittelwerte der Zugkraft in den Spannringen von Rohrabschnitt 1 (Vorspannung 5 kN) bzw. Rohrabschnitt 2 (Vorspannung 20 kN). Die Zugkräfte in den Spannringen wurden mit Hilfe der gemessenen Dehnungen der Dehnmessstreifen und einem Elastizitätsmodul der Spannringe von $E = 210.000$ N/mm² ermittelt (Querschnittsfläche eines Spannrings: 6 x 60 mm).

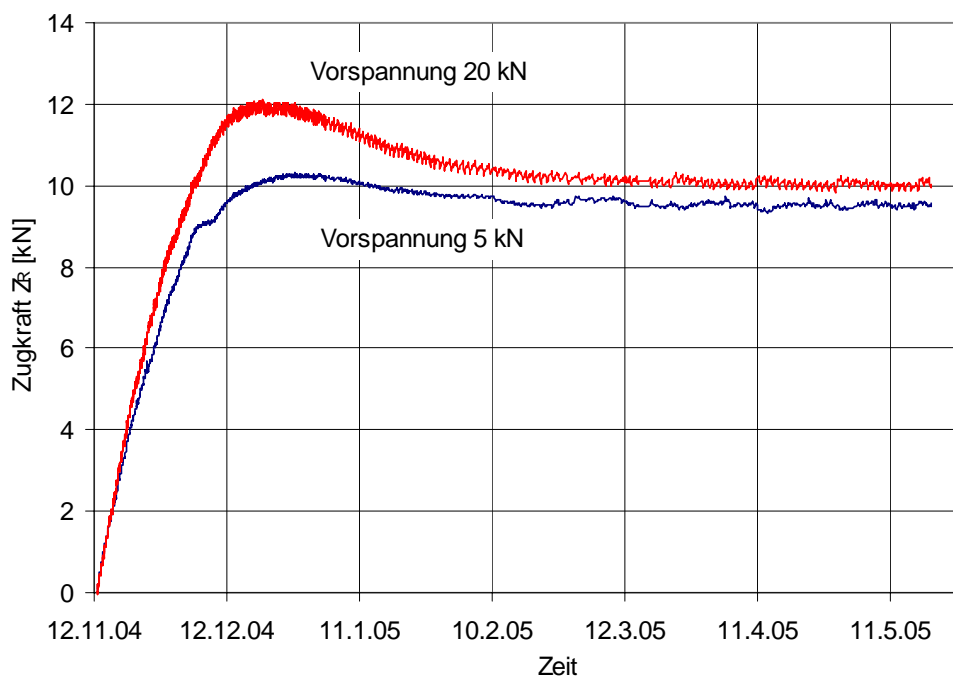


Bild 7-2 Verlauf der Zugkraft in den Spannringen infolge Quellen
(Rohrabschnitt 1: Vorspannung 5 kN; Rohrabschnitt 2: Vorspannung 20 kN)

In Bild 7-2 ist die alleinige Beanspruchung der Spannringe infolge des Quellvorgangs der Holzdauben dargestellt, da bei der Auswertung der Daten die vor Versuchsbeginn aufgebrachte Beanspruchung der Spannringe infolge Vorspannung sowie die aus dem hydrostatischen Wasserdruck resultierende Beanspruchung abgezogen wurde. Die maximale Zugkraft wurde etwa vier bis sechs Wochen nach Versuchsbe-

ginn erreicht. Bei Rohrabschnitt 1 (Vorspannung 5 kN) wurde im Mittel eine maximale Zugkraft $\max Z_R$ infolge des Quellvorgangs von 10,3 kN bestimmt, bei Rohrabschnitt 2 (Vorspannung 20 kN) ein maximaler Wert von 12,1 kN. Anschließend trat eine Reduzierung der Zugkraft in den Spannrings durch Relaxation des Holzes auf. Nach etwa zwei bis drei Monaten erreichte die Zugkraft ein konstantes Niveau, dessen Wert in Tabelle 7-1 mit Z_R angegeben ist. Die zugehörigen Diagramme sind in Anhang D dargestellt.

Tabelle 7-1 Beanspruchung der Spannrings infolge Quellvorgang

($\max Z_R$ = maximale Zugkraft; Z_R = mittlere Zugkraft nach 3 Monaten; $\text{red } Z_R$ = verbleibender Zugkraftanteil nach Relaxation der Holzdauben)

			$\max Z_R$ [kN]	Z_R [kN]	$\text{red } Z_R$ [%]
Rohrabschnitt 1: Vorspannung 5 kN	Spannring 1	DMS 1	10,16	9,21	90,6%
		DMS 2	10,09	9,53	94,4%
		DMS 3	9,95	9,06	91,1%
		DMS 4	9,48	8,46	89,2%
		MW	9,92	9,07	91,3%
	Spannring 2	DMS 5	11,31	10,21	90,3%
		DMS 6	10,39	9,83	94,6%
		DMS 7	10,59	10,14	95,8%
		DMS 8	10,59	9,83	92,8%
		MW	10,72	10,00	93,4%
Rohrabschnitt 2: Vorspannung 20 kN	Spannring 1	DMS 9	12,39	10,60	85,6%
		DMS 10	12,29	10,06	81,9%
		DMS 11	13,27	11,13	83,9%
		DMS 12	12,62	11,10	88,0%
		MW	12,64	10,72	84,8%
	Spannring 2	DMS 13	11,16	9,59	85,9%
		DMS 14	11,65	9,16	78,6%
		DMS 15	11,44	9,43	82,4%
		DMS 16	12,14	9,57	78,8%
		MW	11,60	9,44	81,5%

Im Vergleich zu den Versuchen an kleinen Proben bei behinderter Quellung (Kapitel 5.2) ist die Abnahme des Quellungsdruckes bei den Versuchen mit Rohrabschnitten wesentlich geringer. Bei behinderter Quellung wurde an kleinen Proben aus Lärchenholz eine Reduzierung des Quellungsdruckes infolge Relaxation auf einen Wert zwischen 58 % und 83 % des vorher erreichten Maximalwertes bestimmt (je nach Vorspannungsgrad, Holzfeuchte zu Versuchsbeginn und radialer / tangentialer Ausrichtung der Prüfkörper). Im Vergleich dazu ergab die Auswertung der Messdaten von Rohrabschnitt 1 mit einer Vorspannung von 5 kN im Mittel eine Reduzierung der

Zugkraft in den Spannringen infolge Relaxation des Holzes auf 92,4 % der zuvor erreichten maximalen Zugkraft. Bei Rohrabschnitt 2 mit einer höheren Vorspannung von 20 kN wurde im Mittel eine Abnahme der Spannkraft auf 83,1 % des Maximalwertes bestimmt. Die geringere Reduzierung der Zugkraft bei den Versuchen mit Rohrabschnitten im Vergleich zu den Versuchen in Kapitel 5.2 kann mit der Anordnung der Spannringe sowie der Nut- und Federverbindung der Holzdauben begründet werden: hier liegt im Gegensatz zu den Versuchen bei behinderter Quellung keine vollständige Behinderung vor. Jedoch zeigte sich tendenziell auch bei den Versuchen mit Rohrabschnitten, dass ein zu hoher Vorspannungsgrad negative Auswirkungen hat.

7.2 Trag- und Verformungsverhalten von aufgelagerten Druckrohrleitungen aus Holz

7.2.1 Versuchsdurchführung

Das Trag- und Verformungsverhalten von Druckrohrleitungen aus Holz, die auf Sätteln aufgelagert sind, wurde an einem 10 m langen Abschnitt einer Druckrohrleitung mit einem Innendurchmesser von $d_i = 1,40$ m untersucht (Bild 7-3).

In einem Querschnitt wurden 36 Holzdauben aus Lärchenholz der Festigkeitsklasse C24 mit dem Querschnitt $b_D / d_D = 128 / 68$ mm angeordnet. Die 4,0 m langen Holzdauben wurden jeweils um die Hälfte ihrer Länge gegeneinander versetzt. Der Abstand der Spannringe aus S235 mit einem Querschnitt von $b_R / d_R = 60 / 6$ mm und Spanschluss (aufgeschweißter Gewindebolzen M27 aus S235) betrug 0,50 m. Der Abstand der Sättel aus Beton mit einer Breite von 20 cm entsprach mit 2,0 m der halben Daubenlänge. Die Sättel umschließen die Druckrohrleitung aus Holz im unteren Bereich mit einem Winkel von 90° .

Die Holzdauben wurden mit einer Feuchte von ungefähr 16 % eingebaut. Die Spannringe wurden mit einer Vorspannkraft von 5 kN pro Spannring vorgespannt, um den Zusammenbau zu ermöglichen und die Holzdauben hinreichend dicht zusammenzupressen.

An insgesamt fünf Spannringen im mittleren Feld des Versuchsstandes wurden jeweils in den Viertelpunkten Dehnmessstreifen angeordnet, um die Beanspruchung der Spannringe infolge Vorspannung, Quellen und Wasserinnendruck zu bestimmen. Die Verformungen in Längsrichtung sowie die Querschnittsverformungen der Rohrleitung wurden über fünf Messrahmen, die im mittleren Feld des Versuchsstandes positioniert waren, und induktiven Wegaufnehmern bestimmt. Die Lage der Messrahmen orientierte sich an der Anordnung der Spannringe im Abstand von jeweils 0,50 m.

Der Versuchsaufbau ist in Bild 7-4 dargestellt.



Bild 7-4 Versuchsstand zur Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens von aufgelagerten Druckrohrleitungen aus Holz

Wird dieses System aus Dauben und Stahlringen in regelmäßigen Abständen auf Sattelkonstruktionen aufgelagert, so stellt sich unter den Beanspruchungen Eigengewicht und Wasserlast mit Innendruck ein komplexer Spannungs- und Verformungszustand ein. Das Trag- und Verformungsverhalten wird dabei maßgeblich von der Ovalisierung des Kreisquerschnittes bestimmt: kreisförmige Querschnitte neigen bei Biegebeanspruchung zu ovalen Verformungen, um sich der Belastung zu entziehen.

7.2.2 Beanspruchung der Spannringe

Zur Erläuterung der Versuchsergebnisse werden exemplarisch in Bild 7-5 die vorhandene Zugkraft an vier Messstellen (DMS 17 - 20) von Spannring 5 und der Wasserdruck über die gesamte Versuchsdauer dargestellt. Der Verlauf der Zugkraft wird anhand der Auswertung der Versuchsergebnisse des Dehnmessstreifens DMS 20 beschrieben. Die Diagramme der Versuchsergebnisse der Spannringe 1 bis 4 sind in Anhang E dargestellt.

In Bild 7-5 sind im Verlauf der Zugkraft von DMS 20 die Punkte A bis F markiert. Diese Punkte dienen zur genauen Erläuterung der Versuchsdurchführung:

- Zeitpunkt A: Vorspannung der Spannringe
- Zeitpunkt B: Wasserfüllung der Rohrleitung (ohne Innendruck)
- Zeitpunkt C: Wasserinnendruck = 1,1 bar
- Zeitpunkt D: Erreichen der maximalen Zugkraft im Spannring während des Quellvorgangs
- Zeitpunkt E: Relaxation auf ein konstantes Niveau der Zugkraft im Spannring
- Zeitpunkt F: Wasserinnendruck = 1,5 bar

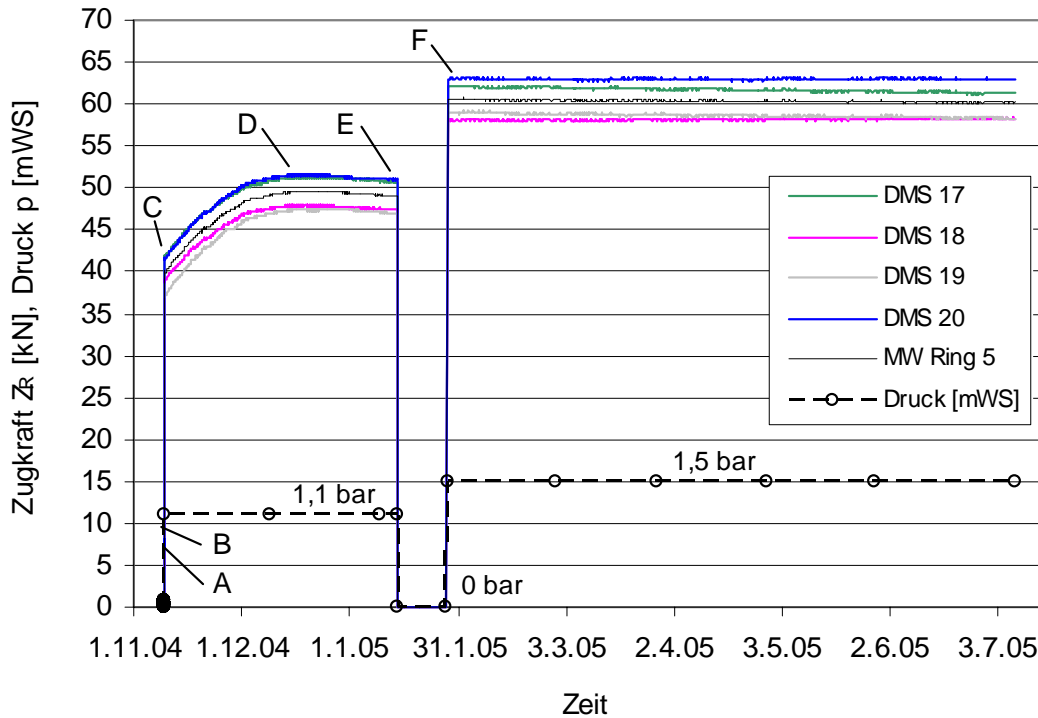


Bild 7-5 Zugkraft in Spannring 5 (DMS 17 - 20) und Wasserdruck

Vor Beginn der experimentellen Untersuchungen war zum Zeitpunkt C ursprünglich ein Wasserinnendruck von 1,5 bar geplant. Aufgrund von Undichtigkeiten am Anschluss der Druckrohrleitung aus Holz an die Endauflager aus Beton konnte zu Versuchsbeginn mit den vorhandenen Pumpen lediglich ein Wasserinnendruck von 1,1 bar erreicht werden. Zur genauen Erfassung der während des Quellvorgangs entstehenden Zugkräfte in den Spannringen wurden die Undichtigkeiten erst nach Abschluss von Quellen und Relaxation der Holzdauben (Zeitpunkt E) ausgebessert. Für diesen Zeitpunkt wurde eine prozentuale Änderung der Zugkraft in den Spannringen kleiner als 0,1 % / Tag definiert und somit ein relativ konstantes Niveau der Zugkraft gewährleistet. Für die Verbesserungsmaßnahmen am Anschluss der Druckrohrleitung an die Endauflager musste die Rohrleitung entleert werden; deshalb wurde die Datenaufnahme im Zeitraum vom 14.01.05 bis 28.01.05 unterbrochen. Die Rohrleitung wurde auch während der Entleerung durchgehend befeuchtet, um ein Schwinden der Holzdauben zu vermeiden. Anschließend konnte zum Zeitpunkt F ein Wasserinnendruck von 1,5 bar aufgebracht werden. Die Undichtigkeiten am Übergang von Holzrohr zu Beton waren Anlass zu einem weiteren Versuch, bei dem ein optimierter Anschluss geprüft wurde (Kapitel 6.4).

In Tabelle 7-2 sind die Beanspruchungen der Spannringe 1 bis 5 zu den Zeitpunkten A bis F zusammengefasst.

Tabelle 7-2 Beanspruchung der Spannringe zu den Zeitpunkten A bis F

Zeitpunkt	Zugkraft Z_R [kN]						Änderung der Zugkraft ΔZ_R [kN]					
	A	B	C	D	E	F	B - A	C - B	D - C	E - D	F - E	
Zeit nach Versuchsbeginn	0,5 h	6,9 h	7,0 h	~ 5 Wochen	~ 2 Monate	> 3 Monate	-	-	-	-	-	
Innendruck p [bar]	0 bar (Vorspannung)	0 bar (Wasserfüllung)	1,1 bar	1,1 bar (Quellvorgang)	1,1 bar (Relaxation)	1,5 bar	infolge Wasserfüllung	infolge $p=0-1,1$ bar	infolge Quellvorgang	infolge Relaxation	infolge $p=1,1-1,5$ bar	
Spannung 1 ($\beta = 305^\circ$)	DMS 1 ($\alpha = +45^\circ$)	7,09	8,93	42,58	51,56	50,97	62,32	1,83	33,66	8,98	-0,60	11,36
	DMS 2 ($\alpha = +95^\circ$)	4,92	6,63	40,03	49,28	48,93	59,50	1,71	33,40	9,25	-0,35	10,58
	DMS 3 ($\alpha = +160^\circ$)	2,63	4,67	36,80	47,76	47,22	58,21	2,03	32,14	10,95	-0,54	10,99
	DMS 4 ($\alpha = -70^\circ$)	5,18	7,39	40,30	50,13	49,51	61,22	2,21	32,91	9,83	-0,62	11,71
Spannung 2 ($\beta = 55^\circ$)	DMS 5 ($\alpha = -45^\circ$)	7,80	9,62	43,35	52,37	51,63	63,41	1,83	33,73	9,02	-0,75	11,79
	DMS 6 ($\alpha = +75^\circ$)	6,10	8,62	41,99	51,30	51,01	62,19	2,51	33,37	9,31	-0,29	11,18
	DMS 7 ($\alpha = +175^\circ$)	2,65	5,02	39,24	48,28	47,56	59,59	2,37	34,23	9,04	-0,72	12,03
Spannung 3 ($\beta = 150^\circ$)	DMS 8 ($\alpha = -100^\circ$)	4,34	6,32	39,80	49,87	49,19	61,16	1,98	33,47	10,08	-0,69	11,98
	DMS 9 ($\alpha = -50^\circ$)	7,32	9,95	44,38	53,69	52,93	65,91	2,63	34,43	9,31	-0,76	12,98
	DMS 10 ($\alpha = +80^\circ$)	5,39	8,16	42,03	50,99	50,25	62,71	2,78	33,87	8,96	-0,73	12,46
	DMS 11 ($\alpha = +165^\circ$)	3,28	5,45	40,80	50,70	50,12	62,34	2,16	35,36	9,89	-0,58	12,22
Spannung 4 ($\beta = 220^\circ$)	DMS 12 ($\alpha = -105^\circ$)	5,46	7,73	42,47	51,56	50,82	63,26	2,27	34,74	9,08	-0,74	12,44
	DMS 13 ($\alpha = +55^\circ$)	7,18	9,38	42,82	52,77	52,27	63,67	2,21	33,44	9,95	-0,50	11,40
	DMS 14 ($\alpha = +90^\circ$)	5,01	7,00	40,55	50,26	49,70	61,78	1,99	33,55	9,71	-0,56	12,09
Spannung 5 ($\beta = 300^\circ$)	DMS 15 ($\alpha = +175^\circ$)	2,69	4,77	37,63	47,44	47,00	59,20	2,08	32,86	9,81	-0,44	12,20
	DMS 16 ($\alpha = -95^\circ$)	5,37	7,90	41,54	51,56	50,96	62,03	2,53	33,64	10,02	-0,60	11,07
Spannung 5 ($\beta = 300^\circ$)	DMS 17 ($\alpha = +50^\circ$)	7,18	8,91	41,87	51,46	50,77	61,69	1,73	32,96	9,58	-0,69	10,92
	DMS 18 ($\alpha = +100^\circ$)	4,46	6,34	39,05	47,96	47,50	58,15	1,88	32,71	8,91	-0,46	10,64
	DMS 19 ($\alpha = +175^\circ$)	2,22	4,40	38,36	47,52	47,06	58,63	2,18	33,96	9,17	-0,46	11,57
	DMS 20 ($\alpha = -65^\circ$)	6,25	8,34	41,45	51,63	51,04	62,98	2,09	33,11	10,18	-0,58	11,93

In Tabelle 7-2 kennzeichnet der Winkel β die Lage des Spannschlusses (ausgehend von der obersten Holzdaube im mathematisch negativen Drehsinn) und der Winkel α die Anordnung der vier Dehnmessstreifen pro Spannring (ausgehend vom Spannschloss im mathematisch negativen Drehsinn).

Bei einem Wasserinnendruck von 1,1 bar wurde etwa fünf Wochen nach Versuchsbeginn (Zeitpunkt D) ein Maximum der Zugkraft erreicht. Anschließend trat eine Reduzierung der Zugkraft in den Spannringen durch Relaxation des Holzes auf. Nach etwa zwei Monaten (Zeitpunkt E) erreichte die Zugkraft ein konstantes Niveau. Die Zugkraft bei einem Wasserinnendruck von 1,5 bar war für den Zeitraum ab drei Monaten nach Versuchsbeginn bis Versuchsende konstant. In den folgenden Abschnitten werden Versuchsdurchführung und Auswertung der Messdaten erläutert.

Die zum Zeitpunkt A aufgebrachte Vorspannung wurde aufgrund der Versuchsergebnisse aus Kapitel 7.1 mit 5 kN pro Spannring (Mittelwert) gewählt. Die Vorspannung ist nicht konstant über den Spannring verteilt. Die Zugkraft im Spannring ist am Spannschloss ($\alpha = 0^\circ$) maximal und nimmt ausgehend vom Spannschloss mit zunehmendem Winkel α ab (Bild 7-6). Bei einem Winkel von $\alpha = 180^\circ$ ist die Zugkraft im Spannring infolge Vorspannung minimal. Dieser Effekt kann theoretisch mit Gleichung (13) beschrieben werden.

$$Z_{R,V1} = Z_{R,V2} \cdot e^{\mu \cdot \alpha} \quad \text{mit } \alpha \leq \pi \quad (13)$$

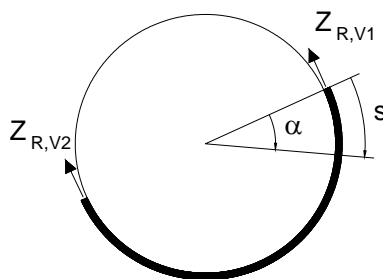


Bild 7-6 Verlauf der Zugkraft im Spannring infolge Vorspannung

Die experimentell ermittelten Werte der Zugkraft in den Spannringen infolge Vorspannung sind in Tabelle 7-2 angegeben und liegen zwischen 2,2 und 7,8 kN (Mittelwert 5,1 kN). In Bild 7-7 werden diese Werte den nach Gleichung (13) ermittelten theoretischen Werten der Zugkraft in den Spannringen infolge Vorspannung in Abhängigkeit vom Winkel α gegenübergestellt. Der Haftungskoeffizient μ_H wurde nach Möhler und Herröder (1979) mit einem Wert von 0,5 für die Baustoffkombination Stahl / Holz angenommen. Die experimentell ermittelten Werte zeigen eine gute Übereinstimmung mit den theoretisch bestimmten Werten.

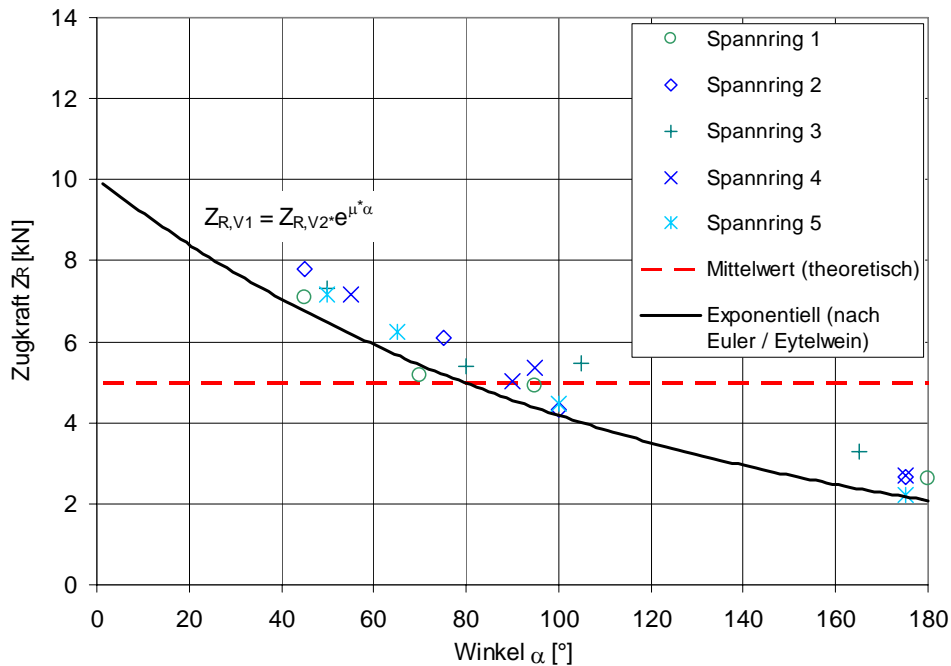


Bild 7-7 experimentell und theoretisch ermittelte Werte der Zugkraft im Spannring infolge Vorspannung

Die Zunahme der Zugkraft in den Spannringen infolge Wasserfüllung der Rohrleitung zum Zeitpunkt B beträgt nach Tabelle 7-2 zwischen 1,7 und 2,8 kN (Mittelwert 2,2 kN) und ist aufgrund der hydrostatischen Druckverteilung im oberen Bereich der Druckrohrleitung geringer als im unteren Bereich.

Der Wasserinnendruck von 1,1 bar zum Zeitpunkt C verursacht eine Zunahme der Zugkraft in den Spannringen zwischen 32,1 und 35,4 kN (Mittelwert 33,6 kN) (vgl. Tabelle 7-2). Die maximale Beanspruchung der Spannringe tritt in Feldmitte (Ring 3) zwischen zwei Auflagern auf. Theoretisch berechnet sich die Ringzugkraft infolge Wasserinnendruck im Rohr nach Gleichung (14) (Kesselformel):

$$Z_R = \frac{p \cdot d_i}{2} \cdot e_R = \frac{\rho_W \cdot g \cdot H_0 \cdot d_i}{2} \cdot e_R \quad (14)$$

Nach Gleichung (14) ergibt sich für einen Wasserinnendruck von 1,1 bar eine Ringzugkraft von 37,8 kN. Dieser Wert liegt geringfügig über den experimentell ermittelten Werten zwischen 32,1 und 35,4 kN.

Während des Quellvorgangs erreichte die Zugkraft in den Spannringen etwa fünf Wochen nach Versuchsbeginn zum Zeitpunkt D ein Maximum. Nach Tabelle 7-2 beträgt die Zunahme der Zugkraft in den Spannringen infolge des Quellvorgangs zwischen 8,9 und 11,0 kN (Mittelwert 9,6 kN). Im Vergleich hierzu wurden bei den Versuchen in Kapitel 7.1 bei Rohrabschnitt 1 mit einer Vorspannung von 5 kN Werte

zwischen 9,5 und 11,3 kN (Mittelwert 10,3 kN) bestimmt. Die in Tabelle 7-2 angegebenen Werte sind geringer, da zum Zeitpunkt D bereits ein Wasserinnendruck von 1,1 bar in der Rohrleitung aufgebracht war und somit eine Aufweitung des Rohrquerschnittes eine geringere Zunahme der Zugkraft in den Spannringsen infolge des Quellvorgangs zur Folge hatte als bei den Versuchen in Kapitel 7.1 ohne Wasserinnendruck.

Während des Quellvorgangs der einzelnen Holzdauben wurden die anfangs auftretenden Wasserverluste (Bild 7-8) zunehmend minimiert. Die Rohrleitung war etwa zwei bis vier Wochen nach Versuchsbeginn relativ dicht.



Bild 7-8 Versuchsstand zwei Wochen nach Versuchsbeginn

Nach Erreichen eines Maximums trat anschließend eine Reduzierung der Zugkraft in den Spannringsen durch Relaxation der Holzdauben auf. Die Abnahme der Zugkraft in den Spannringsen infolge Relaxation beträgt nach Tabelle 7-2 zwischen 0,3 und 0,8 kN (Mittelwert 0,6 kN). Nach etwa zwei Monaten erreichte die Zugkraft ein konstantes Niveau (Zeitpunkt E). Die nach der Relaxation vorhandene Zugkraft in den Spannringsen beträgt im Mittel 93,9 % der infolge des Quellvorgangs aufgetretenen maximalen Zugkraft. Dies entspricht ungefähr den Versuchsergebnissen von Rohrabschnitt 1 mit einer Vorspannung von 5 kN in Kapitel 7.1; hier ergab sich eine Reduzierung der Zugkraft in den Spannringsen infolge Relaxation des Holzes auf 92,4 % der zuvor erreichten maximalen Zugkraft.

Eine Druckerhöhung auf 1,5 bar zum Zeitpunkt F hatte eine Zunahme der Zugkraft in den Spannringsen zwischen 10,6 und 13,0 kN (Mittelwert 11,7 kN) zur Folge (Tabelle 7-2). Dieses Niveau der Zugkraft war bis zur Beendigung der Messdatenerfassung konstant.

7.2.3 Verformung in Längsrichtung und Querschnittsverformung

Neben der Bestimmung der Zugkraft in den Spannrings wurden die Verformungen der Druckrohrleitung in Längsrichtung und die Querschnittsverformungen bestimmt (Bild 7-9). Hierzu wurden fünf Messrahmen im mittleren Feld des Versuchsstandes aufgebaut. Die Position der Messrahmen orientierte sich an der Lage der Spannrings. Die Verformungen wurden mit induktiven Wegaufnehmern ermittelt.

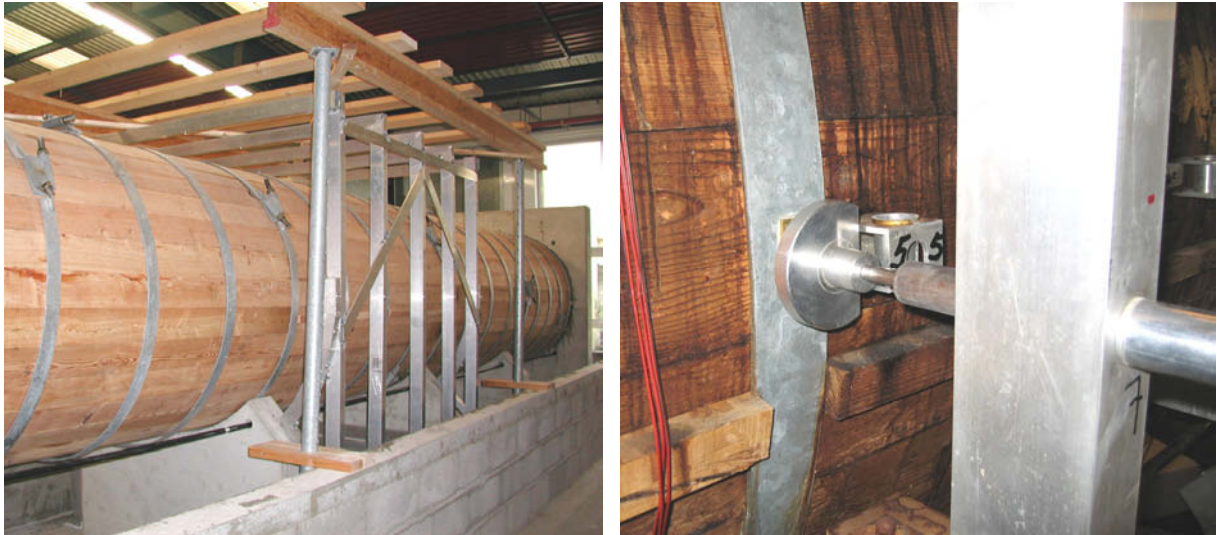


Bild 7-9 Messrahmen und Wegaufnehmer zur Bestimmung der Verformungen

Tabelle 7-3 enthält die Verformungen am Auflager (Mittelwerte von Spannring 1 und Spannring 5) sowie in Feldmitte (Spannring 3). Die Werte in der Tabelle beziehen sich auf Verformungen bei Wasserfüllung (Zeitpunkt B) sowie bei einem Wasserinnendruck von 1,1 bar (Zeitpunkt E) und 1,5 bar (Zeitpunkt F). Die Position der Punkte a bis c ist in Bild 7-10 angegeben.

Tabelle 7-3 experimentell bestimmte Verformungen

Verformungen [cm]		Punkt a		Punkt b		Punkt c	
		u_x	u_y	u_x	u_y	u_x	u_y
Wasserfüllung Zeitpunkt B	Auflager (MW Ring 1,5)	-	-2,41	0,80	-0,43	-	0,00
	Feldmitte (Ring 3)	-	-2,34	0,73	-0,44	-	-0,28
1,1 bar Zeitpunkt E	Auflager (MW Ring 1,5)	-	-2,18	0,99	-0,42	-	0,00
	Feldmitte (Ring 3)	-	-2,14	0,94	-0,43	-	-0,34
1,5 bar Zeitpunkt F	Auflager (MW Ring 1,5)	-	-1,99	1,06	-0,40	-	0,00
	Feldmitte (Ring 3)	-	-1,95	1,02	-0,41	-	-0,36

Unter den Beanspruchungen Eigengewicht und Wasserlast mit Innendruck wird das Verformungsverhalten des Querschnittes maßgeblich von der Ovalisierung bestimmt, da kreisförmige Querschnitte dazu neigen, sich unter Biegebeanspruchung oval zu verformen. In Bild 7-10 sind überhöht die Querschnittsverformungen am Auflager und in Feldmitte dargestellt. Die linke Hälfte des Querschnittes entspricht jeweils der Verformung bei einem Wasserinnendruck von 1,1 bar, die rechte Hälfte des Querschnittes zeigt zum Vergleich die Verformung bei einem Wasserinnendruck von 1,5 bar.

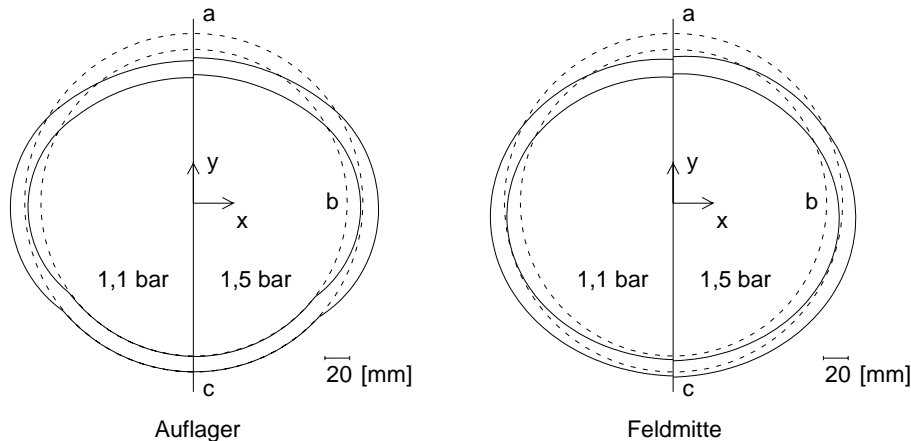


Bild 7-10 Querschnittsverformungen (vierfach überhöht)

Bei steigendem Wasserinnendruck nehmen die Verformung der mittleren Holzdaube im Punkt b in x-Richtung sowie die Durchbiegung der Rohrleitung an der Sohle (Punkt c) in Feldmitte aufgrund der Rohraufweitung zu. Die Durchbiegung der Rohrleitung am Scheitel (Punkt a) nimmt mit steigendem Wasserinnendruck ab. Die Differenz der Durchbiegung zwischen Auflager und Feldmitte ist im Punkt a deutlich kleiner als im Punkt c.

7.2.4 Einfluss des Auflagerabstandes

Nach Abschluss der oben beschriebenen Messungen wurde am gleichen Versuchsstand zusätzlich der Einfluss des Auflagerabstandes auf das Trag- und Verformungsverhalten von Druckrohrleitungen aus Holz untersucht. Durch Entfernen jedes zweiten Auflagers wurde der ursprüngliche Auflagerabstand von 2 m auf 4 m verdoppelt. Der Auflagerabstand von 4 m entsprach somit der Daubenlänge im Versuchsstand. Der Wasserinnendruck betrug bei beiden Messungen 1,5 bar.

In Tabelle 7-4 ist zum Vergleich die Beanspruchung der Spannrings bei einem Auflagerabstand von 2 m und 4 m zusammengefasst. Bei einem vergrößerten Auflagerabstand nehmen die Verformungen in Längsrichtung sowie die Querschnittsverformungen zu. Demzufolge steigt auch die Zugbeanspruchung der Spannrings leicht an. Die maximale Änderung der Zugkraft in den Spannrings beträgt 4 %.

In Tabelle 7-5 sind die Verformungen am Auflager und in Feldmitte bei einem Auflagerabstand von 2 m und 4 m zusammengefasst. Die Verformung der obersten Holzdaube steigt bei einem Auflagerabstand von 4 m um 38 % im Auflagerquerschnitt, während die Verformung der untersten Holzdaube in Feldmitte um 25 % zunimmt.

Tabelle 7-4 Einfluss des Auflagerabstandes auf die Zugkraft in den Spannringen

Zugkraft Z_R [kN] (Wasserinnendruck 1,5 bar)		$e_s = 2$ m	$e_s = 4$ m	Vergleich $Z_R(e_s=4m) / Z_R(e_s=2m)$
Spannring 1 ($\beta = 305^\circ$)	DMS 1 ($\alpha = +45^\circ$)	62,32	61,08	98%
	DMS 2 ($\alpha = +95^\circ$)	59,50	60,81	102%
	DMS 3 ($\alpha = +180^\circ$)	58,21	59,96	103%
	DMS 4 ($\alpha = -70^\circ$)	61,22	63,67	104%
Spannring 2 ($\beta = 55^\circ$)	DMS 5 ($\alpha = -45^\circ$)	63,41	64,05	101%
	DMS 6 ($\alpha = +75^\circ$)	62,19	64,06	103%
	DMS 7 ($\alpha = +175^\circ$)	59,59	61,38	103%
	DMS 8 ($\alpha = -100^\circ$)	61,16	62,57	102%
Spannring 3 ($\beta = 150^\circ$)	DMS 9 ($\alpha = -50^\circ$)	65,91	66,57	101%
	DMS 10 ($\alpha = +80^\circ$)	62,71	63,97	102%
	DMS 11 ($\alpha = +165^\circ$)	62,34	64,21	103%
	DMS 12 ($\alpha = -105^\circ$)	63,26	64,58	102%
Spannring 4 ($\beta = 220^\circ$)	DMS 13 ($\alpha = +55^\circ$)	63,67	65,71	103%
	DMS 14 ($\alpha = +90^\circ$)	61,78	63,02	102%
	DMS 15 ($\alpha = +175^\circ$)	59,20	60,79	103%
	DMS 16 ($\alpha = -95^\circ$)	62,03	62,65	101%
Spannring 5 ($\beta = 300^\circ$)	DMS 17 ($\alpha = +50^\circ$)	61,69	61,32	99%
	DMS 18 ($\alpha = +100^\circ$)	58,15	58,90	101%
	DMS 19 ($\alpha = +175^\circ$)	58,63	59,80	102%
	DMS 20 ($\alpha = -65^\circ$)	62,98	64,43	102%

Tabelle 7-5 Einfluss des Auflagerabstandes auf die Verformungen

Verformungen [cm] (Wasserinnendruck 1,5 bar)		Punkt a		Punkt b		Punkt c	
		u_x	u_y	u_x	u_y	u_x	u_y
Auflagerabstand $e_s = 2$ m	Auflager (MW Ring 1,5)	-	-1,99	1,06	-0,40	-	0,00
	Feldmitte (Ring 3)	-	-1,95	1,02	-0,41	-	-0,36
Auflagerabstand $e_s = 4$ m	Auflager (MW Ring 1,5)	-	-2,75	1,38	-0,48	-	0,00
	Feldmitte (Ring 3)	-	-2,68	1,24	-0,48	-	-0,45
Vergleich $u(e_s=4m) / u(e_s=2m)$	Auflager (MW Ring 1,5)	-	138%	130%	119%	-	100%
	Feldmitte (Ring 3)	-	137%	121%	115%	-	125%

8 Berechnungsansatz für die Lastfälle Quellen und Vorspannung

8.1 Theoretische Untersuchung

Mit dem theoretischen Berechnungsansatz können die Beanspruchungen und Verformungen der Spannringe und Holzdauben für die Lastfälle Quellen und Vorspannung bestimmt werden. Zusätzlich können die Ergebnisse der Finite-Elemente-Modellierung (vgl. Kapitel 9) für die Lastfälle Quellen und Vorspannung mit dem Berechnungsansatz überprüft werden. Hierzu werden folgende Annahmen getroffen:

- Spannung in den Stahlringen ist über die Querschnittsfläche konstant;
- Spannung in den Holzdauben ist über die Daubendicke konstant;
- Verformungsberechnungen erfolgen jeweils in den Mittelflächen der Holzdauben und der Spannringe (Bild 8-1);
- Eigengewicht und Wasserinnendruck werden nicht berücksichtigt;
- beim Lastfall Quellen wird lediglich das Quellen in Umfangsrichtung berücksichtigt;
- gleichmäßige Feuchteverteilung in den Holzdauben.

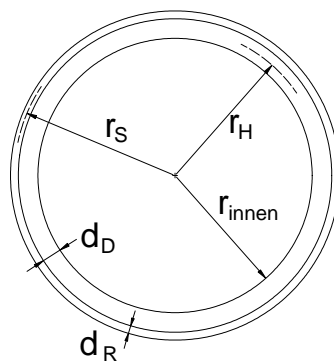


Bild 8-1 Definition der mittleren Radien r_H und r_S

Zunächst wird der Rohrquerschnitt an der Stelle eines Spannrings betrachtet und ein spannungsfreier Ausgangszustand angenommen. Dieser Zustand wird durch die beiden Radien r_H und r_S beschrieben. Die Dehnungen der Materialien in Umfangsrichtung werden über die Änderung der Radien nach Gleichung (15) formuliert.

$$\varepsilon_U = \frac{\Delta U}{U_1} = \frac{U_2 - U_1}{U_1} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_2 - 2 \cdot \pi \cdot r_1}{2 \cdot \pi \cdot r_1} = \frac{r_2 - r_1}{r_1} = \frac{\Delta r}{r_1} = \varepsilon_r \quad (15)$$

Da beim theoretischen Berechnungsansatz die Lastfälle Wasserinnendruck und Eigengewicht nicht berücksichtigt werden, stellt die Querdruckbeanspruchung der Holzdauben in Umfangsrichtung die einzige Belastung der Dauben dar. Für die ein-

zelenen Holzdauben werden die tangential wirkenden Anteile dieser Druckspannungen nach Bild 8-2 zu einer radialen Streckenlast $q(x)$ zusammengefasst (Gleichung (16)). Das Flächenträgheitsmoment der einzelnen Holzdauben um die zum Rohrquerschnitt tangential verlaufende Achse wird näherungsweise nicht am trapezförmigen Daubenquerschnitt ermittelt, sondern vereinfacht an einem Rechteckquerschnitt gleicher Höhe und gleichen Flächeninhalts.

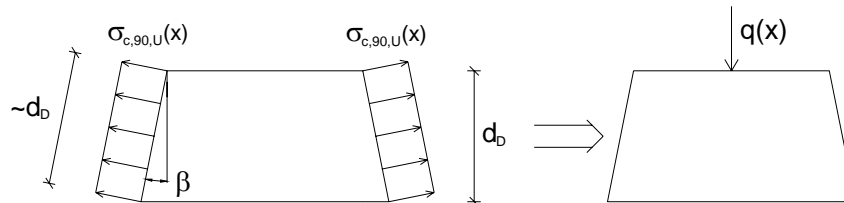


Bild 8-2 Querdrukbeanspruchung der Holzdauben infolge Quellen

$$q(x) = -2 \cdot \sigma_{c,90,U}(x) \cdot \sin\beta \cdot d_b \quad (16)$$

Für den Lastfall Quellen ergibt sich das in Bild 8-3 dargestellte Verformungsverhalten der Rohrleitung. Durch das Quellen der Holzdauben erfolgt sowohl eine Dehnung der Dauben als auch der Spannringe. Dies wird beim theoretischen Berechnungsansatz durch eine Quelldehnung ε_Q berücksichtigt. Zur Bestimmung der Verformungen zwischen den Spannringen werden die einzelnen Holzdauben als Mehrfeldträger mit den Spannringen als Auflager betrachtet. Die Stahlringe weiten sich um Δr_S auf; dies entspricht bei der Betrachtung des Mehrfeldträgers einer Auflagersenkung. Die größere Aufweitung des Holzrohres zwischen den Spannringen kann als Durchbiegung $w(x)$ des Mehrfeldträgers zwischen den Auflagern betrachtet werden.

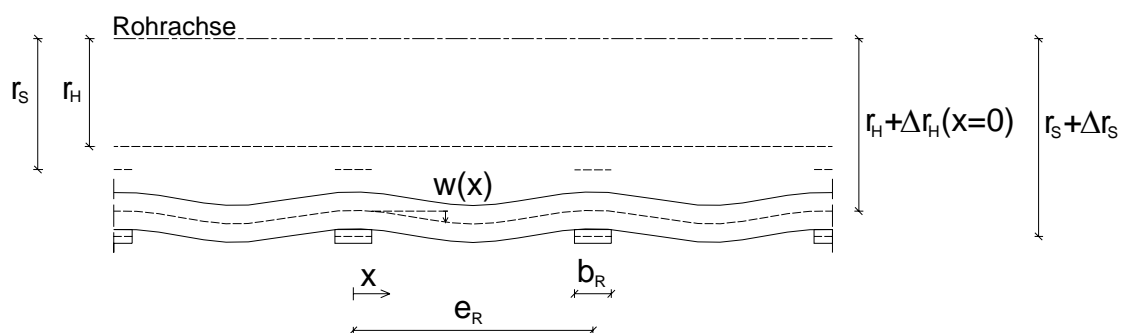


Bild 8-3 Verformungsverhalten beim Lastfall Quellen

Während beim Quellen eine Volumenausdehnung der Holzdauben stattfindet, führt beim Lastfall Vorspannung eine „Verkürzung“ der Stahlringe zu Verformungen in der Rohrkonstruktion. Dies wird durch eine negative Vorspanndehnung ε_{VS} berücksich-

tigt. Beim theoretischen Berechnungsansatz wird die Verteilung der Vorspannkraft über den Spannring als konstant angenommen. Bei der Betrachtung der einzelnen Holzdauben als Biegeträger beim Lastfall Vorspannung ändert sich im Vergleich zum Lastfall Quellen nur die Richtung der Auflagerverschiebung (Bild 8-4).

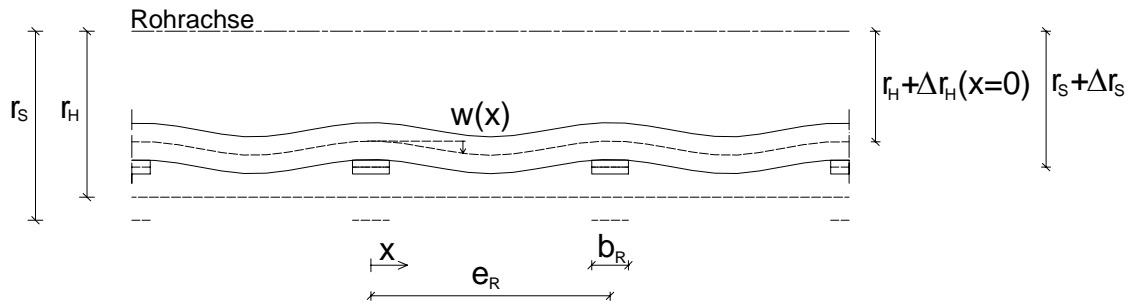


Bild 8-4 Verformungsverhalten beim Lastfall Vorspannung

Die Zugspannung im Stahlring σ_S steht im Gleichgewicht mit der über die Wanddicke konstanten Querdruckspannung der Holzdauben in Umfangsrichtung $\sigma_{c,90,U}$. Mit Hilfe des Elastizitätsgesetzes kann die Dehnung und somit die Aufweitung der Stahlringe bestimmt werden.

$$\sigma_S \cdot b_R \cdot d_R + d_D \cdot \int_{x=0}^{e_R} \sigma_{c,90,U}(x) dx = 0 \quad (17)$$

$$\rightarrow \sigma_S = -\frac{d_D}{b_R \cdot d_R} \cdot \int_{x=0}^{e_R} \sigma_{c,90,U}(x) dx \quad (18)$$

$$\rightarrow \varepsilon_S = \varepsilon_{VS} + \frac{\sigma_S}{E_S} = \varepsilon_{VS} - \frac{d_D}{b_R \cdot d_R \cdot E_S} \cdot \int_{x=0}^{e_R} \sigma_{c,90,U}(x) dx \quad (19)$$

$$\rightarrow \Delta r_S = \varepsilon_S \cdot r_S = \varepsilon_{VS} \cdot r_S - \frac{d_D \cdot r_S}{b_R \cdot d_R \cdot E_S} \cdot \int_{x=0}^{e_R} \sigma_{c,90,U}(x) dx \quad (20)$$

Unter Vernachlässigung von Querdehnungen der Holzdauben bzw. der Spannringe ist die Aufweitung des Holzrohres Δr_H an der Stelle eines Spannringes gleich der Aufweitung des Spannringes Δr_S (Gleichung (21)).

$$\Delta r_H(x=0) = \Delta r_S = \varepsilon_{VS} \cdot r_S - \frac{d_D \cdot r_S}{b_R \cdot d_R \cdot E_S} \cdot \int_{x=0}^{e_R} \sigma_{c,90,U}(x) dx \quad (21)$$

Die Dehnung des Holzrohres an der Stelle x wird mit Hilfe der Auflagerverschiebung $\Delta r_H (x=0)$ an der Stelle eines Spannringses und der Durchbiegung der Holzdaube zwischen den Spannringsen $w(x)$ beschrieben (Gleichung (22)).

$$\varepsilon_H(x) = \frac{\Delta r_H(x=0) + w(x)}{r_H} = \varepsilon_{VS} \cdot \frac{r_S}{r_H} - \frac{d_D \cdot r_S}{b_R \cdot d_R \cdot r_H \cdot E_S} \cdot \int_{x=0}^{e_R} \sigma_{c,90,U}(x) dx + \frac{w(x)}{r_H} \quad (22)$$

Beim Ansatz mit Hilfe des Stoffgesetzes wird die Dehnung des Holzrohres in Abhängigkeit von der Quelldehnung, der Querdruckspannung der Holzdauben in Umfangsrichtung und des Elastizitätsmoduls der Holzdauben rechtwinklig zur Faserrichtung bestimmt (Gleichung (23)).

$$\varepsilon_H(x) = \varepsilon_Q + \frac{\sigma_{c,90,U}(x)}{E_{90}} \quad (23)$$

Aus Gleichung (22) und (23) kann die Querdruckspannung der Holzdauben in Umfangsrichtung bestimmt werden (Gleichung (24)).

$$\sigma_{c,90,U}(x) = \left(\frac{\Delta r_H(x=0) + w(x)}{r_H} - \varepsilon_Q \right) \cdot E_{90} \quad (24)$$

Durch Einsetzen der Aufweitung des Holzrohres an der Stelle eines Spannringses $\Delta r_H (x=0)$ in Gleichung (24) ergibt sich:

$$\sigma_{c,90,U}(x) = \varepsilon_{VS} \cdot \frac{r_S}{r_H} \cdot E_{90} - \frac{d_D}{b_R \cdot d_R} \cdot \frac{r_S}{r_H} \cdot \frac{E_{90}}{E_S} \cdot \int_{x=0}^{e_R} \sigma_{c,90,U}(x) dx - \varepsilon_Q \cdot E_{90} + \frac{w(x)}{r_H} \cdot E_{90} \quad (25)$$

Die Differentialgleichung der Biegelinie für die Lastfälle Quellen und Vorspannung lautet somit:

$$w^{IV}(x) = \frac{1}{EI} \cdot q(x) = -\frac{2}{EI} \cdot \sin\beta \cdot \sigma_{c,90,U}(x) \cdot d_D \quad (26)$$

$$= \frac{2}{EI} \cdot \sin\beta \cdot d_D \cdot \left(-\varepsilon_{VS} \cdot \frac{r_S}{r_H} \cdot E_{90} + \varepsilon_Q \cdot E_{90} + \frac{d_D}{b_R \cdot d_R} \cdot \frac{r_S}{r_H} \cdot \frac{E_{90}}{E_S} \cdot \int_{x=0}^{e_R} \sigma_{c,90,U}(x) dx - \frac{w(x)}{r_H} \cdot E_{90} \right) \quad (27)$$

Das in Gleichung (27) enthaltene Integral kann mit Hilfe von Gleichung (26) wie folgt vereinfacht werden:

$$\sigma_{c,90,U}(x) = -\frac{EI}{2 \cdot \sin\beta \cdot d_D} \cdot w^{IV}(x) \quad (28)$$

$$\rightarrow \int_{x=0}^{e_R} \sigma_{c,90,U}(x) dx = -\frac{EI}{2 \cdot \sin\beta \cdot d_D} \cdot \int_{x=0}^{e_R} w^{IV}(x) dx \quad (29)$$

$$= -\frac{EI}{2 \cdot \sin\beta \cdot d_D} \cdot w^{III}(x) \Big|_{x=0}^{e_R} \quad (30)$$

$$= -\frac{EI}{2 \cdot \sin\beta \cdot d_D} \cdot (w^{III}(e_R) - w^{III}(0)) \quad (31)$$

Aufgrund der Symmetrie der Biegelinie zur Achse $x = e_R / 2$ gilt:

$$w^{III}(e_R) = -w^{III}(0) \quad (32)$$

Aus Gleichung (32) folgt:

$$\int_{x=0}^{e_R} \sigma_{c,90,U}(x) dx = -\frac{EI}{2 \cdot \sin\beta \cdot d_D} \cdot (-w^{III}(0) - w^{III}(0)) = \frac{EI}{\sin\beta \cdot d_D} \cdot w^{III}(0) \quad (33)$$

Durch Umformung des Integrals entsteht folgende Differentialgleichung der Biegelinie für die Lastfälle Quellen und Vorspannung (34):

$$w^{IV}(x) + \frac{2 \cdot \sin\beta \cdot d_D \cdot E_{90}}{EI \cdot r_H} \cdot w(x) = \frac{2 \cdot d_D \cdot r_S \cdot E_{90}}{b_R \cdot d_R \cdot r_H \cdot E_S} \cdot w^{III}(0) - \frac{2 \cdot \sin\beta \cdot d_D \cdot r_S \cdot E_{90}}{r_H \cdot EI} \cdot \varepsilon_{VS} + \frac{2 \cdot \sin\beta \cdot d_D \cdot E_{90}}{EI} \cdot \varepsilon_Q \quad (34)$$

Die vier Randbedingungen zur Lösung der Differentialgleichung folgen aus der Forderung, dass an den Stellen der Spannringe die Durchbiegung der Holzdauben $w(x)$ und die Steigung der Biegelinie $w'(x)$ gleich Null sein muss:

- Randbedingung RB 1: $w(0) = 0$
- Randbedingung RB 2: $w(e_R) = 0$
- Randbedingung RB 3: $w'(0) = 0$
- Randbedingung RB 4: $w'(e_R) = 0$

Die allgemeine Lösung dieser inhomogenen Differentialgleichung setzt sich aus der allgemeinen Lösung der zugehörigen homogenen Differentialgleichung und einer partikulären Lösung der inhomogenen Differentialgleichung zusammen. Mit Hilfe von Substitutionen und der Mathematik-Software MAPLE kann die Biegelinie $w(x)$ der Holzdaube berechnet werden. Daraus lassen sich folgende Gleichungen für die Lastfälle Quellen und Vorspannung ableiten:

Querdruckspannung der Holzdauben in Umfangsrichtung:

$$\sigma_{c,90,U}(x) = -\frac{EI}{2 \cdot \sin\beta \cdot d_D} \cdot w^{IV}(x) \quad (35)$$

Dehnung der Holzdauben:

$$\varepsilon_H(x) = \varepsilon_Q + \frac{\sigma_{c,90,U}(x)}{E_{90}} = \varepsilon_Q - \frac{EI}{2 \cdot \sin\beta \cdot d_D \cdot E_{90}} \cdot w^{IV}(x) \quad (36)$$

Aufweitung des Holzrohres:

$$\Delta r_H(x) = \varepsilon_H(x) \cdot r_H = \left(\varepsilon_Q - \frac{EI}{2 \cdot \sin\beta \cdot d_D \cdot E_{90}} \cdot w^{IV}(x) \right) \cdot r_H \quad (37)$$

Zugspannung im Stahlring:

$$\sigma_S = -\frac{d_D}{b_R \cdot d_R} \cdot \int_{x=0}^{e_R} \sigma_{c,90,U}(x) \, dx = \frac{EI}{2 \cdot \sin\beta \cdot b_R \cdot d_R} \cdot \int_{x=0}^{e_R} w^{IV}(x) \, dx \quad (38)$$

Zugkraft im Stahlring:

$$F_S = -d_D \cdot \int_{x=0}^{e_R} \sigma_{c,90,U}(x) \, dx = \frac{EI}{2 \cdot \sin\beta} \cdot \int_{x=0}^{e_R} w^{IV}(x) \, dx \quad (39)$$

Die mit Hilfe der Differentialgleichung der Biegelinie berechnete Querdruckspannung der Holzdauben in Umfangsrichtung und Zugkraft in den Spannringsen infolge Quellen und Vorspannung kann für verschiedene geometrische Vorgaben (Spannringabstand, Daubengeometrie, Rohrrinnendurchmesser etc.) bestimmt werden.

Für eine Druckrohrleitung mit einem Innendurchmesser von 1,0 m ist in Bild 8-5 exemplarisch die Zugkraft in den Spannringsen für die Lastfälle Quellen und Vorspannung in Abhängigkeit von der Daubendicke und dem Spannringabstand dargestellt. Die dabei verwendeten Eingangsparameter für den theoretischen Berechnungsansatz (Steifigkeit, Quelldehnung und Vorspanndehnung) werden in Kapitel 8.2 vorgestellt.

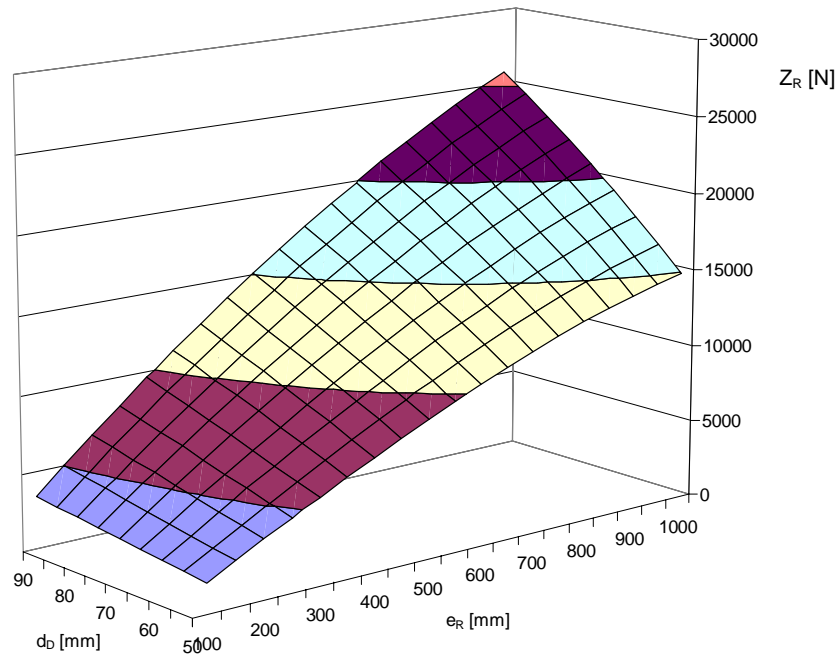


Bild 8-5 theoretischer Berechnungsansatz: Zugkraft im Spannring in Abhängigkeit von Daubendicke und Spannringabstand (Lastfälle Quellen und Vorspannung)

8.2 Vergleich mit Versuchsergebnissen

Im Folgenden werden theoretische Berechnungen für die Lastfälle Vorspannung und Quellen mit Ergebnissen aus experimentellen Untersuchungen an Druckrohrleitungen aus Holz (Kapitel 7.1) verglichen.

In Tabelle 8-1 sind die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen aus Kapitel 7.1.2 zusammengefasst (Mittelwerte von Rohrabschnitt 1 mit einer Vorspannung von 5 kN und ohne Wasserinnendruck). Die maximale Beanspruchung der Spannringe wurde etwa vier bis sechs Wochen nach Versuchsbeginn erreicht; anschließend trat eine Reduzierung der Zugkraft in den Spannringen durch Relaxation des Holzes auf. Nach etwa zwei bis drei Monaten erreichte die Zugkraft ein konstantes Niveau.

Tabelle 8-1 Beanspruchung der Spannringe aus experimentellen Untersuchungen (vgl. Kapitel 7.1.2: Mittelwerte von Rohrabschnitt 1 mit einer Vorspannung von 5 kN)

Lastfall	Zeitpunkt	Zugkraft im Spannring Z_R [kN]
Vorspannung	$t=0$	5,31
Quellen	$t = 4 - 6$ Wochen (max Z_R)	10,32
Quellen	$t > 3$ Monate (Z_R)	9,53
Vorspannung + Quellen	$t = 4 - 6$ Wochen (max Z_R)	15,63
Vorspannung + Quellen	$t > 3$ Monate (Z_R)	14,85

Für die Ermittlung der Zugkraft in den Spannrings und der Querdruckspannung der Holzdauben in Umfangsrichtung nach dem theoretischen Berechnungsansatz für die Lastfälle Vorspannung und Quellen werden als Eingangsgrößen die experimentell ermittelten Werte für den Elastizitätsmodul von Holz (Lärche) (Kapitel 4.1) und die geometrischen Vorgaben des Versuchsstandes (Kapitel 7.1) verwendet:

Geometrie-Vorgaben:

r_{innen}	= 700 mm	Innenradius des Holzrohres
n_D	= 36	Anzahl der Holzdauben
d_D	= 68 mm	Dicke der Holzdauben
d_R	= 6 mm	Dicke der Spannrings
b_R	= 60 mm	Breite der Spannrings
e_R	= 500 mm	Abstand der Spannrings

Material-Vorgaben:

E_{90}	= 255 N/mm ²	E-Modul rechtwinklig zur Faserrichtung ($u > FS$)
E_{90}	= 363 N/mm ²	E-Modul rechtwinklig zur Faserrichtung ($u = 16 \%$)
E_0	= 11760 N/mm ²	E-Modul in Faserrichtung ($u > FS$)
E_0	= 12585 N/mm ²	E-Modul in Faserrichtung ($u = 16 \%$)
E_S	= 210000 N/mm ²	E-Modul Stahl

Der Elastizitätsmodul in bzw. rechtwinklig zur Faserrichtung von Lärche bei einer Holzfeuchte von 16 % wurde mit Hilfe der Ergebnissen aus Kapitel 4.1.2 (Elastizitätsmodul bei einer Holzfeuchte von 12 %) und der Abminderung von 2 %/ Δu nach DIN EN 384 (05/2004) bestimmt.

Für die Quelldehnung ε_Q und die Vorspanndehnung ε_{VS} wurden folgende Werte gewählt, so dass die Zugkraft in den Spannrings nach dem theoretischen Berechnungsansatz mit den experimentell ermittelten Werten übereinstimmte:

Zeitpunkt $t = 0$:	ε_Q	= 0
	ε_{VS}	= -0,000485
Zeitpunkt $t = 4 - 6$ Wochen:	ε_Q	= 0,001526
	ε_{VS}	= -0,000485
Zeitpunkt $t > 3$ Monate:	ε_Q	= 0,001425
	ε_{VS}	= -0,000485

In Tabelle 8-2 sind die Ergebnisse des theoretischen Berechnungsansatzes zusammengefasst. Es wurden drei unterschiedliche Berechnungen durchgeführt. Zum Zeitpunkt $t = 0$ tritt nur der Lastfall Vorspannung auf und die Holzfeuchte beträgt etwa 16 %. Zum Zeitpunkt $t = 4 - 6$ Wochen wird sowohl der Lastfall Vorspannung als auch

Quellen berücksichtigt. Für die Holzfeuchte wird die Annahme getroffen, dass diese über dem Fasersättigungsbereich liegt. Zur Berücksichtigung der Relaxation des Holzes (Zeitpunkt $t > 3$ Monate) wird im letzten Berechnungsschritt eine geringere Quelldehnung ε_Q eingesetzt.

Zum Vergleich zu den Ergebnissen aus dem theoretischen Berechnungsansatz ist in Tabelle 8-2 die Zugkraft in den Spannrings aus den experimentellen Untersuchungen (Kapitel 7.1.2) angegeben.

Tabelle 8-2 Auswertung des theoretischen Berechnungsansatzes und Vergleich mit experimentellen Untersuchungen (vgl. Kapitel 7.1.2)

Lastfall	Zeitpunkt	Eingabewerte	E-Modul (Lärche)	$\sigma_{c,90,U}$ [N/mm ²] theoretisch	Z_R [kN] theoretisch	Z_R [kN] experimentell
Vorspannung	t = 0	$\varepsilon_{VS} = -0,000485$	u = 16%	$E_0 = 12585$	0,16	5,31
		$\varepsilon_Q = 0$		$E_{90} = 363$		
Vorspannung Quellen	t = 4-6 Wochen	$\varepsilon_{VS} = -0,000485$	u > FS	$E_0 = 11760$	0,46	15,63
		$\varepsilon_Q = 0,001526$		$E_{90} = 255$		
Vorspannung Quellen	t > 3 Monate	$\varepsilon_{VS} = -0,000485$	u > FS	$E_0 = 11760$	0,44	14,85
		$\varepsilon_Q = 0,001425$		$E_{90} = 255$		

Die Querdruckspannung der Holzdauben in Umfangsrichtung ist maximal an der Stelle eines Spannrings ($x = 0$ bzw. $x = e_R$) und minimal zwischen zwei Spannrings ($x = e_R/2$). Bild 8-6 zeigt den Verlauf der Querdruckspannung in Umfangsrichtung nach dem theoretischen Berechnungsansatz für die Lastfälle Vorspannung und Quellen zum Zeitpunkt $t = 4 - 6$ Wochen.

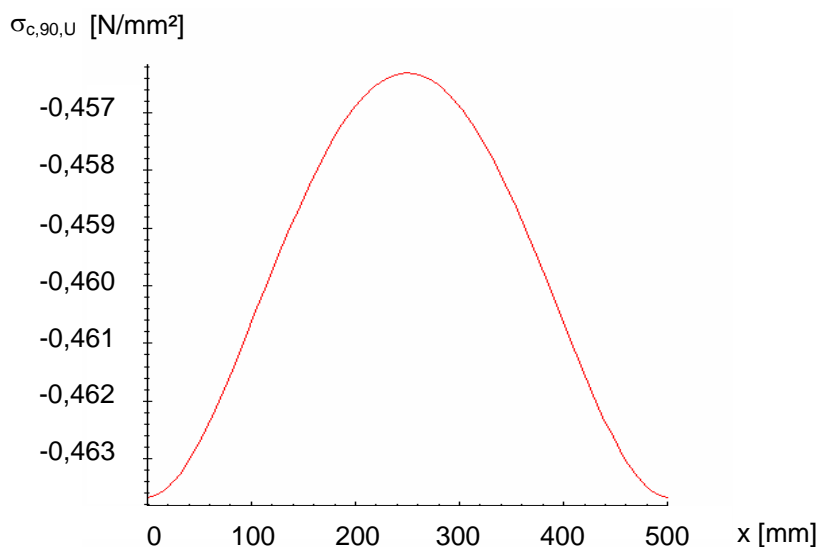


Bild 8-6 Querdruckspannung der Holzdauben in Umfangsrichtung nach theoretischem Berechnungsansatz (Lastfälle Vorspannung und Quellen; $t = 4 - 6$ Wochen)

Bei den experimentellen Untersuchungen der stehenden Rohrabschnitte und beim theoretischen Berechnungsansatz ist kein Wasserinnendruck vorhanden. Wird dieser berücksichtigt (Kapitel 9), steigt bei zunehmendem Wasserinnendruck die Zugkraft in den Spannrings und die Querdruckspannung der Holzdauben in Umfangsrichtung nimmt infolge der Rohraufweitung ab. Zusätzlich werden diese Werte von geometrischen Vorgaben (Dicke der Holzdauben, Spannringabstand, Rohrinne Durchmesser, etc.) beeinflusst.

Mit dem theoretischen Berechnungsansatz und den ermittelten Eingabewerten ε_{VS} und ε_Q können somit die Beanspruchungen und Verformungen der Spannrings und Holzdauben für die Lastfälle Quellen und Vorspannung bestimmt werden. Im folgenden Kapitel 9 wird mit dem theoretischen Berechnungsansatz die Modellierung der Lastfälle Vorspannung und Quellen des Finite-Elemente-Modells überprüft.

9 FE-Modell für aufgelagerte Druckrohrleitungen aus Holz

9.1 Allgemeines

Biege- bzw. schalentheoretische Ansätze zur Schnittgrößenberechnung, wie sie beispielsweise im Stahlbau bei unversteiften, sattelgelagerten Kreiszylinderschalen oder entsprechend gestützten ringversteiften Rohrleitungs- und Behältersysteme angewandt werden (Mang (1970)), können für die Bemessung von aufgelagerten Druckrohrleitungen aus Holz nicht eingesetzt werden. Da die Rohrleitung aus einzelnen Holzdauben hergestellt und in gewissen Abständen mit Spannringen zusammengehalten wird, bewirkt beispielsweise eine Zunahme des Wasserinnendruckes eine Abnahme der Steifigkeit des Rohres infolge Rohraufweitung. Gleichzeitig bewirkt ein zunehmender Wasserinnendruck eine Stabilisierung des Kreisquerschnittes. Das nicht-drehsymmetrische Lastsystem von aufgelagerten Druckrohrleitungen führt teilweise zu erheblichen Schwierigkeiten bei der Schnittgrößenberechnung.

Aus den oben genannten Gründen wird im Folgenden ein Finite-Elemente-Modell zur Bestimmung des Trag- und Verformungsverhaltens von Druckrohrleitungen aus Holz, die auf Sätteln aufgelagert sind, vorgestellt. Mit Hilfe des Tabellenkalkulationsprogramms Microsoft Excel und der darin implementierten Programmiersprache Visual Basic wurde eine automatische Generierung der Eingabebefehle für die FE-Modellierung erstellt. Somit können neben den Parametern aus den Bereichen Material und Belastung auch geometrische Vorgaben variiert und eine Vielzahl unterschiedlicher Modelle bei vergleichbar geringem Zeitaufwand modelliert werden. Die Berechnungen erfolgten mit dem FE-Programm ANSYS Version 5.7. Die Eignung des Rechenmodells wurde durch den Vergleich mit Ergebnissen aus experimentellen Untersuchungen (Kapitel 7) nachgewiesen.

9.2 Geometrie

Im Folgenden wird von einer geraden, horizontal verlaufenden Druckrohrleitung ausgegangen; der Einfluss von Neigungen, Krümmungen und Rohranschlüssen wird nicht berücksichtigt. Die Anzahl der möglichen Geometrien wurde im Hinblick auf die allgemeine Untersuchung von Druckrohrleitungen aus Holz durch Vorgaben begrenzt (Bild 9-1):

- einheitliche Länge und Querschnitt der Holzdauben;
- gerade Anzahl von Holzdauben im Querschnitt;
- jeweils die Hälfte der Holzdauben wird in einem Querschnitt gestoßen;
- konstanter Abstand der Auflager und der Spannringe;
- über dem Auflager befindet sich jeweils ein Spannring.

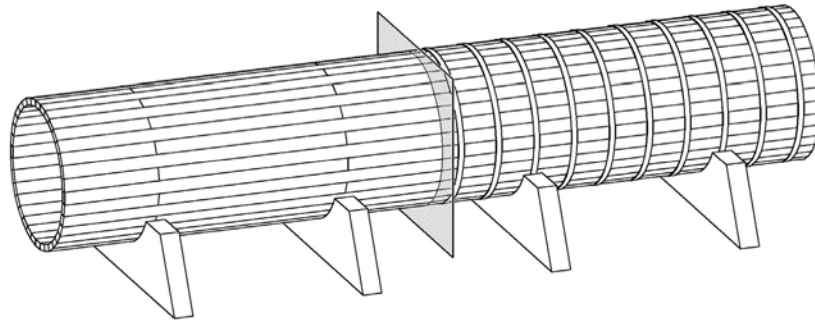


Bild 9-1 Abschnitt einer Druckrohrleitung

Zur vollständigen Beschreibung der Geometrie der Druckrohrleitung sind folgende Parameter erforderlich:

- Druckrohrleitung: Innendurchmesser d_i , Winkel am Auflager, der die Druckrohrleitung im unteren Bereich umschließt ϕ ;
- Auflager: Abstand e_S , Breite b_S ,
- Holzdauben: Anzahl n_D im Kreisquerschnitt, Länge ℓ_D , Dicke d_D ;
- Spannringe: Anzahl n_R zwischen zwei Auflagern, Dicke d_R , Breite b_R .

Der Abstand der Spannringe e_R ergibt sich somit bei vorgegebenem Abstand der Auflagern und der Anzahl der Spannringe zwischen zwei Auflagern. Aus den oben genannten Vorgaben lässt sich anhand Bild 9-2 die exakte Geometrie einer einzelnen Holzdaube bestimmen.

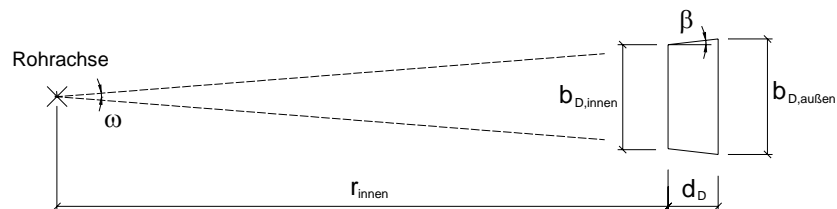


Bild 9-2 Geometrie einer Holzdaube

Der Umfang der Modellierung und somit die erforderliche Rechenzeit wird durch die Ausnutzung der Symmetrieeigenschaften einer Druckrohrleitung reduziert. Ein Rohrabschnitt wird durch zwei vertikale, rechtwinklig zur Rohrachse geführte Schnitte jeweils in Feldmitte zwischen den Auflagern und einem vertikalen Schnitt in Längsrichtung der Rohrleitung herausgeschnitten. Die Betrachtung eines Rohrabschnittes der Länge ℓ ist ausreichend, da sich die Schnittgrößen und Verformungen in den einzelnen Feldern wiederholen. Die zu modellierende Halbschale ist in Bild 9-3 dargestellt. In der Regel wird jede zweite Holzdaube über dem Auflager gestoßen. Die beiden Schnitte rechtwinklig zur Rohrachse führen je nach Anordnung der Spannringe entweder nur durch Holzdauben oder durch Holzdauben und Spannring. Beim Schnitt

parallel zur Rohrachse wird davon ausgegangen, dass die oberste und unterste Holzdaube in Längsrichtung jeweils halbiert wird.

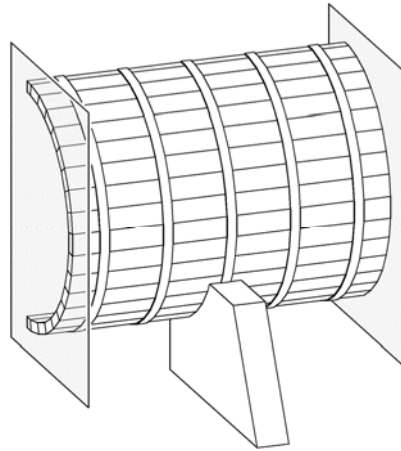


Bild 9-3 Ausnutzung der Symmetrie bei der Modellierung

9.3 Materialien

Die elasto-mechanischen Eigenschaften von Holz nehmen mit zunehmendem Feuchtegehalt im hygroskopischen Bereich ab. Bei der FE-Modellierung von Druckrohrleitungen aus Holz wird dieser Einfluss der Holzfeuchte auf die Steifigkeiten von Holz berücksichtigt. Bei den folgenden Berechnungen wird linear elastisches Materialverhalten zugrunde gelegt.

Für die Modellierung der Struktur werden insgesamt vier Materialien verwendet. Neben den zwei realen Materialien „Holz“ und „Stahl“ werden zusätzlich die zwei fiktiven Materialien „Haftung Holz-Holz“ und „Haftung Stahl-Holz“ definiert.

Das Materialverhalten von Holz wird als rhombisch-anisotrop vorausgesetzt. Die Tatsache, dass bei Holzdauben liegende und stehende Jahresringe vorhanden sind, wird durch den Ansatz von Mittelwerten der Holzeigenschaften (Steifigkeiten, Querdehnungsfaktoren, etc.) für die radiale und tangentielle holzatomische Richtung berücksichtigt.

Der Kontakt zwischen den Holzdauben (Nut- und Federverbindung an den Längsseiten der Holzdauben) sowie zwischen Holzdauben und Spannrings wird durch die beiden oben genannten fiktiven Materialien realisiert.

9.4 Einwirkungen

Das Trag- und Verformungsverhalten von Druckrohrleitungen aus Holz kann als Zusammenwirken von Stahl- und Holzbauteilen betrachtet werden. Wird dieses System aus Dauben und Stahlringen in regelmäßigen Abständen auf Sattelkonstruktionen

aufgelagert, so stellt sich unter den folgenden Beanspruchungen ein komplexer Spannungs- und Verformungszustand ein.

9.4.1 Eigengewicht

Beim Lastfall Eigengewicht wird das Eigengewicht der gesamten Rohrkonstruktion (Holzdauben und Spannringe) berücksichtigt. Das Eigengewicht des Wassers wird über den Lastfall Wasserinnendruck abgebildet.

9.4.2 Vorspannung

Die Vorspannung der Spannringe ermöglicht in der Praxis den Zusammenbau der Druckrohrleitung. Aufgrund der Vorspannung entstehen Druckspannungen rechtwinklig zur Faserrichtung in den Holzdauben und Zugspannungen in den Stahlringen. Die Größe dieser im Gleichgewicht stehenden Spannungen ist überwiegend von der Holzdaubendicke, dem Spannringabstand und dem Verhältnis der Steifigkeiten abhängig.

Der Lastfall Vorspannung wird bei der FE-Modellierung über eine Temperaturabminderung der Stahlringe berücksichtigt. Der Koeffizient der Temperaturexpansion in Umfangsrichtung der Spannringe wird mit $\alpha_T = 1$ [1/K] definiert. Die Verkürzung der Spannringe wird durch eine negative Endtemperatur $T_2 < 0$ K erzeugt. Zur Steuerung dieses Lastfalls muss eine negative Dehnung der Spannringe bei der automatischen Generierung eingegeben werden, welche betragsmäßig der Endtemperatur T_2 entspricht. Diese negative Dehnung kann mit Hilfe des theoretischen Berechnungsansatzes bestimmt werden (Kapitel 8.2: $\varepsilon_{VS} = -0,000485$ für die dort vorgegebenen Angaben).

Die exponentielle Verteilung der Spannkraft, die am Spansschloss maximal ist und infolge Haftung vom Spansschloss ausgehend mit zunehmendem Winkel abnimmt, wird beim FE-Modell durch unterschiedliche Temperaturbelastung der einzelnen Volumenelemente des Spannrings abgebildet. Die Größe der exponentiell verteilten Temperaturbelastung eines Spannrings ist abhängig vom gewählten Vorspannungsgrad und wird in der automatischen Generierung als Mittelwert eingegeben.

Um eine gleichmäßige Verteilung der Vorspannkraft zu gewährleisten, werden in der Praxis die Spansschlösser der einzelnen Spannringe spiralförmig in Längsrichtung der Rohrleitung verteilt. Die maximale Zugbeanspruchung in einem Spannring tritt beim Spannring in Feldmitte zwischen zwei Auflagern auf, wenn das Spansschloss in Höhe der Rohrmittellinie angeordnet ist. Ursache hierfür ist das Biegetragverhalten der Rohrleitung und die Ovalisierung des Kreisquerschnittes. Bei der FE-Modellierung wird deshalb der Spannring in Feldmitte mit einer maximalen negativen

Temperaturbelastung in Höhe der Rohrmittellinie belastet, die Spannschlösser der folgenden Spannrings jeweils spiralförmig um 90° versetzt.

9.4.3 Quellen

Der Einbau der einzelnen Holzdauben bei der Herstellung einer Druckrohrleitung erfolgt mit einer Holzfeuchte von ungefähr 16 %. Bei Wasserfüllung der Rohrleitung quellen die Holzdauben und gewährleisten somit die Dichtigkeit der Rohrleitung. Der dabei entstehende Quellungsdruck beansprucht die Spannrings auf Zug und die Holzdauben auf Druck rechtwinklig zur Faserrichtung. Im Bereich zwischen den Spannrings kann sich die Rohrwandung durch Verformung dieser Belastung teilweise entziehen. Der Quellungsdruck ist neben dem Wasserinnendruck maßgebend für die Bemessung der Rohrleitung.

Für den Lastfall Quellen wird bei der FE-Modellierung eine gleichmäßige Feuchteverteilung in den Holzdauben angenommen. Das Quellen wird über eine Temperaturerhöhung der Holzdauben als Wärmeausdehnung berücksichtigt. Der Temperatureausdehnungskoeffizient α_T wird für die tangentielle und radiale holzanatomische Richtung mit 1 [1/K], für die longitudinale Richtung mit 0 [1/K] definiert. In Abhängigkeit vom vorgegebenen Quellmaß α des Holzes wird die zugehörige Temperaturerhöhung der Holzdauben bestimmt. Dabei wird ein aus radialem und tangentialem Quellmaß gemittelter Wert rechtwinklig zur Faserrichtung angegeben. Das in Relation hierzu sehr geringe longitudinale Quellmaß wird nicht berücksichtigt. Zur Bestimmung der Größe der Temperaturerhöhung muss bei der Eingabegenerierung die Holzfeuchte beim Einbau der Holzdauben angegeben werden:

Quellmaß der Holzdauben:	α	[%/° Δu]	
Holzfeuchte beim Einbau:	u_1	[%]	
Holzfeuchte im Endzustand:	u_2	[%]	
Holzfeuchteänderung:	$\Delta u = u_2 - u_1$	[%]	
→ Quelldehnung:	$\varepsilon_Q = \Delta u \cdot \alpha$	[-]	(40)

Wärmeausdehnungskoeffizient:	α_T	[1/K]	
Ausgangstemperatur:	T_1	[K]	
Endtemperatur:	T_2	[K]	
Temperaturänderung:	$\Delta T = T_2 - T_1$	[K]	
→ Wärmedehnung:	$\varepsilon_T = \Delta T \cdot \alpha_T$	[-]	(41)

Aus Gleichung (40) und (41) folgt die erforderliche Temperaturänderung:

$$\Delta T = (T_2 - T_1) = \Delta u \cdot \frac{\alpha}{\alpha_T} = (u_2 - u_1) \cdot \frac{\alpha}{\alpha_T} \quad (42)$$

Die Endtemperatur beträgt somit unter Verwendung des gewählten Wärmeausdehnungskoeffizienten $\alpha_T = 1$ [1/K] und der in ANSYS standardmäßig vorgegebenen Ausgangstemperatur von $T_1 = 0$ K:

$$T_2 = (u_2 - u_1) \cdot \alpha \quad (43)$$

Die Relaxation von Holz wird durch zwei Berechnungen mit unterschiedlichen Quelldehnungen berücksichtigt. Die beiden Werte der Quelldehnung wurden experimentell an Druckrohrleitungen aus Holz ermittelt (Kapitel 8.2). Im ersten Berechnungsschritt wird die maximale Zugkraft in den Spannringen sowie die Spannungen in den Holzdauben während des Quellvorgangs bestimmt ($\varepsilon_Q = 0,001526$). Im zweiten Berechnungsschritt zur Bestimmung der maximalen Verformungen wird aufgrund der Relaxation des Holzes eine geringere Quelldehnung eingesetzt ($\varepsilon_Q = 0,001425$).

Beispiel für Eingabe:

Quellmaß:	$\alpha = 0,0109 \text{ \%}/\% \Delta u$
Holzfeuchte beim Einbau:	$u_1 = 16 \text{ \%}$
Holzfeuchte im Endzustand:	$u_2 = 30 \text{ \%}$ (entspricht der Fasersättigungsfeuchte)
→ Quelldehnung:	$\varepsilon_Q = 0,0109 \cdot [(30 - 16) / 100] = 0,001526$ [-]
→ Endtemperatur:	$T_2 = 0,0109 \cdot [(30 - 16) / 100] = 0,001526$ [K]

9.4.4 Wasserinnendruck

Das Eigengewicht des Wassers wird über den Lastfall Wasserinnendruck abgebildet. Der Wasserinnendruck in der Rohrleitung wird bei der Eingabegenerierung als Wassersäule mit der Höhe h_{WS} [m] über der Rohrachse angegeben. Für die Sohle der Rohrleitung ergibt sich aufgrund der hydrostatischen Druckverteilung eine Druckhöhe von $h_{WS} + r_{innen}$, für den Rohrscheitel $h_{WS} - r_{innen}$ (Bild 9-4). Der Druckunterschied entspricht dem Eigengewicht des im Rohr enthaltenen Wassers. Für jede Stelle der Rohrwandung kann nach Gleichung (44) eine Flächenlast $p(\varphi)$ angegeben werden.

$$p(\varphi) = h_{WS}(\varphi) \cdot \rho_W \cdot g \quad (44)$$

Im Gegensatz zu den Lastfällen Quellen und Vorspannung, welche bei der FE-Modellierung über äquivalente Belastungen abgebildet werden, wird der Wasserinnendruck direkt als Flächenlast auf der Innenseite der Rohrwandung aufgebracht.

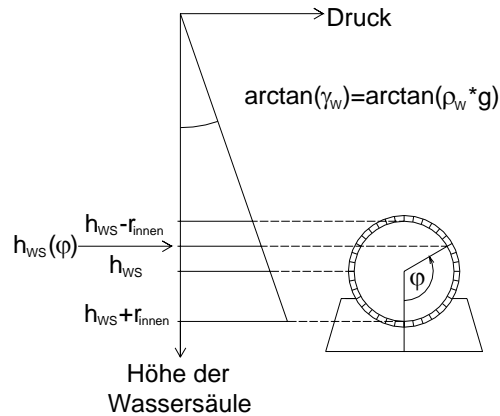


Bild 9-4 hydrostatische Druckverteilung

9.5 FE-Modellierung

Bei der FE-Modellierung wird die Struktur durch eine geometrische Beschreibung aus Knoten und Elementen aufgebaut. Über die direkte Generierung wird zunächst ein Netz aus Knoten gebildet. Die Knotendefinition erfolgt automatisch in globalen zylindrischen Koordinaten. Zusätzlich werden bei der automatisierten Generierung den Knoten und Elementen Nummern zugeordnet. Die Bauteile der Struktur werden anschließend aus Volumenelementen aufgebaut, wobei die einzelnen Holzdauben und Spannringe in eine Vielzahl von Elementen unterteilt werden (Bild 9-5). Die Diskretisierung des Modells, d.h. die erforderliche Anzahl der Elemente für ausreichend genaue Ergebnisse, wurde mit Hilfe einer Konvergenzstudie (Vergleich der Spannungen benachbarter Elemente und Netzverfeinerung) ermittelt.

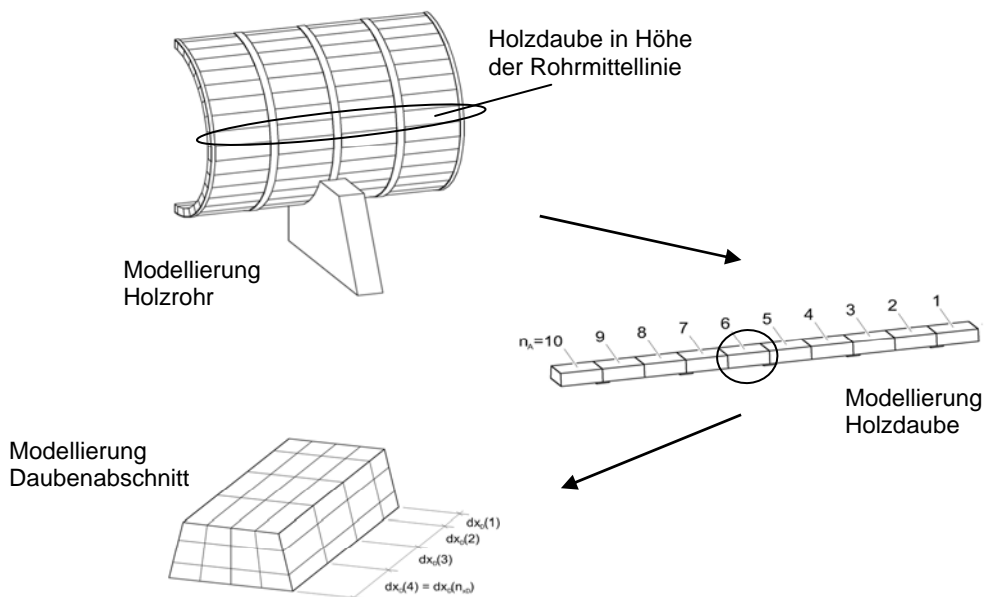


Bild 9-5 Holzrohr: Modellierung und Aufbau

Bei den folgenden Berechnungen wird linear elastisches Materialverhalten zugrunde gelegt. Als Volumenelemente werden SOLID64-Elemente verwendet. Dieser Elementtyp mit acht Knoten bildet eine dreidimensionale massive Struktur. Die Struktur wird schrittweise aus den Volumenelementen gebildet, welche an den Stoßflächen durch entsprechende Kopplungen zusammengefügt werden.

Für eine realistische Abbildung einer Druckrohrleitung werden Kontaktelemente bei der FE-Modellierung verwendet. Diese Elemente bestehen aus Kontakt- und Zielelementen (CONTA173 und TARGE170) und werden auf der Oberfläche der Volumenelemente angeordnet. Der Elementtyp CONTA173 ist ein vierknotiges, dreidimensionales Kontaktelement zur Modellierung von Kontaktverbindungen zwischen zwei Oberflächen. Das zugehörige Element TARGE170 ist ein dreidimensionales Zielelement. Definiert wird ein solches Kontaktpaar durch die Zuweisung eines gemeinsamen Real Constant Sets. Der Einsatz von Kontaktelementen führt zu einer nichtlinearen FE-Berechnung. Dies bedeutet, dass die Belastung schrittweise aufgebracht und die Verformung der Struktur für jeden dieser Zwischenschritte durch Gleichgewichtsiterationen bestimmt wird. Die Kontaktpaare bei der vorliegenden Modellierung lassen sich in drei unterschiedliche Gruppen einteilen:

- Kontakt zwischen den Längsseiten der Holzdauben (Flanken);
- Kontakt zwischen den Hirnholzflächen der Holzdauben an den Längsstößen;
- Kontakt zwischen Außenseite der Holzdauben und Innenseite der Stahlringe.

Die Nut- und Federverbindung an den Längsseiten der Holzdauben wird im FE-Modell geometrisch nicht berücksichtigt. Die Abbildung erfolgt über die Eingabe eines Haftungskoeffizienten zwischen den Holzdauben. Die Größe des Haftungskoeffizienten einer Nut- und Federverbindung wurde experimentell in Kapitel 4.5 bestimmt.

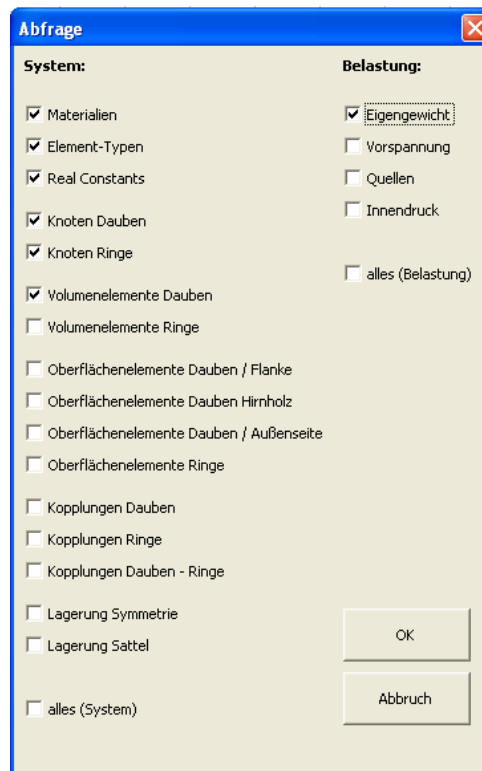
Die Verbindung der einzelnen Holzdauben an den Stirnseiten mittels Fremdfedern wird bei der FE-Modellierung als Stumpfstoß ausgeführt. Über Kontaktelemente können Druckkräfte in Längsrichtung einer Holzdaube weitergeleitet werden; Zugkräfte werden bei dieser Verbindung nicht übertragen.

Das Zusammenfügen der einzelnen Dauben- und Ringabschnitte erfolgt ebenfalls über Kopplung an deren Kontaktflächen. Nach Möhler und Herröder (1979) kann zwischen Stahl und Holz ein Haftungskoeffizient von 0,5 angenommen werden.

Die Lagerung des Rohrabschnittes auf dem Sattel erfolgt bei der FE-Modellierung über die Definition der Freiheitsgrade. Die Knoten in den Bauteiloberflächen, welche in Kontakt mit dem Auflager sind, werden orthogonal zu dieser Kontaktfläche unverschieblich gehalten.

Die Modellerzeugung erfolgt über eine automatische Eingabegenerierung. Das für die Eingabe von Geometrie, Materialien, Elementstruktur und Einwirkungen verwendete Datenblatt ist in Tabelle 9-1 dargestellt.

Die Anzahl der Volumenelemente und somit auch die Diskretisierung werden über die Eingabe der Elementstruktur gesteuert. Der Anwender kann über die Schaltfläche „Generierung“ die automatische Generierung starten und über das Formular „Abfrage“ die gewünschte Modellierung wählen (Bild 9-6).



The image shows a dialog box titled 'Abfrage' with a close button in the top right corner. It is divided into two columns: 'System:' and 'Belastung:'. Under 'System:', there are several checked options: 'Materialien', 'Element-Typen', 'Real Constants', 'Knoten Dauben', 'Knoten Ringe', 'Volumenelemente Dauben', and 'alles (System)'. Other unchecked options include 'Volumenelemente Ringe', 'Oberflächenelemente Dauben / Flanke', 'Oberflächenelemente Dauben Hirnholz', 'Oberflächenelemente Dauben / Außenseite', 'Oberflächenelemente Ringe', 'Kopplungen Dauben', 'Kopplungen Ringe', 'Kopplungen Dauben - Ringe', 'Lagerung Symmetrie', and 'Lagerung Sattel'. Under 'Belastung:', the option 'Eigengewicht' is checked, while 'Vorspannung', 'Quellen', 'Innendruck', and 'alles (Belastung)' are unchecked. At the bottom right, there are two buttons: 'OK' and 'Abbruch'.

Bild 9-6 Formular „Abfrage“ für automatische Generierung

9.6 Vergleich mit Versuchsergebnissen

Die Verifizierung des FE-Modells erfolgte durch den Vergleich mit Ergebnissen aus den experimentellen Untersuchungen in Kapitel 7.2. Hierzu wurde der in Kapitel 7.2.1 beschriebene Versuchsstand modelliert (Rohrinnendurchmesser 1,4 m, Auflagerabstand 2,0 m, Spannringabstand 0,5 m). Als Eingangsgrößen der FE-Modellierung wurden die in Kapitel 4 ermittelten Eigenschaften von Lärche (Mittelwerte) verwendet. Der Elastizitätsmodul in bzw. rechtwinklig zur Faserrichtung bei einer Holzfeuchte von 16 % wurde mit Hilfe der Ergebnisse aus Kapitel 4.1.2 (Elastizitätsmodul bei einer Holzfeuchte von 12 %) und der Abminderung von 2 %/ Δu nach DIN EN 384 (05/2004) bestimmt. Analog wurde der Schubmodul bei einer Holzfeuchte von 16 % ermittelt. Der zugehörige Rollschubmodul wurde mit 10 % des Schubmoduls nach DIN 1052 (08/2004) angenommen. Für die Querdehnungsfaktoren wurden Werte nach Neuhaus (1981) in Abhängigkeit der Holzfeuchte eingesetzt. Die Angaben für die Quelldehnung ε_Q und die Vorspanndehnung ε_{VS} wurden aus Kapitel 8.2 entnommen.

Im Folgenden werden die theoretischen Ergebnisse der FE-Modellierung mit den experimentell ermittelten Werten aus Kapitel 7.2 verglichen. Der Darstellungsbereich entspricht aus Symmetrie Gründen dem Auflagerabstand von 2 m (Bild 9-7). Das Auflager befindet sich in der Mitte des dargestellten Rohrabschnittes. Die Belastung wurde schrittweise aufgebracht und entspricht dem Wasserinnendruck zu den in Kapitel 7.2.2 jeweils angegebenen Zeitpunkten.

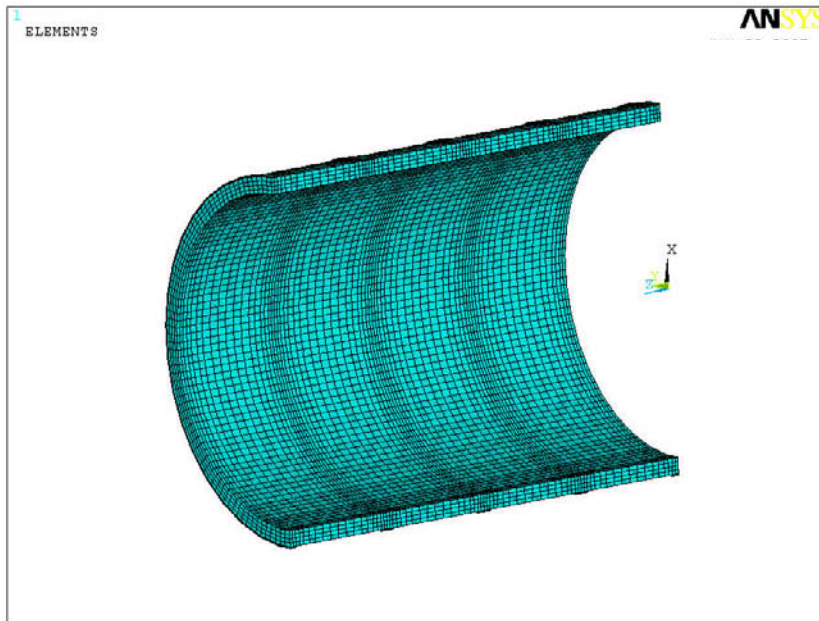


Bild 9-7 FE-Modell eines Holzrohres (Maße vgl. Versuchsstand in Kapitel 7.2.1)

9.6.1 Beanspruchung der Spannringe

Die Beanspruchung der Spannringe ist während des Quellvorgangs zum Zeitpunkt D maximal. Aufgrund der Rohraufweitung im Feldquerschnitt zwischen zwei Auflagern ist der Spannring in Feldmitte maßgebend.

Exemplarisch ist in Bild 9-8 der Verlauf der Zugkraft im Spannring bei einem Wasserinnendruck von 1,1 bar zum Zeitpunkt D dargestellt. Die Abwicklung der Zugkraft im Spannring bezieht sich auf die Hälfte des Rohrquerschnittes. Aufgrund der Anordnung des Spannschlusses und der Ovalisierung des Kreisquerschnittes tritt die maximale Zugkraft im Spannring in Höhe der Rohrmittellinie auf. Zum Vergleich sind in Bild 9-8 die experimentell ermittelten Werte der Zugkraft in Spannring 3 in Feldmitte dargestellt.

Der Vergleich der FE-Berechnung mit den experimentell ermittelten Werten (Kapitel 7.2.2) ist in Tabelle 9-2 zusammengefasst. Die Ergebnisse, die mit Hilfe des FE-Modells berechnet wurden, liegen maximal 9 % über den experimentell ermittelten Werten.

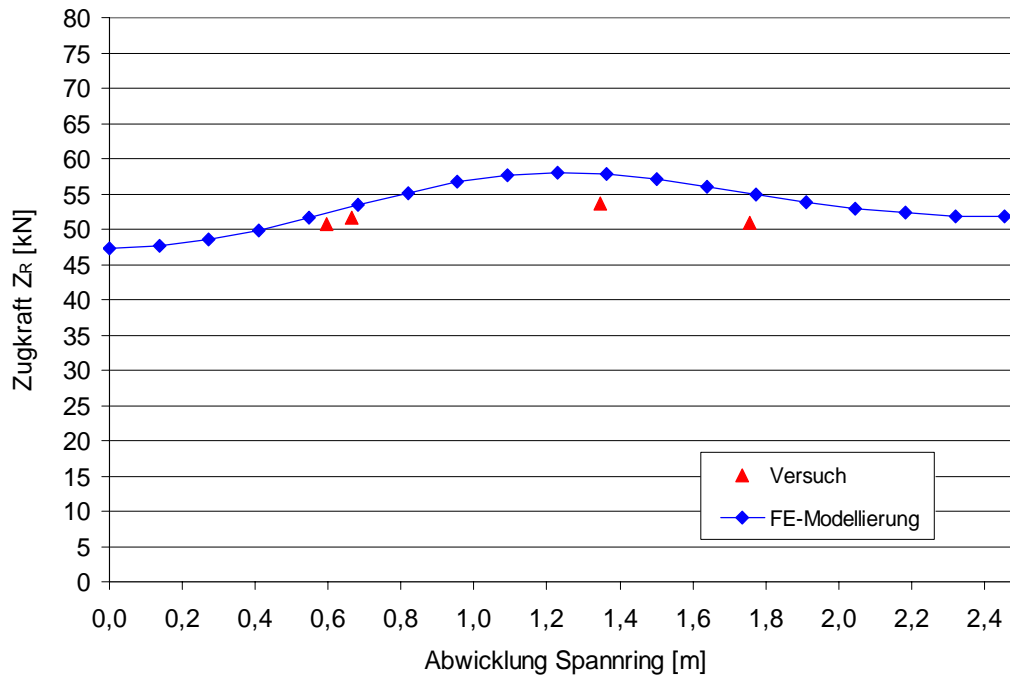


Bild 9-8 Abwicklung der Zugkraft im Spannring in Feldmitte
(Wasserinnendruck: $p = 1,1$ bar; Zeitpunkt D; $x = 0$ m: Rohrscheitel)

Tabelle 9-2 maximale Zugkraft im Spannring: Vergleich der Versuchsergebnisse (Kapitel 7.2.2) mit FE-Modellierung

Zugkraft im Spannring		Versuch: max Z_R [kN]	ANSYS: max Z_R [kN]	Vergleich Versuch / ANSYS [%]
Wasserinnendruck 1,1 bar (Zeitpunkt D)	Ring 1 (Auflager)	51,56	55,78	92%
	Ring 2	52,37	57,29	91%
	Ring 3 (Feldmitte)	53,69	58,04	93%
	Ring 4	52,77	57,29	92%
	Ring 5 (Auflager)	51,63	55,78	93%

Infolge Relaxation des Holzes tritt nach Erreichen eines Maximums der Zugkraft in den Spannringen eine Reduzierung auf. Dieses rheologische Verhalten von Holz wird bei der FE-Modellierung in einem zweiten Berechnungsschritt berücksichtigt. Dabei wurde eine Abminderung der Zugkraft in den Spannringen infolge Relaxation auf 91,7 % (Mittelwert) der zuvor erreichten maximalen Zugkraft bestimmt. Dieser Wert stimmt mit dem experimentell ermittelten Wert von 93,9 % (Kapitel 7.2.2) sehr gut überein.

9.6.2 Verformung in Längsrichtung und Querschnittsverformung

Die Verformung der Rohrleitung in Längsrichtung wurde jeweils an den Knoten der obersten und untersten Holzdaube sowie in Höhe der Rohrachse bestimmt. Die Querschnittsverformung wurde in Feldmitte zwischen zwei Auflagern und an der Position des Auflagers untersucht.

Exemplarisch ist in Bild 9-9 die Querschnittsverformung der FE-Modellierung über dem Auflager und in Feldmitte zum Zeitpunkt F (Wasserinnendruck 1,5 bar) dargestellt. Die Verformung der obersten und untersten Holzdaube in Längsrichtung ist in Bild 9-10 angegeben.

Der Vergleich der Ergebnisse der FE-Modellierung mit den experimentell ermittelten Werten ist in Tabelle 9-3 enthalten. Die Verformungen, die mit Hilfe des FE-Modells berechnet wurden, stimmen sehr gut mit den experimentell ermittelten Werten überein. Die Ergebnisse der FE-Modellierung weichen maximal 10 % von den experimentell ermittelten Werten ab.

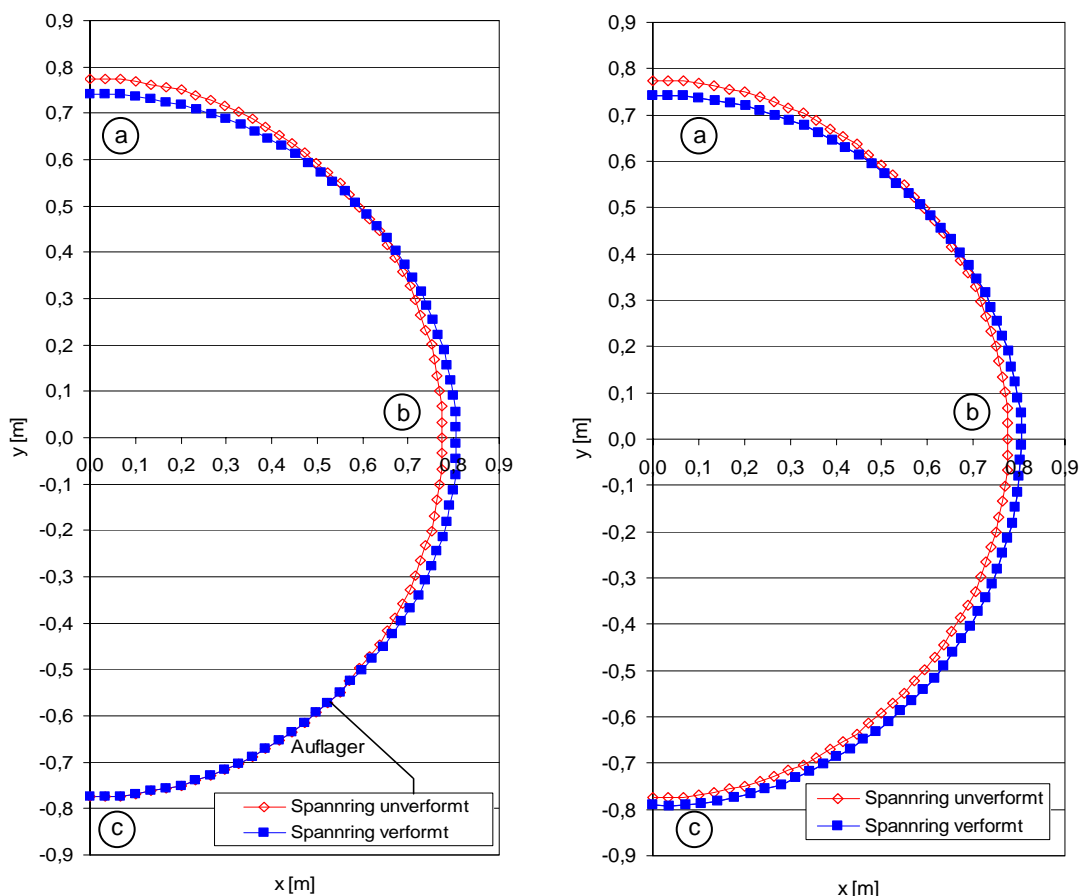


Bild 9-9 Querschnittsverformung (2-fach überhöht) am Auflager und in Feldmitte (Wasserinnendruck: $p = 1,5$ bar; Zeitpunkt F)

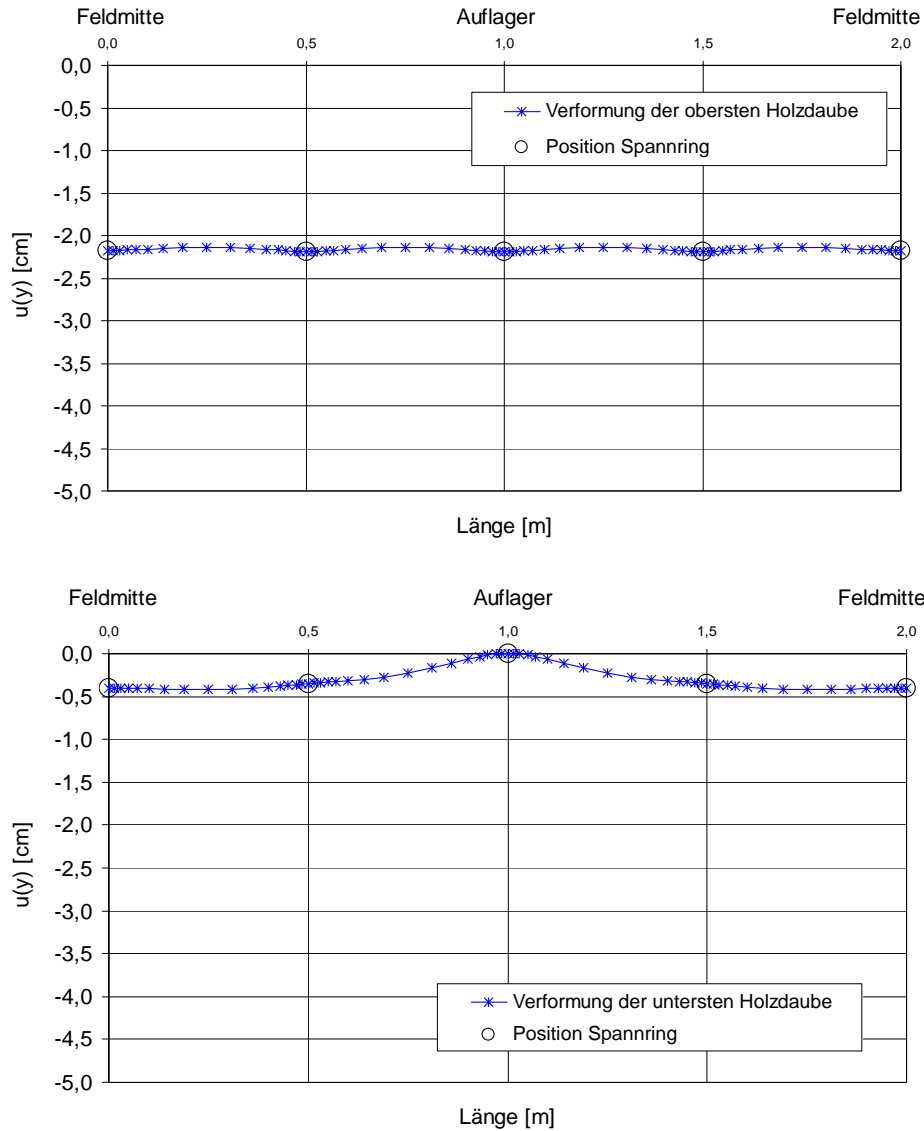


Bild 9-10 Verformung der obersten und untersten Holzdaube in Längsrichtung (Wasserinnendruck: $p = 1,5$ bar; Zeitpunkt F)

Tabelle 9-3 Querschnittsverformung und Verformung in Längsrichtung: Vergleich der Versuchsergebnisse (Kapitel 7.2.3) mit FE-Modellierung

Vergleich der Verformungen: Versuch / ANSYS [%]		Punkt a		Punkt b		Punkt c	
		u_x	u_y	u_x	u_y	u_x	u_y
Wasserfüllung Zeitpunkt B	Auflager (MW Ring 1,5)	-	92%	94%	94%	-	100%
	Feldmitte (Ring 3)	-	90%	92%	93%	-	91%
1,1 bar Zeitpunkt E	Auflager (MW Ring 1,5)	-	93%	95%	94%	-	100%
	Feldmitte (Ring 3)	-	92%	94%	93%	-	93%
1,5 bar Zeitpunkt F	Auflager (MW Ring 1,5)	-	91%	94%	95%	-	100%
	Feldmitte (Ring 3)	-	90%	93%	94%	-	95%

9.6.3 Querdruckspannung der Holzdauben in Umfangsrichtung

Die maximale Querdruckspannung der Holzdauben in Umfangsrichtung tritt während des Quellvorgangs auf. Die Querdruckspannung wird dabei maßgebend von Vorspannungsgrad, Wasserinnendruck und Quellungsdruck bestimmt. Die Verteilung der Querdruckspannung über die Breite der Holzdaube kann annähernd als konstant angenommen werden.

Mit steigendem Wasserinnendruck nehmen die Beträge der Querdruckspannung durch Aufweitung des Rohrquerschnittes ab. Da die maximale Rohraufweitung infolge Wasserinnendruck im Feldquerschnitt auftritt, ist die maximale Querdruckspannung in Umfangsrichtung dementsprechend im Auflagerquerschnitt vorhanden.

In Bild 9-11 ist die Abwicklung der Querdruckspannung der Holzdauben in Umfangsrichtung im Auflagerquerschnitt angegeben. Die Darstellung bezieht sich auf die Abwicklung der Hälfte des Rohrquerschnittes am Auflager. Die Holzdaube in Höhe der Rohrmittellinie ist aufgrund der Ovalisierung des Kreisquerschnittes und der Anordnung des Spannschlusses (ungünstigster Fall) für die Bemessung maßgebend.

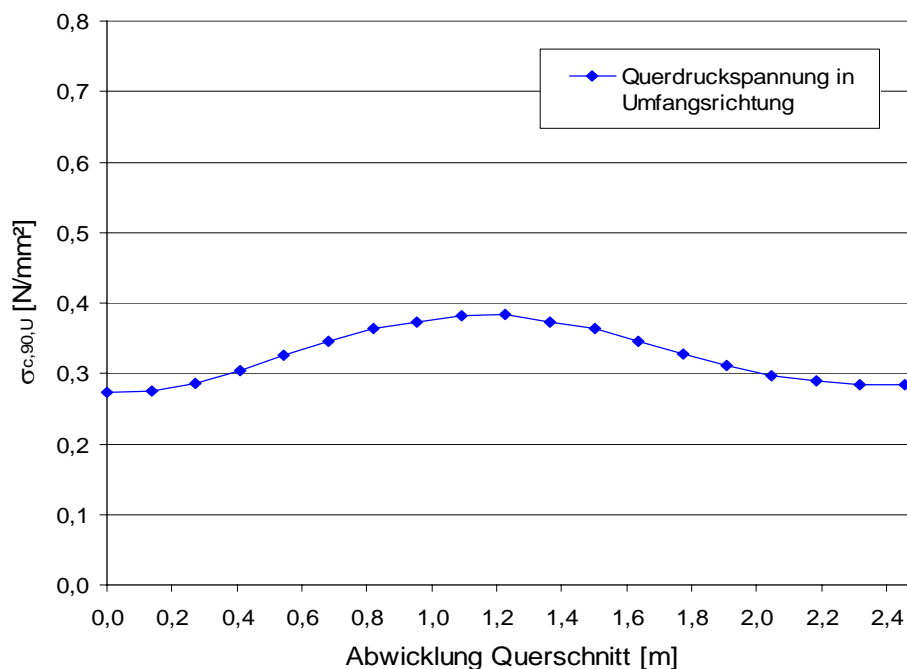


Bild 9-11 Abwicklung der Querdruckspannung der Holzdauben in Umfangsrichtung am Auflager (Wasserinnendruck: $p = 1,1$ bar; Zeitpunkt D; $x = 0$ m: Rohrscheitel)

In Bild 9-12 ist für die Holzdaube in Höhe der Rohrmittellinie der Verlauf der Querdruckspannung in Umfangsrichtung entlang der Rohrachse dargestellt. Die maximale Querdruckspannung in Umfangsrichtung tritt an der Stelle des Spannrings am Auflager auf.

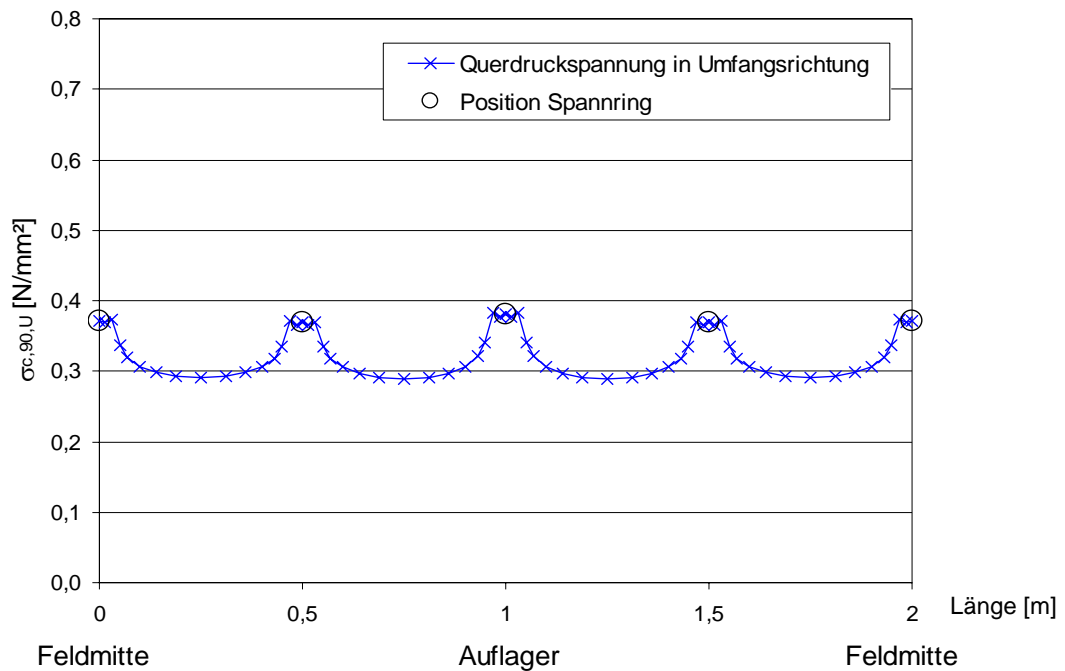


Bild 9-12 Holzdaube in Höhe der Rohrmittellinie: Querdruckspannung in Umfangsrichtung entlang der Rohrachse (Wasserinnendruck: $p = 1,1$ bar; Zeitpunkt D)

Für den untersuchten Rohrquerschnitt wurde mit dem theoretischen Berechnungsansatz ohne Berücksichtigung des Wasserinnendruckes eine maximale Querdruckspannung in Umfangsrichtung von $0,46 \text{ N/mm}^2$ berechnet (Kapitel 8.2). Dieser Wert stimmt sehr gut mit dem Ergebnis der FE-Modellierung ohne Wasserinnendruck überein. Bei einem Wasserinnendruck von $1,1$ bar wurde mit der FE-Berechnung eine Abnahme der maximalen Querdruckspannung in Umfangsrichtung infolge Rohraufweitung auf $0,38 \text{ N/mm}^2$ bestimmt (Bild 9-11 und Bild 9-12).

9.6.4 Querdruckspannung der Holzdauben in radialer Richtung

Die maximale Querdruckspannung in radialer Richtung ist an der Stelle des Auflagers an der Außenseite der untersten Holzdaube (Rohrsohle) vorhanden. Die Größe der Querdruckspannung wird maßgebend von Wasserinnendruck und Spannringabstand bestimmt. Bei der FE-Modellierung wurden folgende Werte der Querdruckspannung in radialer Richtung an der Außenseite der Holzdauben im Auflagerquerschnitt bei einem Wasserinnendruck von $1,1$ bar bestimmt:

- oberste Holzdaube: $\sigma_{c,90,rad} = 0,82 \text{ N/mm}^2$
- unterste Holzdaube: $\sigma_{c,90,rad} = 1,17 \text{ N/mm}^2$

Für die Berechnung der Querdruckspannung in radialer Richtung an der Außenseite der obersten Holzdaube (Rohrscheitel) kann Gleichung (45) angewandt werden:

$$\sigma_{c,90,\text{rad}} = p(\varphi) \cdot \frac{e_R}{b_R} \quad (45)$$

Für die in diesem Kapitel angegebene Modellierung ergibt sich nach Gleichung (45) bei einem Wasserinnendruck von 1,1 bar eine Querdruckspannung in radialer Richtung von 0,84 N/mm² für die oberste Holzdaube. Dieser Wert stimmt sehr gut mit dem oben angegebenen Wert von 0,82 N/mm² aus der FE-Berechnung überein.

Die Querdruckspannung in radialer Richtung der untersten Holzdaube kann nicht nach Gleichung (45) berechnet werden, da die Verformung der untersten Holzdaube nicht berücksichtigt wird. Das Trag- und Verformungsverhalten der untersten Holzdaube gleicht einem Durchlaufträger, dessen Auflager an der Stelle der Sättel starr und an den Stellen der Spannringe zwischen den Sätteln nachgiebig gelagert sind. Deshalb ist bei der untersten Holzdaube die maximale Querdruckspannung am Auflager vorhanden, während bei der obersten Holzdaube die Querdruckspannung bei allen Spannringen annähernd gleich groß ist.

9.6.5 Biegespannung der Holzdauben in Längsrichtung

Im Folgenden wird der Verlauf der Biegerandspannung im Rohrscheitel und an der Sohle erläutert. In Bild 9-13 ist die Biegerandspannung sowohl an der Innenseite als auch an der Außenseite der obersten Holzdaube (Rohrscheitel) sowie die Schwerpunktspannung dargestellt.

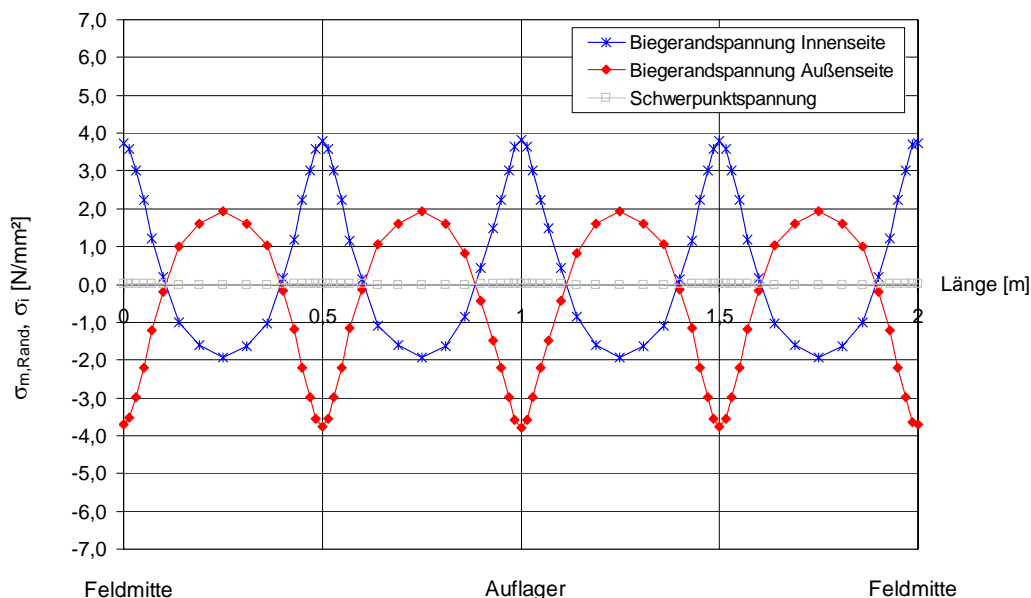


Bild 9-13 Biegerandspannung und Schwerpunktspannung der obersten Holzdaube (Wasserinnendruck: $p = 1,5$ bar; Zeitpunkt F)

Die oberste Holzdaube verformt sich aufgrund von Vorspannung und Wasserinnendruck gleichmäßig in Wellenform (Kapitel 9.6.2). Analog dazu ist auch der Verlauf der Biegerandspannung in Daubenlängsrichtung relativ gleichmäßig. Die maximale Beanspruchung der obersten Holzdaube infolge Wasserinnendruck tritt an den Stellen der Spannringe auf: die Holzdaube wird an der Innenseite auf Zug und an der Außenseite auf Druck beansprucht. Zwischen den Spannringen sind die Verhältnisse genau umgekehrt. Der Einfluss des Auflagers auf den Verlauf der Biegerandspannung der obersten Holzdaube ist vernachlässigbar gering. Die maximale Biegerandspannung in Feldmitte beträgt $3,78 \text{ N/mm}^2$, am Auflager $3,87 \text{ N/mm}^2$. Diese Werte entsprechen ungefähr der Biegerandspannung eines Durchlaufträgers über dem Auflager mit $3,79 \text{ N/mm}^2$ bei einer Stützweite von $0,50 \text{ m}$ (= Abstand der Spannringe) und unter gleicher Belastung (= Wasserinnendruck). Die Schwerpunktspannung der obersten Holzdaube ist mit Werten zwischen $0,01 \text{ N/mm}^2$ (Druck) und $0,02 \text{ N/mm}^2$ (Zug) vernachlässigbar gering.

In Bild 9-14 ist die Biegerandspannung und Schwerpunktspannung der untersten Holzdaube (Rohrsohle) dargestellt. Gegenüber dem Tragverhalten der obersten Holzdaube ist der Einfluss des Auflagers deutlich zu erkennen. Die maximale Biegerandspannung der untersten Holzdaube beträgt an der Stelle des Auflagers $6,08 \text{ N/mm}^2$ (Druck an der Außenseite der untersten Holzdaube) und ist somit maßgebend für die Bemessung. Die Biegerandspannung im Feld ist wesentlich geringer. Die Schwerpunktspannung der untersten Holzdaube beträgt in Feldmitte $0,29 \text{ N/mm}^2$ (Zug) und am Auflager $0,62 \text{ N/mm}^2$ (Druck).

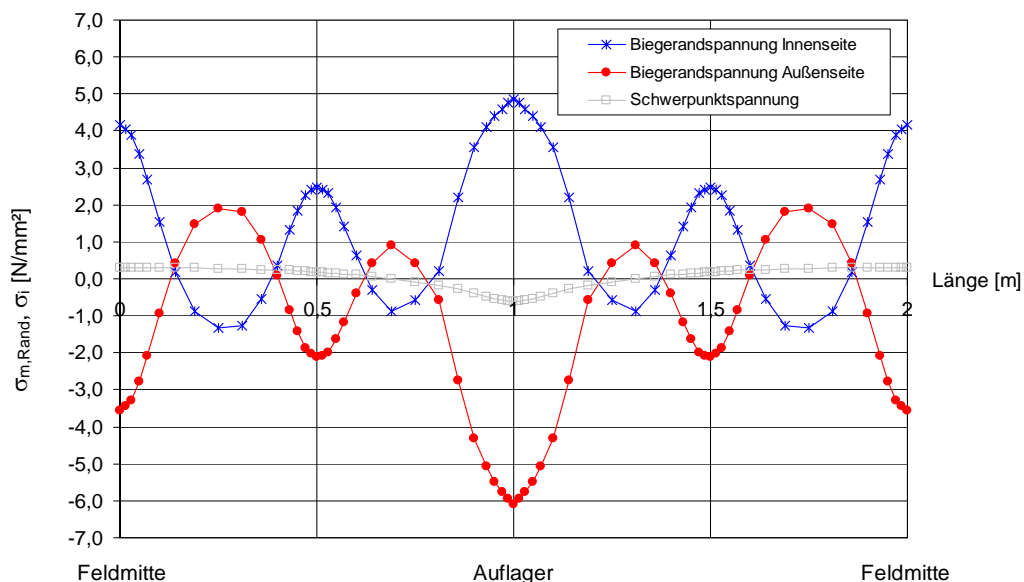


Bild 9-14 Biegerandspannung und Schwerpunktspannung der untersten Holzdaube (Wasserinnendruck: $p = 1,5 \text{ bar}$; Zeitpunkt F)

Bei Druckrohrleitungen aus Holz, die auf Sätteln aufgelagert sind, ist die Querschnittsverformung am Auflager größer als im Feldbereich. Aufgrund der Ovalisierung des Kreisquerschnittes wird eine Balkenwirkung unter Längsbeanspruchung nicht erreicht. Vielmehr kann das Tragverhalten über einen wirksamen Bereich der Schale beschrieben werden. Dieses Verhalten wird in Bild 9-15 und Bild 9-16 anhand der Schwerpunktspannung in den Holzdauben beschrieben.

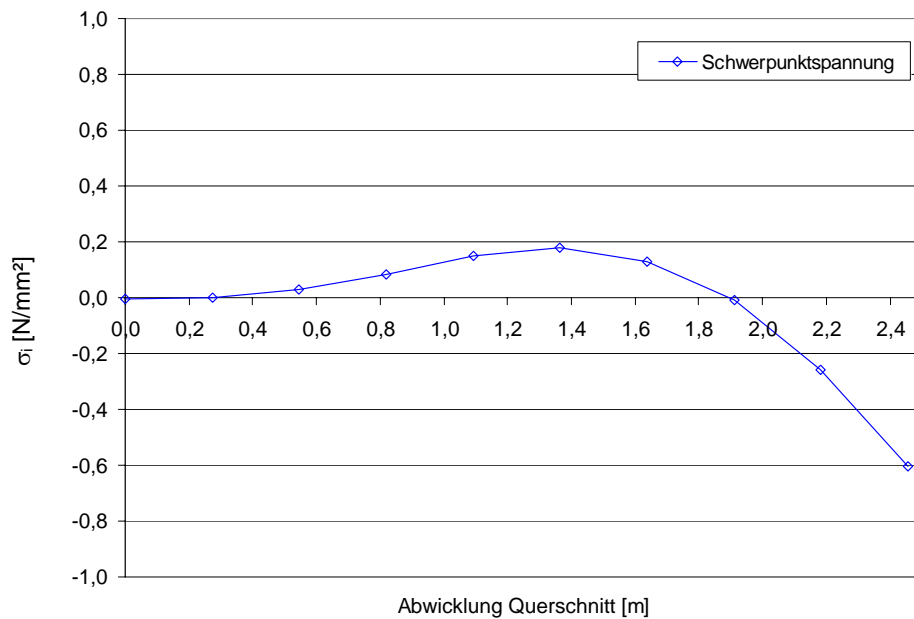


Bild 9-15 Abwicklung der Schwerpunktspannung der Holzdauben im Auflagerquerschnitt (Wasserinnendruck: $p = 1,5$ bar; Zeitpunkt F; $x = 0$ m: Rohrscheitel)

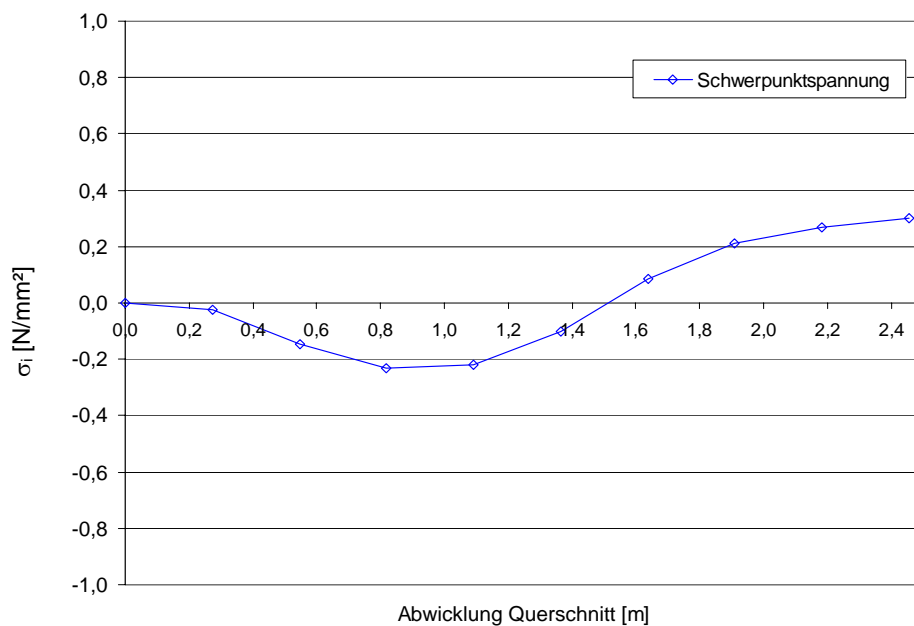


Bild 9-16 Abwicklung der Schwerpunktspannung der Holzdauben im Feldquerschnitt (Wasserinnendruck: $p = 1,5$ bar; Zeitpunkt F; $x = 0$ m: Rohrscheitel)

Die Darstellung bezieht sich auf die Abwicklung der Hälfte des Rohrquerschnittes. Im oberen Bereich der Rohrleitung sind die Schwerpunktspannungen sowohl im Auflagerquerschnitt als auch im Feldbereich sehr gering. Im unteren Teil des Rohrquerschnittes bildet sich ein wirksamer Bereich mit einer Druckzone im Auflagerbereich und einer Zugzone im Feldbereich. Die Größe des wirksamen Bereiches wird von Wasserinnendruck, Abstand der Spannringe und der Auflager beeinflusst.

9.6.6 Schubspannung der Holzdauben

Maximale Schubspannungen treten an der untersten Holzdaube am Sattel auf. Wie in Kapitel 9.6.4 beschrieben, gleicht das Trag- und Verformungsverhalten der untersten Holzdaube einem Durchlaufträger, dessen Auflager an der Stelle der Sättel starr und an den Stellen der Spannringe zwischen den Sätteln nachgiebig gelagert sind. Dementsprechend ist die maximale Schubspannung infolge Wasserinnendruck im Rohrquerschnitt rechtwinklig zur Rohrachse an der untersten Holzdaube an der Stelle des Sattels vorhanden. Bei einem Wasserinnendruck von 1,1 bar wurde eine maximale Schubspannung von $\tau = 0,78 \text{ N/mm}^2$ ermittelt.

9.6.7 Schubspannung in der Nut- und Federverbindung in Längsrichtung der Holzdauben

Die einzelnen Querschnittsteile wirken über Haftung in der Nut- und Federverbindung zwischen den einzelnen Holzdauben als Gesamtquerschnitt. Die Schubtragfähigkeit in der Nut- und Federverbindung in Längsrichtung der Holzdauben wird durch den Haftungskoeffizienten bestimmt. Bei der Auswertung der FE-Modellierung wurde die Haftbedingung kontrolliert; d.h. der Bemessungswert der Schubspannung in der Nut- und Federverbindung in Längsrichtung der Holzdauben muss kleiner sein als der Bemessungswert der Spannung, die nötig wäre für das Gleiten zweier Holzdauben. Der Fall der Grenzhftung wurde mit dem Produkt aus Haftungskoeffizient und Querdru ckspannung der Holzdauben in Umfangsrichtung berechnet. Mit dieser Kontrolle wird gewährleistet, dass ein Gleiten zweier Holzdauben nicht auftritt und somit die Dichtigkeit der Druckrohrleitung sichergestellt ist.

10 Bemessungskonzept

10.1 Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit

Für die Nachweise von Druckrohrleitungen aus Holz in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit müssen die Lastfälle Eigengewicht, Vorspannung, Wasserinnendruck (hydrostatisch bzw. instationär) und Quellen angesetzt werden. Bei erdverlegten Druckrohrleitungen sind zusätzlich Beanspruchungen aus Erddruck, Auflasten und Grundwasser zu berücksichtigen.

In Tabelle 10-1 sind zur Bestimmung der Bemessungswerte der Einwirkungen die Teilsicherheitsbeiwerte γ_F angegeben. Die Bemessungswerte der Einwirkungen sind nach Gleichung (46) zu berechnen.

$$F_d = \gamma_F \cdot F_k \quad (46)$$

Tabelle 10-1 Teilsicherheitsbeiwerte γ_F

Einwirkung	Teilsicherheitsbeiwert γ_F
Eigengewicht Holzdauben	1,35
Vorspannung	1,5
Quellen	1,5
hydrostatischer Wasserinnendruck	1,0
Druckstoß	1,5
sonstige Lasten (Auflasten, Verkehrslasten, etc.) bei erdverlegten Druckrohrleitungen	1,5

Das Eigengewicht der Holzdauben kann mit einer charakteristischen Rohdichte des wassergesättigten Holzes von $\rho_k = 1000 \text{ kg/m}^3$ und einem Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_F = 1,35$ nach Tabelle 10-1 berücksichtigt werden.

Die Bemessungswerte der Festigkeitseigenschaften der Holzdauben werden nach Gleichung (47) bestimmt. Die Rechenwerte der charakteristischen Festigkeitskennwerte können der DIN 1052 (08/2004) entnommen werden.

$$X_d = \frac{k_{\text{mod}} \cdot X_k}{\gamma_M} \quad (47)$$

Bauteile mit dauernder Durchfeuchtung werden nach DIN 1052 (08/2004) der Nutzungsklasse 3 zugewiesen. Die Klasse der Lasteinwirkungsdauer unterscheidet sich je nach Beanspruchung:

- Klasse der Lasteinwirkungsdauer „ständig“ für Beanspruchung aus Lastfallkombination Eigengewicht und hydrostatischem Druck (p);
- Klasse der Lasteinwirkungsdauer „sehr kurz“ für Beanspruchung aus Lastfallkombination Eigengewicht und Druckstoß ($p + \Delta p$).

Der Einfluss der Nutzungsklasse und der Klasse der Lasteinwirkungsdauer auf die Festigkeitseigenschaften von Holz wird in Gleichung (47) durch den Modifikationsbeiwert k_{mod} berücksichtigt. Für die Lastfallkombination Eigengewicht und hydrostatischer Druck ergibt sich nach DIN 1052 (08/2004) ein Modifikationsbeiwert von 0,50, für die Lastfallkombination Eigengewicht und Druckstoß von 0,90.

Für die Bemessung der Holzdauben im Grenzzustand der Tragfähigkeit ist die Lastfallkombination Eigengewicht und hydrostatischer Druck maßgebend, da der Einfluss des Modifikationsbeiwertes beim Nachweis weitaus größer ist als der Einfluss des Druckstoßes.

Für die Bemessung der Spannringe aus Stahl ist jedoch die Lastfallkombination Eigengewicht und Druckstoß maßgebend, da im Stahlbau keine Modifikationsbeiwerte beim Nachweis angesetzt werden.

Für die Bemessung von Druckrohrleitungen aus Holz sind die im Folgenden aufgeführten Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit zu führen. Die Beanspruchungen, die bei den Nachweisen zu berücksichtigen sind, werden in Kapitel 10.2 (aufgelagerte Druckrohrleitungen aus Holz) bzw. Kapitel 10.3 (erdverlegte Druckrohrleitungen aus Holz) angegeben.

Der Nachweis der Normalspannung im Spannring erfolgt nach DIN 18 800 Teil 1 (11/1990), Ab. (747). Beim Nachweis der Normalspannung im Spannring muss die Beanspruchung aus instationärer Strömung ($p + \Delta p$) berücksichtigt werden. Der Teilsicherheitsbeiwert ist mit $\gamma_M = 1,1$ anzusetzen.

$$\sigma_{R,d} = \frac{Z_{R,d}}{A} = \frac{Z_{R,d}}{b_R \cdot d_R} \leq f_{y,d} = \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} \quad (48)$$

Der Nachweis der Zugkraft im Spannschloss (aufgeschweißter Gewindebolzen) erfolgt nach DIN 18 800 Teil 1 (11/1990), Ab. (809). Ein gesonderter Nachweis der Schweißnaht ist erforderlich.

$$F_{S,d} \leq N_{R,d} = A_{Sp} \cdot \sigma_{1,R,d} \quad (49)$$

Der Nachweis der Querdruckspannung der Holzdauben in Umfangsrichtung erfolgt nach Gleichung (50):

$$\sigma_{c,90,U,d} = \frac{F_{c,90,U,d}}{d_D} \leq f_{c,90,d} = \frac{k_{\text{mod}} \cdot f_{c,90,k}}{\gamma_M} \quad (50)$$

Der Nachweis der Querdruckspannung der Holzdauben in radialer Richtung wird nach Gleichung (51) erbracht. Für die Ermittlung der wirksamen Querdruckfläche A_{ef} wird das Maß der tatsächlichen Aufstandslänge (= Breite des Spannrings) in Faserichtung des Holzes nach DIN 1052 (08/2004) Ab. 10.2.4 an jedem Rand um 30 mm verlängert. Der Querdruckbeiwert $k_{c,90}$ wird für Vollholz bei Schwellendruck mit 1,25 angesetzt.

$$\sigma_{c,90,\text{rad},d} = \frac{F_{c,90,\text{rad},d}}{A_{\text{ef}}} \leq k_{c,90} \cdot f_{c,90,d} = k_{c,90} \cdot \frac{k_{\text{mod}} \cdot f_{c,90,k}}{\gamma_M} \quad (51)$$

Der kombinierte Nachweis für die maximal beanspruchte Holzdaube auf Biegung und Druck erfolgt nach Gleichung (52).

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (52)$$

Der Nachweis der Schubspannung der Holzdauben infolge Wasserinnendruck im Rohrquerschnitt rechtwinklig zur Rohrachse an der Stelle eines Spannrings ist nach Gleichung (53) zu führen. Die maßgebende Querkraft wird im Abstand d_D (= Daubendicke) vom Auflagerrand (= Spannringrand) nach DIN 1052 (08/2004) Ab. 10.2.9 bestimmt.

$$\tau_d = 1,5 \cdot \frac{V_d}{A} = 1,5 \cdot \frac{V_d}{d_D \cdot b_D} \leq f_{v,d} = \frac{k_{\text{mod}} \cdot f_{v,k}}{\gamma_M} \quad (53)$$

Die Schubspannungen in der Nut- und Federverbindung in Längsrichtung der Holzdauben werden bei aufgelagerten Druckrohrleitungen aus Holz durch die Kontrolle der Haftbedingung nachgewiesen: der Bemessungswert der vorhandenen Schubspannung muss kleiner sein als der Bemessungswert der Spannung, die nötig wäre für das Gleiten zweier Holzdauben.

10.2 Bemessung von aufgelagerten Druckrohrleitungen aus Holz

Für die Bemessung von Druckrohrleitungen aus Holz, die auf Sätteln aufgelagert sind, wurde mit Hilfe des FE-Modells (vgl. Kapitel 9) eine Parameterstudie durchge-

führt. Folgende Parameter wurden zur Bestimmung des Trag- und Verformungsverhaltens von aufgelagerten Druckrohrleitungen aus Holz variiert:

- Rohrinne Durchmesser d_i ;
- Wasserinnendruck p ;
- Abstand der Spannringe e_R ;
- Maße der Holzdauben (b_D/d_D) und der Spannringe (b_R/d_R);
- Auflagerabstand e_S .

Der Abstand der Auflager wurde bisher in der Praxis mit einem Verhältnis von Daubenlänge zu Auflagerabstand von $\ell_D / e_S \geq 2$ gewählt. Bei einer üblichen Daubenlänge von 4,0 m ergibt sich somit ein maximaler Auflagerabstand von 2,0 m. Im Rahmen der FE-Modellierung wurde auch der Einfluss des Auflagerabstandes auf das Trag- und Verformungsverhalten von Druckrohrleitungen aus Holz untersucht. Die Parameterstudien ergaben, dass wirtschaftliche Konstruktionen bis zu einem Verhältnis von Daubenlänge zu Auflagerabstand von $\ell_D / e_S \geq 1$ möglich sind, wobei der Auflagerabstand auf maximal 4,0 m begrenzt wurde.

Die Eingangsgrößen für die Modellierung von Druckrohrleitungen aus Holz können aus Kapitel 9 entnommen werden. Für das Bemessungskonzept wurden die Steifigkeitskennwerte des Elastizitätsmoduls und Schubmoduls aus DIN 1052 (08/2004) für Nadelholz der Festigkeitsklasse C24 entnommen. Für den Einbauzustand (Holzdauben mit einer Holzfeuchte von ca. 16 %) wurden diese Steifigkeitskennwerte nach DIN EN 384 (05/2004) mit 2 %/‰ Δu abgemindert. Der Einfluss der Holzfeuchte über dem Fasersättigungsbereich wurde durch Abminderung der Steifigkeitskennwerte nach DIN 1052 (08/2004) um den Faktor 1/4 (Kapitel 4.1) berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Parameterstudie wurden in Bemessungstabellen (Tabelle F1 bis Tabelle F21 in Anhang F) zusammengefasst, die eine schnelle Bemessung von aufgelagerten Druckrohrleitungen aus Holz ermöglichen. Nach Kapitel 11.3 kann mittels der gegebenen Wassermenge, der Fallhöhe und der Leitungslänge der optimale Rohrinne Durchmesser bestimmt werden. In Abhängigkeit vom Wasserinnendruck kann der maximale Spannringabstand für eine Druckrohrleitung aus Holz mit einem bestimmten Innendurchmesser mit Hilfe der Bemessungstabellen ermittelt werden. Der Abstand der Spannringe kann über die Leitungslänge dem Verlauf des hydrostatischen Wasserinnendruckes angepasst werden. Voraussetzungen für die Anwendung der Bemessungstabellen sind:

- Berücksichtigung der Angaben der jeweiligen Bemessungstabelle bezüglich Holzdaube, Spannring und Spanschluss;
- Länge der Holzdauben beträgt mindestens 4,0 m;
- Abstand der Auflager beträgt maximal 4,0 m;
- Verhältnis von Daubenlänge zu Auflagerabstand ist mindestens 1,0;

- jeweils die Hälfte der Holzdauben wird in einem Querschnitt gestoßen;
- mittlere Breite der Holzdauben sollte zwischen 10 cm und 15 cm betragen;
- Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte der Holzdauben entsprechen den Anforderungen der Festigkeitsklasse C24 für Nadelholz nach DIN 1052 (08/2004);
- Winkel am Auflager, der die Druckrohrleitung im unteren Bereich umschließt, beträgt mindestens 90°;
- über dem Auflager befindet sich jeweils ein Spannring;
- Verwendung von feuerverzinkten Flachstahlbändern für die Stahlringe (S235 bzw. S355).

Beim Nachweis der Spannringe und der Spannschlösser in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit muss die Druckhöhe $p + \Delta p$, welche aufgrund des Druckstoßes entsteht, angesetzt werden. Der Nachweis der Holzdauben kann mit der hydrostatischen Druckhöhe p geführt werden. Für die folgenden Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit ist der Ausnutzungsgrad in den Bemessungstabellen angegeben:

Spannring: - Normalspannung im Spannring (σ_R)
 - Zugkraft im Spannschloss (F_S)

Holzdauben: - Querdruckspannung in Umfangsrichtung ($\sigma_{c,90,U}$)
 - Querdruckspannung in radialer Richtung ($\sigma_{c,90,rad}$)
 - Biegung und Druck (σ) (Interaktion)
 - Schubspannung (τ)

Innerhalb einer Bemessungstabelle dürfen die Werte für den jeweiligen Spannringabstand zwischen den Druckhöhen linear interpoliert werden. Exemplarisch ist in Bild 10-1 bis Bild 10-6 der Ausnutzungsgrad für die in den Bemessungstabellen geführten Nachweise in Abhängigkeit von Spannringabstand und Wasserinnendruck für eine Druckrohrleitung mit einem Innendurchmesser von 1,0 m dargestellt (Tabelle F1 in Anhang F) (Holzdaube $d_D = 70\text{mm}$, C24; Spannring $b_R/d_R = 60/6\text{mm}$, S235; Spannschloss M27, S235).

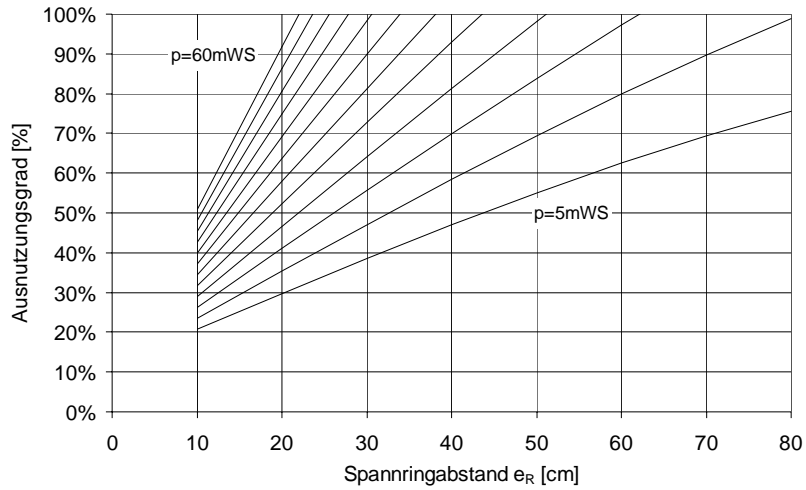


Bild 10-1 Nachweis der Normalspannung im Spannring (σ_R)

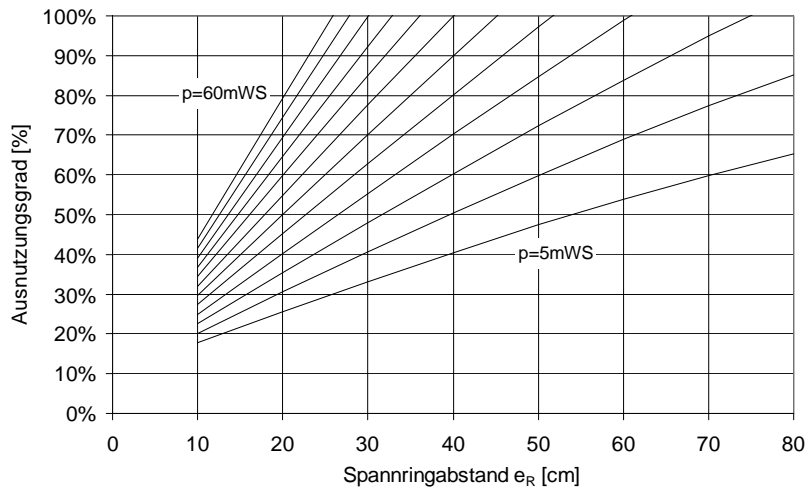


Bild 10-2 Nachweis der Zugkraft im Spannschloss (F_S)

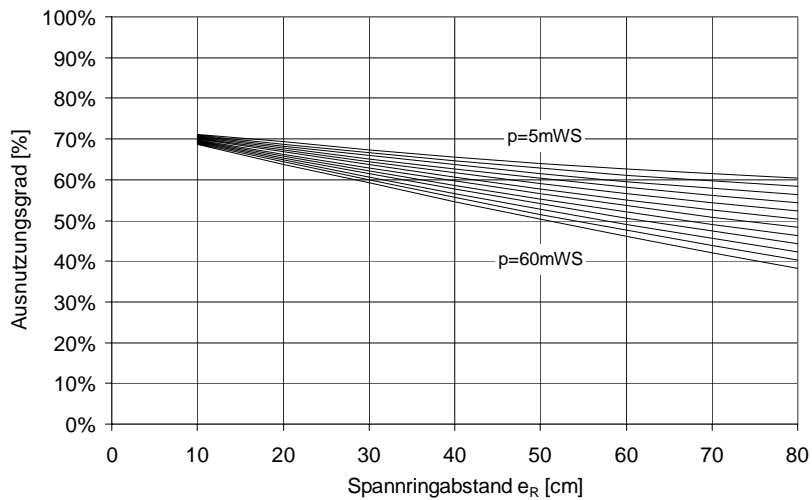


Bild 10-3 Nachweis der Querdruckspannung in Umfangsrichtung ($\sigma_{c,90,U}$)

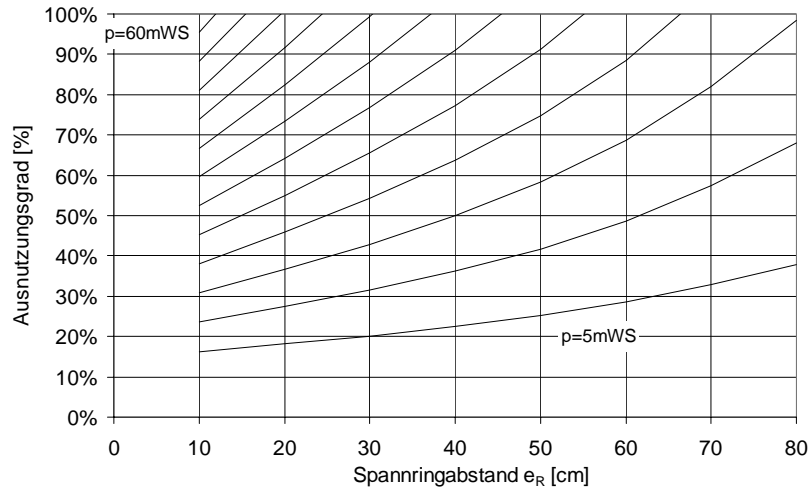


Bild 10-4 Nachweis der Querdruckspannung in radialer Richtung ($\sigma_{c,90,rad}$)

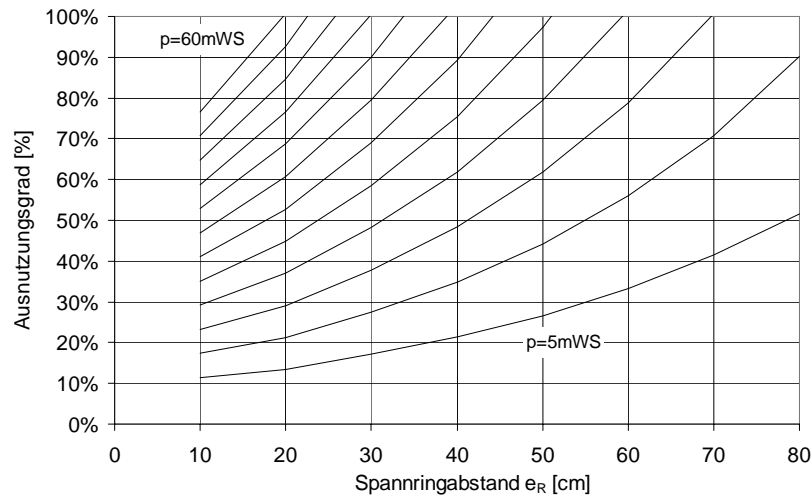


Bild 10-5 Nachweis von Biegung und Druck (σ) (Interaktion)

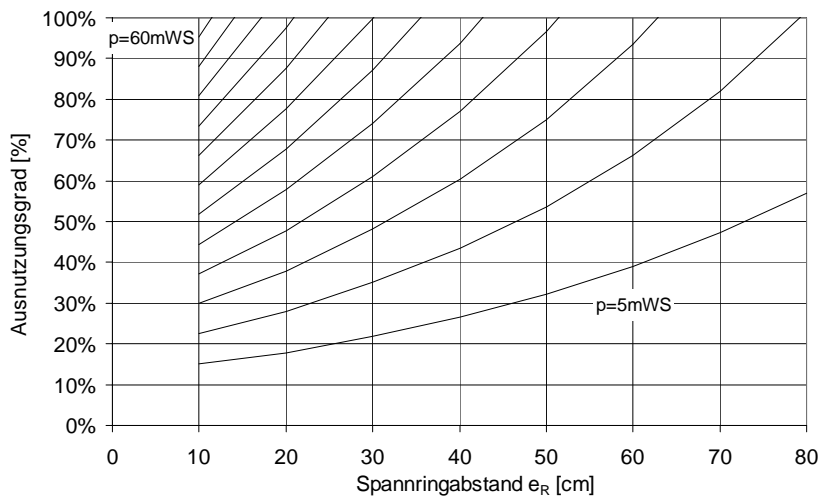


Bild 10-6 Nachweis der Schubspannung (τ)

10.3 Bemessung von erdverlegten Druckrohrleitungen aus Holz

Für die Bemessung von erdverlegten Druckrohrleitungen aus Holz sind die Beanspruchungen aus Eigengewicht, Vorspannung, Wasserinnendruck, Quellschwellendruck, Auflasten sowie die Auswirkungen der Bodeneigenschaften und der Einbauverhältnisse auf das Trag- und Verformungsverhalten der Rohrleitung zu berücksichtigen. Die aufgrund dieser Einwirkungen entstehenden Beanspruchungen der Rohrleitung werden mit dem Tragwiderstand unter Berücksichtigung von Teilsicherheitsbeiwerten nach Kapitel 10.1 verglichen.

Für die Bemessung von erdverlegten Druckrohrleitungen aus Holz wird der Gesamtbeanspruchungszustand in Teillastfälle aufgeteilt, die unabhängig voneinander betrachtet werden können (Bild 10-7):

- Lastfall 1: Beanspruchung der Rohrleitung in Längsrichtung als elastisch gebetteter Biegeträger
- Lastfall 2: Beanspruchung des Rohrquerschnitts infolge Erddruck und Auflasten
- Lastfall 3: Beanspruchung des Rohrquerschnitts infolge Vorspannung, Wasserinnendruck und Quellschwellendruck

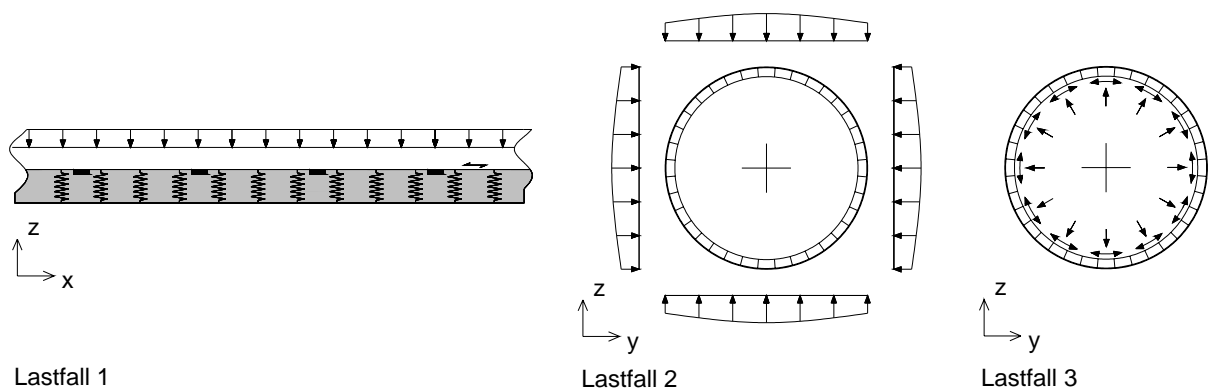


Bild 10-7 Lastfälle für die Bemessung von erdverlegten Druckrohrleitungen aus Holz

Die Aufteilung der Lastfälle ermöglicht eine analytische Vorgehensweise bei der Bemessung von erdverlegten Druckrohrleitungen aus Holz. Unter der Annahme von linear-elastischem Materialverhalten können somit an den maximal beanspruchten Stellen der Druckrohrleitung die Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit durchgeführt werden.

10.3.1 Beanspruchung der Rohrleitung in Längsrichtung

Die Beanspruchung einer erdverlegten Druckrohrleitung aus Holz in Längsrichtung ist in erster Linie von Wasserinnendruck und Spannringabstand abhängig. Für den

Spannungsnachweis wird eine Holzdaube als Durchlaufträger mit Spannringen in gewissen Abständen als Auflager betrachtet. Das statische System für die Berechnung der Schnittgrößen ist in Bild 10-8 dargestellt.

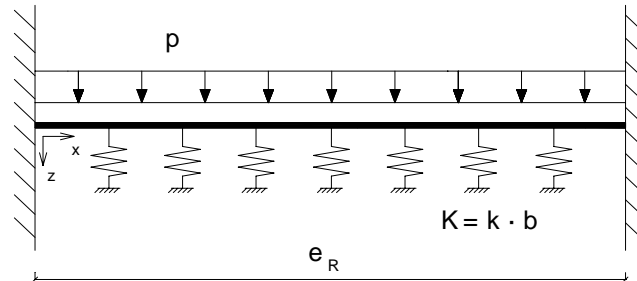


Bild 10-8 Beanspruchung der Rohrleitung in Längsrichtung als elastisch gebetteter Biegeträger (e_R = Spannringabstand)

Die Beanspruchung infolge Wasserinnendruck kann als Streckenlast abgebildet werden. Die elastische Bettung der Rohrleitung wird durch den Bettungsmodul des Baugrunds berücksichtigt. Der Bettungsmodul ist als Quotient aus Sohlpressung und Setzung definiert. Da der Bettungsmodul keine reine Bodenkenngröße ist, sondern von weiteren Faktoren wie Lasteinwirkung, Lastfläche und Bodenschichtung abhängig ist, werden für unterschiedliche Bodenarten Grenzwerte angegeben (z.B. Kies mit Sand: $k = 80.000 - 200.000 \text{ kN/m}^3$). Aufgrund des statischen Systems des beidseits eingespannten Balkens mit elastischer Bettung treten in der Kontaktzone zwischen Holzdaube und Baugrund nur Druckspannungen (Sohlpressungen) auf. Diese Sohlpressung entlastet als zusätzliche Streckenlast den Balken. Die Differentialgleichung des elastisch gebetteten Balkens ist in Gleichung (54) angegeben.

$$EI \cdot w''''(x) = p(x) - K \cdot w(x) \quad (54)$$

Mit dem dimensionslosen Abklingfaktor

$$\lambda = e_R \cdot \sqrt[4]{\frac{K}{4 \cdot EI}} \quad (55)$$

ergibt sich Gleichung (54) zu:

$$w''''(x) + 4 \cdot \left(\frac{\lambda}{e_R}\right)^4 \cdot w(x) = \frac{p(x)}{EI} \quad (56)$$

Die Gesamtlösung von Gleichung (56) setzt sich aus einem homogenen und einem partikulären Anteil zusammen. Für die Belastung mit konstanter Streckenlast können die Schnittgrößen an der Stelle der Einspannung mit Hilfe der Gleichungen (57) und (58) sowie den Vorfaktoren aus Tabelle 10-2 berechnet werden.

$$M_S = \kappa_1 \cdot p \cdot e_R^2 \quad (57)$$

$$Q_S = \kappa_2 \cdot p \cdot e_R \quad (58)$$

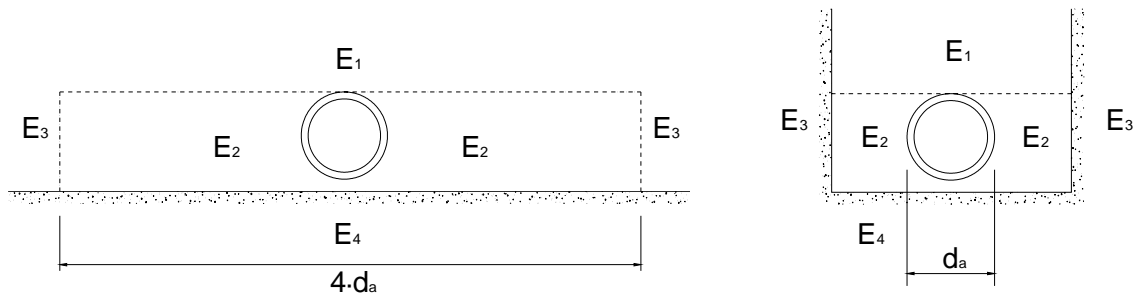
Tabelle 10-2 Vorfaktoren für Schnittgrößenberechnung

λ	κ_1	κ_2
0	-0,08333	0,50000
1	-0,08274	0,49724
2	-0,07489	0,46056
3	-0,05401	0,36282
4	-0,03303	0,26346
5	-0,02052	0,20186
6	-0,01393	0,16611
7	-0,01018	0,14249
8	-0,00780	0,12493
9	-0,00617	0,11113
10	-0,00500	0,10001

10.3.2 Beanspruchung des Rohrquerschnitts infolge Erddruck und Auflasten

Die statische Bemessung von erdverlegten Rohrleitungen in offener Bauweise für die Beanspruchung infolge Erddruck und Auflasten kann in Anlehnung an die Richtlinien des ATV-DVWK-A 127 (08/2000) durchgeführt werden. Das Berechnungsverfahren berücksichtigt unterschiedliche Rohrsteifigkeiten, Bodenverhältnisse und Einbau- bzw. Überschüttungsbedingungen.

Die Belastung von erdverlegten Rohrleitungen ist u.a. von den vorhandenen Umgebungsbedingungen und den Wechselwirkungen zwischen Rohr und Boden abhängig. Die mechanische Interaktion zwischen Boden und Rohr ist aufgrund der Abstützwirkung des Bodens für das Strukturverhalten der Rohrleitung von besonderer Bedeutung. Bei der Bemessung von erdverlegten Rohrleitungen werden üblicherweise konstante Verformungsmoduln für die Berücksichtigung der Bodensteifigkeit verwendet. Zur Beschreibung dieser Zusammenhänge werden die in Bild 10-9 dargestellten Bodenzonen voneinander unterschieden:



Zone 1: Überschüttung über dem Rohrscheitel

Zone 2: Leitungszone seitlich des Rohres

Zone 3: anstehender Boden neben dem Graben bzw. eingebauter Boden neben der Leitungszone

Zone 4: Boden unter dem Rohr

Bild 10-9 Einteilung der Bodenzonen und zugehörige Verformungsmoduln

Nach der Silotheorie können sich in der Verfüllzone Spannungsumlagerungen zum gewachsenen Erdreich hin ergeben, die die einwirkenden vertikalen Belastungen abmindern. Dabei wird davon ausgegangen, dass durch Setzungen des Erdreichs in der Verfüllzone während des Verfüllvorgangs vertikale Scherkräfte entlang dieser Zone hervorgerufen werden (Bild 10-10). Durch diese Scherkräfte wird ein Teil der vertikalen Belastungen auf das umgebende Erdreich umgelagert und die Belastung über dem Rohr abgemindert. Die Reibungskräfte in den Grabenwänden werden über Abminderungsbeiwerte κ (für Erdlasten) bzw. κ_0 (für gleichmäßig verteilte Flächenlasten) berücksichtigt.

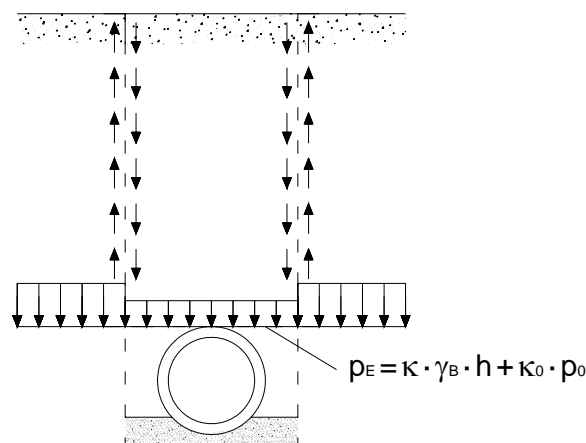


Bild 10-10 Scherkräfte entlang der Grabenwände infolge von Setzungen während des Verfüllvorgangs (Silotheorie)

Erdverlegte Druckrohrleitungen aus Holz können in Anlehnung an ATV-DVWK-A 127 (08/2000) als biegeweich bezeichnet werden, da bei einer Vertikalbelastung das Rohr eine Ovalisierung erfährt und sich gegen den Boden abstützen kann. Der dabei

aktivierte Bettungsreaktionsdruck (passiver Erddruck) behindert eine weitere horizontale Verformung und stützt somit das Rohr. Die Ovalisierung des Rohrquerschnittes bei Belastung steigt mit abnehmender Bodensteifigkeit und Verdichtung der Verfüllung, da die Abstützwirkung des Bodens gegen die Rohrverformung vermindert wird. Infolge des Bettungsreaktionsdruckes ist die Steifigkeit der Rohrleitung von den Bodeneigenschaften in der Rohrleitungszone abhängig. Diese Wechselwirkung zwischen Rohrleitung und Boden beeinflusst die Lastverteilung in der Rohrscheitelebene (Bild 10-11). Maßgebend für die Spannungsumlagerung sind die Eigenschaften der Rohrleitung, deren Ausladung, die Rohrbettung, die Geometrie des Rohrgrabens, die Art der Grabenverfüllung und die mechanische Eigenschaften des Bodens. Die Konzentrationsfaktoren λ , die von Rohr- und Bodeneigenschaften abhängig sind, bilden die Grundlage für die Erdlastermittlung.

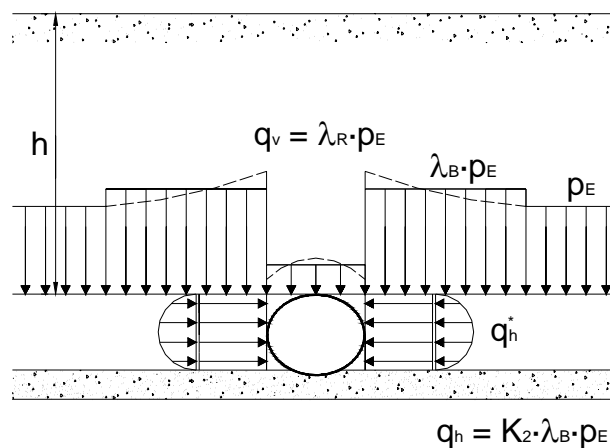


Bild 10-11 Umlagerung der Bodenspannungen bei biegeweichen Rohren

Das Rechenmodell aus ATV-DVWK-A 127 (08/2000) basiert auf der Annahme eines elastisch gebetteten schubsteifen Balkens nach Leonhardt (1973). Die Beschreibung des Bodenverhaltens erfolgt über das Mohr-Coulomb-Modell unter Berücksichtigung einer elastischen Spannungs-Dehnungs-Beziehung des Bodens bei Druckbeanspruchung. Die Umlagerung von Bodenspannungen wird durch den Ansatz von Konzentrationsfaktoren berücksichtigt.

Für die Bemessung der Rohrleitung im Lastfall 2 bei Beanspruchung infolge Erd- druck, Auflasten (Verkehrslasten, konzentrierte Flächenlasten) und sonstigen Lasten (z.B. Grundwasser) wird eine Systemsteifigkeit angesetzt. Diese Systemsteifigkeit beschreibt das Zusammenwirken von Rohrverformungen, d.h. die Aktivierung des horizontalen Bettungsreaktionsdruckes in Abhängigkeit der Bettungssteifigkeit und der Rohrsteifigkeit. Die Steifigkeit des Rohrquerschnitts wird unter Berücksichtigung des Elastizitätsmoduls rechtwinklig zur Faserrichtung und der Daubendicke bestimmt. Die Beanspruchung der Rohrleitung ergibt sich somit aus den vertikalen Ge-

samtlasten und dem Seitendruck sowie dem aus der Rohrverformung resultierenden horizontalen Bettungsreaktionsdruck (Bild 10-12). Die Druckverteilung am Rohrfumfang kann nach Anhang G bestimmt werden.

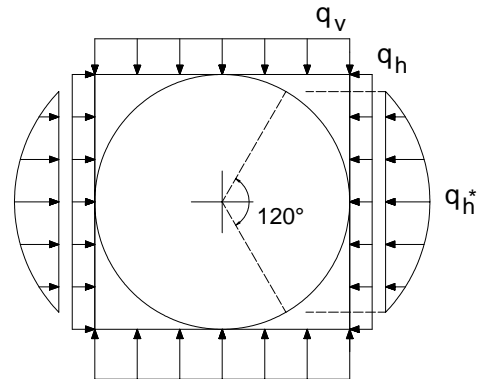


Bild 10-12 Beanspruchung des Rohrquerschnittes

Bei unterschiedlicher vertikaler und horizontaler Belastung der Rohrleitung entsteht zusätzlich zu der mittigen Querdruckbeanspruchung der Holzdauben in Umfangsrichtung eine Momentenbeanspruchung des Rohrquerschnittes. Da zwischen zwei Holzdauben in Umfangsrichtung des Rohrquerschnittes nur Druckkräfte übertragen werden, kann diese Beanspruchung zu einer klaffenden Fuge zwischen den Dauben führen. Der verbleibende druckbeanspruchte Restquerschnitt der Holzdaube besitzt die Daubendicke $d_{D,ef}$. Das zulässige Maß der klaffenden Fuge wird auf maximal ein Drittel der Daubendicke d_D begrenzt.

Die Querdruckspannung der Holzdauben in Umfangsrichtung der Rohrleitung unter der Beanspruchung infolge Erddruck, Auflasten und äußerem Wasserdruck (Lastfall 2) wird nach Gleichung (59) bestimmt. Dabei ist q für die ungünstigste Lastfallkombination zu ermitteln (Anhang G).

$$\sigma_{c,90,U} = \frac{n \cdot q \cdot r_{innen}}{d_{D,ef}} + \frac{6 \cdot m \cdot q \cdot r_{innen}^2}{d_{D,ef}^2} \quad (59)$$

Der Stabilitätsnachweis für erdverlegte Druckrohrleitungen aus Holz im Lastfall 2 wird durch Überlagerung der Beanspruchungen infolge Erddruck, Auflasten und äußerem Wasserdruck geführt (Gleichung (60)). Die kritische Beullast und die kritische Durchschlagslast können in Anlehnung an ATV-DVWK-A 127 (08/2000) bestimmt werden (Anhang G).

$$\gamma = \frac{1}{\frac{q_{v,A}}{\text{krit } q_v} + \frac{p_a}{\text{krit } p_a}} \geq \gamma_{erf} \quad (60)$$

10.3.3 Beanspruchung des Rohrquerschnitts infolge Vorspannung, Wasserinnendruck und Quellungsdruck

Bei der Bemessung von erdverlegten Druckrohrleitungen aus Holz werden im Lastfall 3 die Beanspruchungen aus Vorspannung, Wasserinnendruck und Quellungsdruck für den Nachweis des Rohrquerschnitts rechtwinklig zur Rohrachse berücksichtigt.

Vorspannung und Quellungsdruck erzeugen Zwängungsspannungen in Form von Druckspannungen rechtwinklig zur Faserrichtung der Holzdauben in Umfangsrichtung der Rohrleitung sowie Zugspannungen in den Stahlringen. Die Beanspruchungen können mit Hilfe des theoretischen Berechnungsansatzes aus Kapitel 8 berechnet werden.

Die Querdruckspannungen der Holzdauben und die Zugspannungen in den Stahlringen werden des Weiteren durch den Wasserinnendruck beeinflusst. Die Querdruckspannungen in den Holzdauben in Umfangsrichtung der Rohrleitung werden bei steigendem Wasserinnendruck infolge der Rohraufweitung abgemindert, während die Zugspannungen in den Stahlringen zunehmen.

Die Zugspannungen in den Stahlringen infolge Wasserinnendruck werden mit Hilfe der Kesselformel erfasst (Gleichung (14)). Beim Nachweis der Normalspannung im Spannring muss zusätzlich die Beanspruchung aus instationärer Strömung ($p + \Delta p$) berücksichtigt werden. Die Belastung der Spannringe infolge Vorspannung und Quellen kann nach dem theoretischen Berechnungsansatz (Kapitel 8) bestimmt werden.

11 Hydraulik von Rohrleitungssystemen

11.1 Wirkungsweise von Kleinwasserkraftanlagen

Die Nutzung von Wasserkraft durch Kleinwasserkraftanlagen hat im Hinblick auf die begrenzten fossilen Energieträger wieder zunehmend an Bedeutung gewonnen. Die elektrische Leistung, die mit Hilfe einer Druckrohrleitung aus Holz und einer Kleinwasserkraftanlage erzeugt wird, kann mittels der Fallhöhe unter Berücksichtigung der Energieverluste nach Gleichung (61) berechnet werden. Bei Kleinwasserkraftanlagen beträgt die Leistung in der Regel weniger als ein Megawatt. Die Anlagen werden je nach Nutzfallhöhe in Niederdruckanlagen (Fallhöhe < 15 m) oder Mitteldruckanlagen (Fallhöhe 15 m bis 50 m) unterteilt. Bei Hochdruckanlagen mit Fallhöhen größer als 50 m sind Druckrohrleitungen aus Holz in der Regel unwirtschaftlich. Bei Niederdruckanlagen werden überwiegend Durchström-, Rohr-, Kaplan- und Propellerturbinen eingesetzt.

In Bild 11-1 ist schematisch die Wirkungsweise eines Kleinwasserkraftwerkes dargestellt. Bild 11-2 zeigt Details (a bis f) einer Kleinwasserkraftanlage in Island, die mit Hilfe einer 300 m langen Druckrohrleitung aus Holz (Durchmesser 1,10 m) über eine Bruttofallhöhe H von 22 m eine Leistung von ca. 250 kW erzeugt. Die Details a bis f sind zusätzlich in Bild 11-1 gekennzeichnet.

$$P_T = \eta_T \cdot \eta_G \cdot \eta_{Tr} \cdot \eta_K \cdot \rho_W \cdot g \cdot Q \cdot H_n \quad (61)$$

Maßgebend für die Leistung von Wasserkraftanlagen ist der Wirkungsgrad der eingesetzten Bauteilkomponenten:

- Wirkungsgrad Turbine: $\eta_T \approx 0,70 - 0,90$
- Wirkungsgrad Generator: $\eta_G \approx 0,85 - 0,95$
- Wirkungsgrad Transformator: $\eta_{Tr} \approx 0,99$
- Wirkungsgrad Kupplung: $\eta_K \approx 0,97 - 0,99$

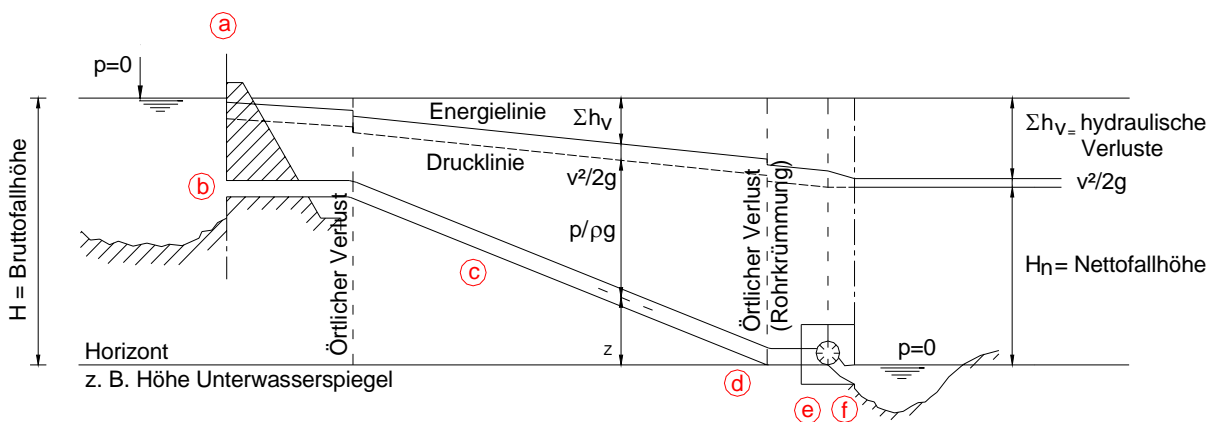


Bild 11-1 Prinzipskizze eines Kleinwasserkraftwerkes

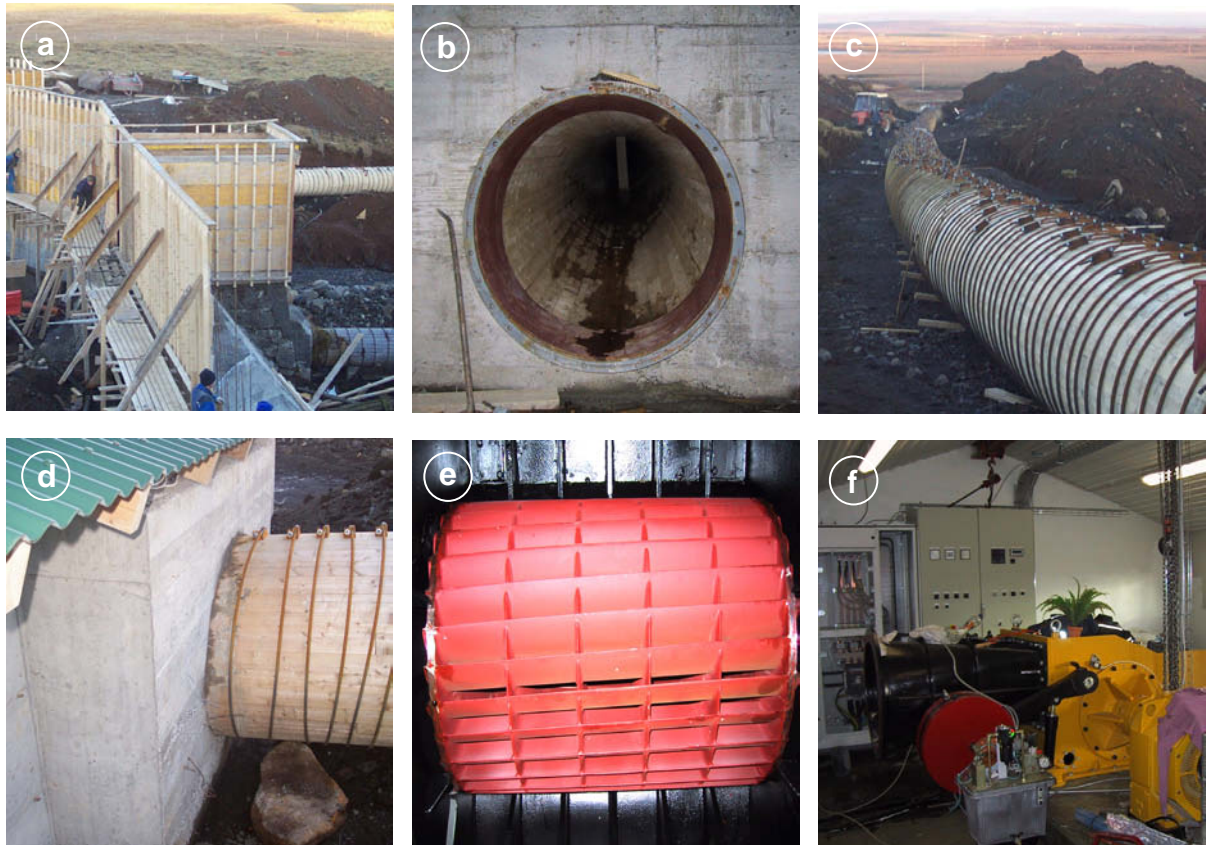


Bild 11-2 Details (a bis f) eines Kleinwasserkraftwerkes in Island

11.2 Strömungswiderstand und Rohrleitungsverluste

Die Leitung einer Flüssigkeit durch eine Rohrleitung hat erfahrungsgemäß einen Druckhöhenverlust zur Folge (Bild 11-3). Die Grundlage zur Berechnung von kontinuierlichen Energieverlusten im geraden Kreisrohr bildet Gleichung (62) nach Darcy-Weisbach:

$$h_v = l_e \cdot L = \left(\lambda \cdot \frac{1}{d_i} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \right) \cdot L \quad (62)$$

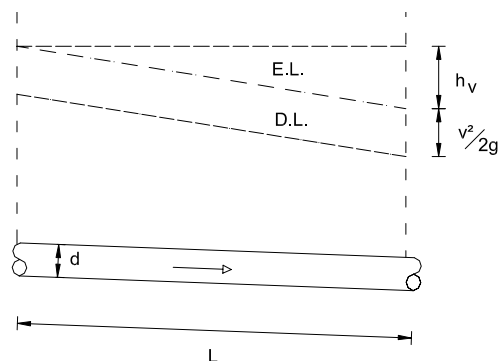


Bild 11-3 Prinzipskizze von Energie- und Drucklinie

Der Rohrreibungsbeiwert λ ist eine dimensionslose Kennzahl. Zur Berechnung von λ erfolgt eine Unterteilung in verschiedene Strömungsbereiche nach Tabelle 11-1. Die von den in Tabelle 11-1 angegebenen Gleichungen für λ beschriebenen Gesetzmäßigkeiten werden im Moody-Diagramm graphisch dargestellt (Anhang H). Bei laminarer Strömung strömt eine Flüssigkeit mit sehr geringer Geschwindigkeit durch eine Rohrleitung. In zur Rohrachse konzentrischen, zylindrischen Schichten herrschen gleiche Geschwindigkeiten. Laminare Strömungen sind in der Praxis nur selten anzutreffen, da sie mit Sicherheit nur bei Reynoldszahlen $Re \leq 2320$ auftreten. Wird der kritische Wert $Re = 2320$ überschritten, überlagert sich der geordneten Schichtströmung eine unregelmäßig wirbelnde Nebenbewegung und es entstehen Geschwindigkeitsschwankungen und Querbewegungen (turbulente Strömung). Die Reynoldszahl Re ist eine dimensionslose Strömungszahl. Für Rohre mit Kreisquerschnitt gilt Gleichung (63):

$$Re = \frac{v \cdot d_i}{\nu_w} \quad (63)$$

Tabelle 11-1 Berechnung des Rohrreibungsbeiwertes λ

Strömung	Rohrreibungsbeiwert λ	
Laminar ($Re < 2320$)	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \frac{Re \cdot \sqrt{\lambda}}{64}$ oder $\lambda = \frac{64}{Re}$	$\lambda = \lambda (Re)$
turbulent ($Re > 2320$)	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2,0 \cdot \lg(Re \cdot \sqrt{\lambda}) - 0,8$	hydraulisch glatt ($k \rightarrow 0$) $\lambda = \lambda (Re)$
	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2,0 \cdot \lg\left(\frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{k_s/d}{3,71}\right)$	Übergangsbereich $\lambda = \lambda (Re, k_s / d)$
	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2,0 \cdot \lg\left(\frac{k_s}{d}\right) + 1,14$	vollkommen rau ($Re \rightarrow \infty$) $\lambda = \lambda (k_s / d)$
Grenze zwischen Übergangsbereich und vollkommen rauem Bereich	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \frac{Re \cdot k_s}{200 \cdot d}$	

Die äquivalente Sandrauigkeit k_s zur Ermittlung des Rohrreibungsbeiwertes λ beträgt für gehobeltes Holz 0,30 mm (Dracos (1990)). Während die äquivalente Sandrauigkeit bei Stahlrohren von 0,04 mm bis 0,10 mm im neuen Zustand auf 0,50 mm bis 2,50 mm im gebrauchten Zustand und bei Betonrohren von 0,10 mm bis 0,15 mm auf 0,20 mm bis 0,30 mm ansteigt, verringert sich diese bei Holzrohren mit zunehmender Betriebsdauer. Durch Ausbildung einer natürlichen Schicht an der Rohrwandung werden die Reibungsverluste minimiert.

Zusätzlich zu den kontinuierlichen Energieverlusten im geraden Kreisrohr können örtliche Energieverluste nach Gleichung (64) auftreten:

$$h_v = \zeta_e \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (64)$$

Der Energieverlustbeiwert ζ_e beträgt nach Idelchik (1986) und Miller (1990):

- Energieverlust bei einem Rechen vor dem Einlauf:
zusätzliche örtliche Verlusthöhe von 0,10 m für selten gereinigte Rechen
zusätzliche örtliche Verlusthöhe von 0,05 m für häufig gereinigte Rechen
- Energieverlust am Rohreinlauf:
bei nicht erweitertem Einlauf mit rechtwinkligen Kanten: $\zeta_e = 0,50$
- Energieverlust bei Richtungsänderung:
Krümmungsradius / Rohrdurchmesser = 2; Umlenkwinkel = 15°: $\zeta_e = 0,03$
Krümmungsradius / Rohrdurchmesser = 10; Umlenkwinkel = 15°: $\zeta_e = 0,03$
Krümmungsradius / Rohrdurchmesser = 2; Umlenkwinkel = 90°: $\zeta_e = 0,14$
Krümmungsradius / Rohrdurchmesser = 10; Umlenkwinkel = 90°: $\zeta_e = 0,11$
- Energieverlust bei Querschnittsänderungen:
Erweiterung: $\zeta_e = (1 - A_1 / A_2)^2$
Verengung: $\zeta_v = 0,5 \cdot (1 - A_2 / A_1)^{3/4}$
- Energieverlust infolge vorhandener Armaturen, Verschlussorgane etc.

11.3 Vordimensionierung von Druckrohrleitungen aus Holz

Mit Hilfe der gegebenen Wassermenge Q kann aus Bild 11-4 näherungsweise die Strömungsgeschwindigkeit v und die Neigung der Energielinie I_e in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers bestimmt werden. Die Neigung der Energielinie multipliziert mit der Länge der Druckrohrleitung ergibt den Energiehöhenverlust h_v infolge Reibung, welcher bei der Berechnung der elektrischen Leistung einer Wasserkraftanlage berücksichtigt werden muss.

Der optimale Rohrrinnendurchmesser d_i ist abhängig von der Fallhöhe H , der Wassermenge Q und der Leitungslänge L . Mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit v steigen auch die Reibungsverluste. Aufgrund der in der Praxis ausgeführten relativ großen Rohrdurchmesser bei Druckrohrleitungen aus Holz treten nur geringe Strömungsgeschwindigkeiten auf. Nach Rabovsky (1926) ist in Bild 11-4 eine graphische Darstellung der Scobey'schen Formel (65) zur Vordimensionierung für Druckrohrleitungen aus Holz angegeben.

$$I_e = 0,000885 \cdot \frac{v^{1,8}}{d_i^{1,17}} \quad (65)$$

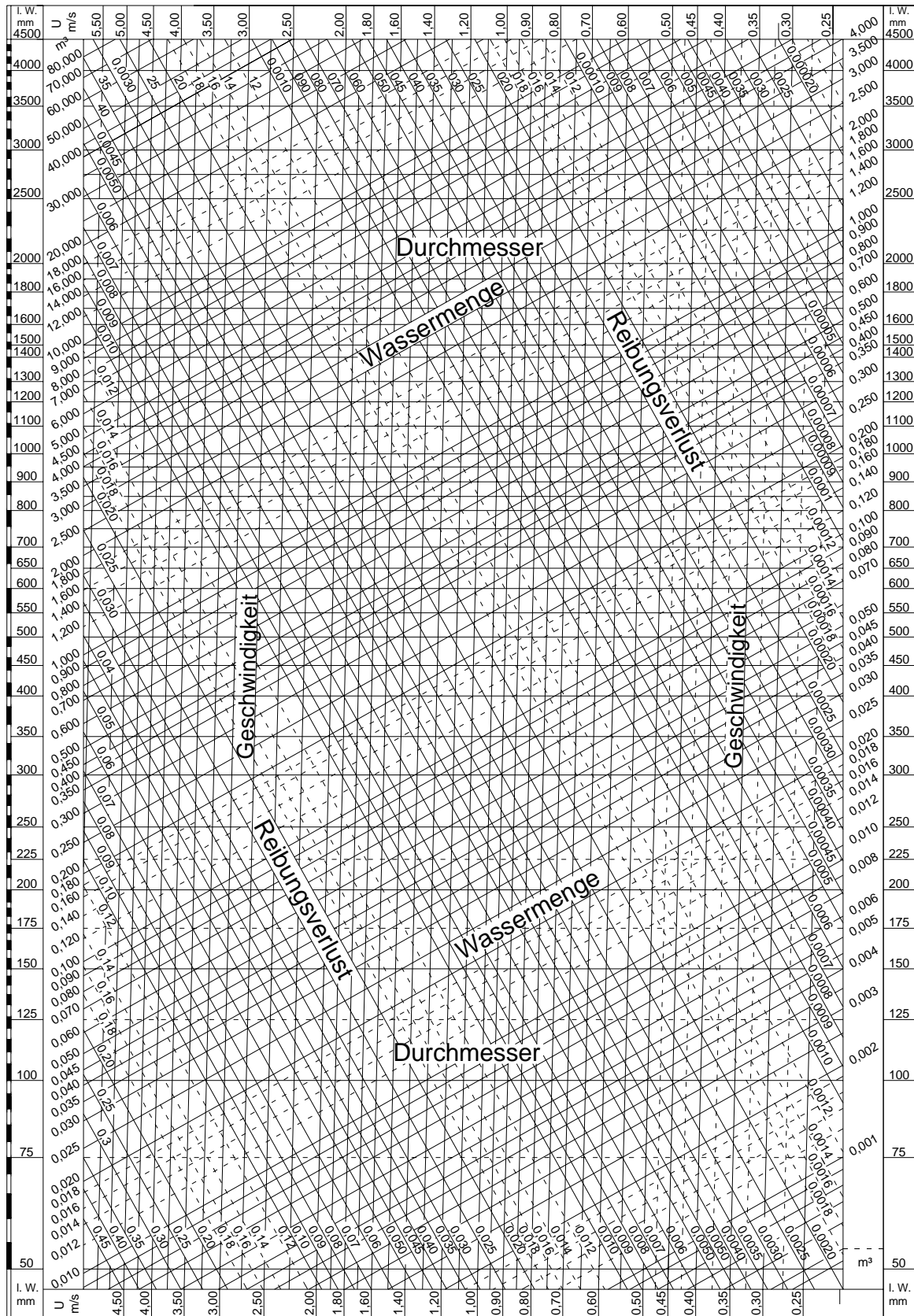


Bild 11-4 Vordimensionierung von Druckrohrleitungen aus Holz (nach Rabovsky (1926): Scobey'sche Formel für Druckrohrleitungen aus Holz)

Bei der Bestimmung des optimalen Rohrdurchmessers ist zu beachten, dass mit steigendem Durchmesser die Reibungsverluste in der Rohrleitung abnehmen und somit die elektrische Leistung einer Kleinwasserkraftanlage zunimmt, andererseits aber auch die Kosten für die Rohrleitung ansteigen.

11.4 Dynamische Strömungsvorgänge in Druckrohrleitungen (Druckstoß)

11.4.1 Druckwellengeschwindigkeit und Schließvorgang

Bei Inbetriebnahme und Abschalten von Anlagen, bei plötzlichen Pumpenausfällen oder bei Steuervorgängen ändern sich die Strömungsgrößen schnell. Die sich in der Rohrleitung bewegendes Wassersäule bewirkt bei plötzlichem Abbremsen durch ihre kinetische Energie vor der Armatur einen sehr raschen Druckanstieg. Bei diesem Vorgang wird durch die Verzögerung der Fließgeschwindigkeit Bewegungsenergie in Druckenergie umgewandelt. Neben der Massenträgheit beeinflusst auch die Kompressibilität der Flüssigkeit und die Elastizität der Rohrwandung die Größe des Druckstoßes: diese Druckstöße werden umso höher, je weniger kompressibel die Strömungsflüssigkeit und je steifer das Rohrmaterial ist. Die Druckwelle Δp breitet sich mit sehr großer Fortpflanzungsgeschwindigkeit c aus. Hinter der Armatur entsteht zunächst eine vakuumähnliche Dampfblase, während sich die Wassersäule weiter bewegt. Ähnliche Verhältnisse liegen auch bei einem zu schnellen Öffnen der Armatur vor. Durch Überlagerung einer vektoriellen Geschwindigkeit ($\vec{c} - \vec{v}_0$) kann der instationäre Vorgang der Druckwellenausbreitung als stationär betrachtet werden (Bild 11-5).

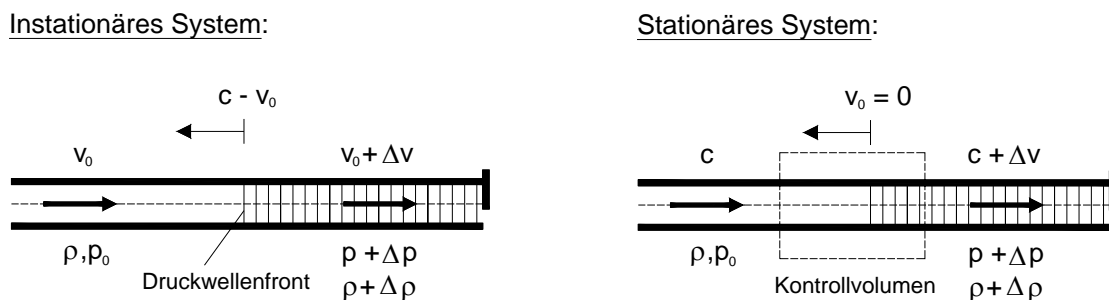


Bild 11-5 Druckwellenausbreitung bei Druckstoß (aus Lang et al. (2004))

Die Druckwelle erreicht bei sehr steifen Rohrleitungen (Stahl- oder Betonrohrleitungen) eine Geschwindigkeit von $c > 1000$ m/s, bei weichem Rohrmaterial (Holz, PVC) sinkt die Druckwellengeschwindigkeit auf Werte von $c < 500$ m/s. Wird beispielsweise eine Druckwellengeschwindigkeit $c = 200$ m/s, eine Änderung der Strömungsgeschwindigkeit $\Delta v = 1,0$ m/s und eine Dichte $\rho_W = 1000$ kg/m³ angenommen, so folgt eine Drucksteigerung von $\Delta p = 2$ bar bzw. $\Delta h = 20$ m WS.

Dabei wird eine Schließzeit von $T_S = 0$ sec vorausgesetzt. Dies bedeutet, dass das Regelorgan verschlossen ist, wenn die Druckwelle infolge des in der Rohrleitung herrschenden Druckes ihre Bewegungsrichtung ändert und zurückkehrt (Totalreflektion). Die Armatur und die anschließende Rohrleitung können bei diesem Vorgang zerstört werden. Die Höhe der Druckänderung wird jedoch durch allmähliches Schließen des Schiebers, Teilreflektion (z.B. durch Richtungsänderung der Trassenführung) und Rohrreibung teilweise abgebaut.

Bei dünnwandigen Rohren mit der Wandstärke s und dem Innendurchmesser d_i kann nach Alliévi (1909) für die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Druckwelle in einer Rohrleitung, die in Längsrichtung unverschieblich gelagert ist, Gleichung (66) angewendet werden. Bei dünnwandigen Rohren ist das Verhältnis von Wandstärke zu Außendurchmesser kleiner als 0,1.

$$c = \sqrt{\frac{1}{\rho_W \cdot \left(\frac{1}{E_W} + \frac{1}{E_R} \cdot \frac{d_i}{s} \cdot (1 - \nu^2) \right)}} \quad (66)$$

Im Gegensatz zu dünnwandigen Rohren verteilen sich die Spannungen in dickwandigen Rohren nicht gleichmäßig in der Rohrwand. Bei dickwandigen elastischen Rohrleitungen kann die Druckwellengeschwindigkeit nach Alliévi (1909) mit folgender Gleichung (67) berechnet werden, wobei d_i der Innen- und d_a der Außendurchmesser der Rohrleitung ist:

$$c = \sqrt{\frac{1}{\rho_W \cdot \left(\frac{1}{E_W} + \frac{2}{E_R} \cdot \frac{(1 + \nu) \cdot d_a^2 + (1 - 2 \cdot \nu) \cdot d_i^2}{d_a^2 - d_i^2} \right)}} \quad (67)$$

In Anhang H ist die Druckwellengeschwindigkeit c für dünnwandige und dickwandige Rohrleitungen in Abhängigkeit der Rohrleitungsparameter graphisch dargestellt.

In Bild 11-6 ist schematisch der zeitliche Verlauf eines Druckstoßes für eine Rohrleitung der Länge L bei allmählichem Schließen des Schiebers am Rohrende (Zeitpunkt $t = 0$) dargestellt. Die Druckwelle erreicht nach der Zeit $t = L / c$ den Wasserspeicher, wo sie als Expansionswelle reflektiert wird (negative Reflexion). Nach der Zeit $t = 2 \cdot L / c$ erreicht sie den Schieber, wo eine positive Reflexion erfolgt. Erfolgt das Schließen des Schiebers nicht plötzlich, so tritt die Druckerhöhung je nach Schließfunktion mehr oder weniger allmählich ein: es bilden sich aufeinander folgende Wellen kleiner Amplitude. Für den Fall, dass die Schließzeit T_S größer ist als die Reflexionszeit $T_R = 2 \cdot L / c$, trifft am Abschlussorgan bereits die erste Entlastungswelle ein, bevor der

Schieber ganz geschlossen ist (d.h. bevor sich der volle Druckanstieg Δp einstellen kann). Unter Berücksichtigung von Dämpfung infolge Zähigkeitseinfluss und Reibungsverlusten klingt dieser Vorgang ab.

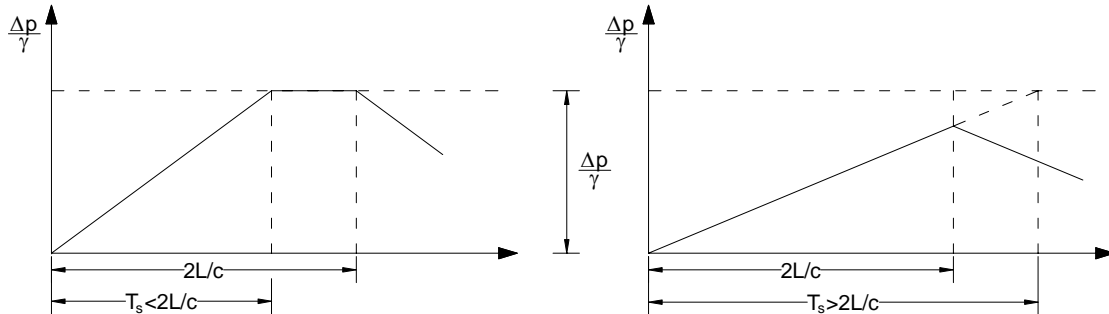


Bild 11-6 zeitlicher Druckstoßverlauf bei allmählichem Schließen des Schiebers

Bei einem langsamen Schließen des Schiebers ($T_S > T_R$) tritt eine Überlagerung des sich wegen des andauernden Schließvorganges noch aufbauenden Drucks mit der reflektierten Druckwelle ein, so dass der maximal mögliche Druckstoß nicht mehr erreicht werden kann. Die Schließzeit und -funktion des Schiebers beeinflussen somit maßgebend die Druckerhöhung infolge instationärer Strömung. In Bild 11-7 sind unterschiedliche Schließvorgänge dargestellt. Der Schließungsgrad τ_S ist abhängig von der Ventilstellung. Die Ventilstellung selbst ist eine Funktion der Zeit ($\tau_S = f(t)$; $0 \leq \tau_S \leq 1$).

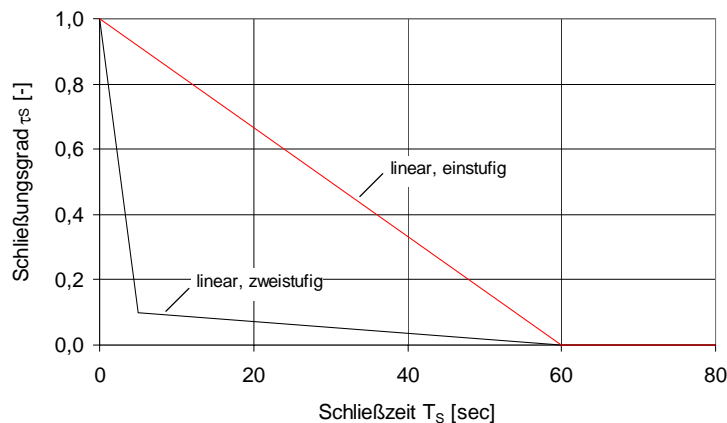


Bild 11-7 unterschiedliche Schließvorgänge

11.4.2 Druckstoßberechnung

Druckstöße in Rohrleitungen treten insbesondere bei Betätigung von Absperr- oder Regelorganen und beim Ein- bzw. Ausschalten von Turbinen oder Pumpen auf. Die Beanspruchung der Rohrleitung aus instationärer Strömung kann wesentlich größer

als bei ruhenden Lasten und stationärem Fließen sein. Die plötzlichen Druckänderungen in einer Rohrleitung infolge der dynamischen Strömungsvorgänge müssen bei der Bemessung von Druckrohrleitungen berücksichtigt werden. Folgende Annahmen werden bei der Druckstoßberechnung getroffen:

- Rohrleitung ist komplett gefüllt;
- gleichmäßige Verteilung von Geschwindigkeit und Druck über den Querschnitt;
- Geschwindigkeitshöhe ist vernachlässigbar im Vergleich zur Druckstoßhöhe;
- Druckstöße klingen infolge von Dämpfung und Reibung in der Regel nach wenigen Sekunden ab, so dass eine konstante Energiehöhe für diesen Zeitraum angenommen wird.

Mit Hilfe des Impulssatzes (68) und der Massenerhaltung (69) kann die bei schneller Abflussänderung ausgelöste Druckänderung unter Vernachlässigung von Reibungsverlusten nach Gleichung (70) (Joukowsky-Stoß = Hauptgleichung der Druckstoßtheorie) abgeschätzt werden. Bei diesem Extremfall wird ein plötzliches Schließen einer Absperrarmatur (Schließzeit $T_S = 0$ sec) vorausgesetzt.

$$\Sigma F = (\rho_W \cdot Q \cdot v)_{\text{aus}} - (\rho_W \cdot Q \cdot v)_{\text{ein}} \quad (68)$$

$$\rho_W \cdot Q = \text{konstant} \quad (69)$$

$$\rightarrow \max \Delta p = \rho_W \cdot c \cdot \Delta v \quad (70)$$

In der Praxis wird die Größe des Druckstoßes maßgebend von der Schließzeit T_S einer Regel- oder Absperrarmatur beeinflusst. Bei Schließzeiten T_S , die größer als die Reflexionszeit $T_R = 2 \cdot L / c$ sind, wird der volle Joukowsky-Stoß nach Gleichung (70) aufgrund von Überlagerung der Druckwellen nicht mehr erreicht. Überschlägig kann in diesem Fall der Druckstoß nach Gleichung (71) berechnet werden. Dabei wird eine linearisierte Schließzeit des Schiebers vorausgesetzt.

$$\Delta p \approx \rho_W \cdot c \cdot \Delta v \cdot \frac{T_R}{T_S} \quad \text{für } T_S > T_R \quad (71)$$

Der in Gleichung (71) vorausgesetzte lineare Zusammenhang zwischen Druckstoß und Schließzeit besteht bei realen Wasserkraftanlagen nicht. Eine genauere Abschätzung des Druckstoßes in Abhängigkeit der Schließzeit kann nach Horlacher (1981), Giesecke (1984) sowie Giesecke und Mosonyi (2005) durchgeführt werden.

Horlacher (1981) untersuchte Druckschwankungen in einsträngigen Rohrleitungen. Die Ergebnisse seiner Untersuchungen sind in dimensionslosen Diagrammen zu-

sammengefasst, mit denen die Drucksteigerung bei instationärer Strömung bestimmt werden kann. In Bild 11-8 ist für eine reibungsfreie Rohrströmung die maximale dimensionslose Piezometerhöhe dargestellt.

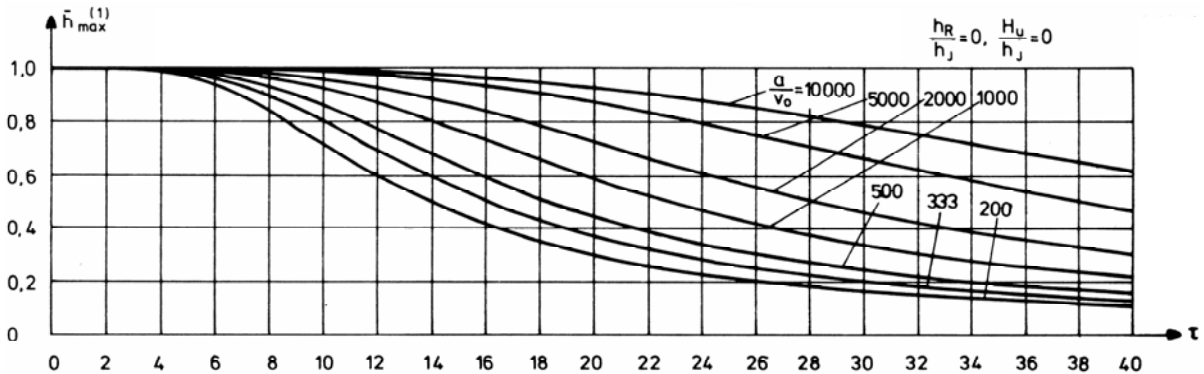


Bild 11-8 Dimensionsloses Diagramm für Druckstoßberechnung (aus Horlacher (1981))

Anhand des folgenden Beispiels wird die Bestimmung der Druckstoßhöhe mit den dimensionslosen Diagrammen nach Horlacher (1981) erläutert. Gegeben ist eine Druckrohrleitung der Länge $L = 400$ m mit einer Fließgeschwindigkeit $v_0 = 1$ m/s. Die Schließzeit des Schiebers beträgt $T_s = 28$ s. Mit einer Druckwellengeschwindigkeit von $c = a = 500$ m/s ergibt sich ein Verhältnis von $a / v_0 = 500$. Mit Hilfe der Gleichung (70) (Joukowsky-Stoß) kann eine maximale Druckstoßhöhe von $\max \Delta h = c \cdot \Delta v / g = 500 \cdot 1 / 9,81 = 50,97$ m berechnet werden. Die dimensionslose Schließzeit beträgt in diesem Beispiel $\tau = T_s \cdot c / L = 28 \cdot 500 / 400 = 35$. Aus Bild 11-8 kann somit eine Abminderung der maximalen Druckstoßhöhe vor dem Schieber auf einen Wert von $\Delta h = 0,18 \cdot \max \Delta h = 0,18 \cdot 50,97 = 9,17$ m ermittelt werden.

Durch Wahl einer entsprechenden Schließzeit von Regel- oder Absperrarmaturen, die größer ist als die Reflexionszeit ($T_s > T_R$), erreicht der Druckanstieg nicht den Wert des vollständigen Druckstoßes nach Gleichung (70). Wirtschaftliche Wasserkraftanlagen mit Druckrohrleitungen aus Holz können zweckmäßig so konstruiert werden, dass der Schließvorgang zu einem Druckanstieg kleiner als 20 % des hydrostatischen Wasserdruckes führt.

Vergleichende Berechnungen zu instationären Strömungsvorgängen wurden mit der Software WANDA von Delft Hydraulics durchgeführt. Die Ergebnisse bezüglich der Druckstoßhöhe stimmen sehr gut mit den aus den dimensionslosen Diagrammen nach Horlacher (1981) ermittelten Werten überein.

Neben der Schließzeit beeinflusst auch die Schließfunktion von Regel- oder Absperrorganen maßgebend die Höhe des Druckstoßes. Die größten Durchflussänderungen finden in einem Bereich statt, in dem der Schieber zwischen 80 % und 100 % geschlossen ist. Mit einer abgestuften Schließfunktion, bei der am Anfang eine größere

Schließgeschwindigkeit und abschließend (ungefähr die letzten 20 % des Schließweges) eine deutlich geringere Schließgeschwindigkeit gewählt wird, kann die Schließzeit reduziert werden.

Das Auftreten von übermäßig hohen Druckstößen kann mit dem Einbau eines Druckreglers bzw. der Anordnung eines Wasserschlosses vermieden werden. Ein Druckregler sorgt beispielsweise bei Francis-Turbinen selbsttätig dafür, dass bei plötzlichem Schließen ein Nebenauslass im gleichen Maße geöffnet wird, in dem sich das Turbinenleitrad schließt. Bei der Anordnung eines Wasserschlosses zwischen Speicher und Schieber kann die Wassersäule bei dynamischen Druckänderungen frei auspendeln. Das Wasserschloss sollte dabei möglichst nahe am Abschlussorgan (Schieber) angeordnet werden.

12 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der vorliegenden Untersuchungen war ein Konzept für die Nutzung von Wasserressourcen mit Hilfe von Druckrohrleitungen aus Holz als Bestandteil von Kleinwasserkraftanlagen. Im Rahmen eines Forschungsprojektes war die Erschließung und Bewirtschaftung unterirdischer Karstfließgewässer in Mitteljava, Indonesien geplant, um die Trink- und Brauchwasserversorgung der Bevölkerung vor allem während der Trockenzeit zu verbessern. An der Südküste Javas ist aufgrund der Verkarstung des Untergrundes eine natürliche Speicherung des Niederschlags kaum möglich. Deshalb ist besonders in der Trockenzeit ein Wassermangel vorhanden. Es existieren im Karstaquifer jedoch große unterirdische Wasserressourcen, die bislang weitgehend ungenutzt über ein weitverzweigtes Höhlensystem in den Indischen Ozean abfließen. Aufgrund der Speicher- und Pufferkapazität des Karstaquifers führen diese unterirdischen Flüsse auch in der Trockenzeit beachtliche Abflussmengen. Seit Jahrzehnten werden von der indonesischen Regierung Anstrengungen unternommen, diese Wasserressourcen zu nutzen. Eine nachhaltige Lösung wurde bisher jedoch nicht gefunden.

Mit Hilfe der in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse kann die Nutzung dieser unterirdischen Wasservorkommen mit einer Druckrohrleitung aus Holz als Bestandteil einer Kleinwasserkraftanlage geplant und realisiert werden. Über eine Wasserfassung am oberen Ende der Druckrohrleitung wird dieser das strömende Wasser zugeführt. Zur Erzeugung der zum Antrieb von Förderpumpen erforderlichen Druckhöhe wird entsprechend dem geodätischen Verlauf der Höhle eine Druckrohrleitung aus Holz verlegt. Mit dem Einsatz von Druckrohrleitungssystemen aus Holz ist eine Wasser- und Energiebewirtschaftung von Karstfließgewässern in Höhlen realisierbar, in denen der partielle Einstau der Höhle aufgrund von Wasserverlusten oder geostatischen Problemen nicht möglich ist. Da in Indonesien und speziell auf Java eine Vielzahl von Höhlen existieren, kann das Konzept problemlos auf weitere Höhlen zur nachhaltigen Wassergewinnung angewendet werden.

Holz bietet sich als geeigneter Baustoff für die Druckrohrleitung an, da Stahl oder Beton wegen des großen Gewichtes der Rohrschüsse in Zusammenhang mit der Enge und Unwegsamkeit in der Höhle und den sich daraus ergebenden Schwierigkeiten beim Bau ausscheiden.

In der vorliegenden Arbeit wurden insbesondere zwei Themenbereiche untersucht, um Druckrohrleitungen aus Holz in unterirdischen Karstfließgewässern in Mitteljava bauen zu können. Der erste Bereich betrifft den Baustoff Holz, da in Südostasien und speziell in Indonesien völlig andere Holzarten verfügbar sind als in Europa. Im zweiten Bereich wurden Probleme im Zusammenhang mit der Rohrkonstruktion in der Höhle gelöst.

Anhand eingehender Untersuchungen wurde der Einfluss der Holzfeuchte auf physikalische und elasto-mechanische Eigenschaften ausgewählter Holzarten ermittelt, welche in Indonesien lokal verfügbar sind und sich als Baustoff für Holzdaubenrohre eignen. Zusätzlich wurde zum Vergleich die in Deutschland heimische Holzart Lärche einbezogen, da in Deutschland bevorzugt die Nadelholzarten Kiefer, Lärche und Douglasie für den Bau von Holzdaubenrohren eingesetzt werden.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen dienen zur Planung, Dimensionierung und Konstruktion einer Druckrohrleitung aus Holz und wurden als Eingangsgrößen für ein Rechenmodell verwendet. Mit Hilfe des Rechenmodells wurde das Biegetragverhalten von Holzdaubenrohren, die auf Sätteln aufgelagert sind, untersucht. Die Ergebnisse dieser FE-Untersuchungen wurden experimentell an einer Druckrohrleitung verifiziert. Zusammenfassend wurden Bemessungsvorschläge für Druckrohrleitungen aus Holz, die auf Sätteln aufgelagert sind, ausgearbeitet. Mit Hilfe von Bemessungstabellen kann eine schnelle Bemessung von aufgelagerten Druckrohrleitungen aus Nadelholz der Festigkeitsklasse C24 durchgeführt werden.

Neben der Bemessung von aufgelagerten Rohrleitungen wurde auch ein Nachweisverfahren für erdverlegte Druckrohrleitungen aus Holz vorgestellt. Bei diesen Rohrleitungen müssen zusätzlich zu den Lastfällen Eigengewicht, Vorspannung, Wasserinnendruck und Quellungsdruck die Beanspruchungen infolge Auflasten sowie die Auswirkungen der Bodeneigenschaften und der Einbauverhältnisse auf das Trag- und Verformungsverhalten der Rohrleitung berücksichtigt werden.

Abschließend wurden die Wirkungsweise von Wasserkraftanlagen und hydraulische Vorgänge in Druckrohrleitungen dargestellt. Insbesondere Druckstöße, die bei Betätigung von Absperr- oder Regelorganen und bei Ein- bzw. Ausschalten von Turbinen oder Pumpen auftreten, müssen bei der Bemessung von Druckrohrleitungen berücksichtigt werden.

Im Hinblick auf das Bestreben, vermehrt Energie aus regenerativen Quellen zu erzeugen, kommt der Nutzung der Wasserkraft durch Kleinwasserkraftanlagen wieder eine größere Bedeutung zu. Die in dieser Arbeit dargestellten Untersuchungen ermöglichen eine wirtschaftliche Bemessung von Druckrohrleitungen aus Holz als Bestandteil von Kleinwasserkraftanlagen.

13 Bezeichnungen

A	Querschnittsfläche [mm ²]
A _{ef}	wirksame Querdruckfläche [mm ²]
A _{Sp}	Spannungsquerschnittsfläche im Spannschloss [mm ²]: A _{Sp} = 459 [mm ²] für M27 bzw. 561 [mm ²] für M30
a	Abstand zwischen Lasteinleitung und nächstem Auflager beim Biegeversuch [mm]
α	lineares Quellmaß [%] bzw. Winkel [°]
α_{\max}	maximales lineares Quellmaß [%]
α_T	Wärmeausdehnungskoeffizient [1/K]
b	Breite des Prüfkörpers [mm]
b _D	Breite der Holzdaube [mm]
b _R	Breite des Spannrings [mm]
b _S	Breite des Auflagers (Sattel) einer Druckrohrleitung [cm]
β	Winkel [°]
c	Druckwellengeschwindigkeit [m/s]
D	Rohraußendurchmesser [mm]
DL	Drucklinie
DMS	Dehnmessstreifen
d _a	Rohraußendurchmesser [mm]
d _D	Dicke der Holzdaube [mm]
d _{D,ef}	verbleibende effektive Dicke der Holzdaube [mm]
d _i	Rohrinnendurchmesser [mm]
d _m	mittlerer Rohrdurchmesser [mm]
d _R	Dicke des Spannrings [mm]
ΔE	Änderung des Elastizitätsmoduls pro Prozent Holzfeuchteänderung [%/% Δu]
E ₀	Elastizitätsmodul in Faserrichtung [N/mm ²]
E ₉₀	Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung [N/mm ²]
E _{c,0}	Druck-Elastizitätsmodul in Faserrichtung [N/mm ²]
E _{c,90}	Druck-Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung [N/mm ²]
E _{dyn}	dynamischer Elastizitätsmodul (ermittelt aus Schwingungsmessungen) [N/mm ²]
E _R	Elastizitätsmodul der Rohrleitung in Querrichtung [N/mm ²]

E_S	Elastizitätsmodul von Stahl [N/mm ²]
E_W	Elastizitätsmodul Wasser: $E_W = 2,255 \cdot 10^9$ [N/m ²] (bei T = 20°C)
EL	Energielinie
e_R	Abstand der Spannringe [m]
e_S	Abstand der Auflager (Sättel) einer Druckrohrleitung [m]
ε_H	Dehnung des Holzrohres [-]
ε_Q	Quelldehnung der Holzdauben [-]
ε_S	Dehnung der Stahlringe [-]
ε_{VS}	Vorspanndehnung der Stahlringe [-]
$F_{c,90}$	Drucklast rechtwinklig zur Faserrichtung [N]
$F_{c,90,max}$	maximale Drucklast rechtwinklig zur Faserrichtung [N]
$F_{c,90,max,est}$	geschätzte maximale Drucklast rechtwinklig zur Faserrichtung [N]
$F_{c,90,rad}$	Drucklast in radialer Richtung des Rohrquerschnittes [N]
$F_{c,90,U}$	Drucklast in Umfangsrichtung des Rohrquerschnittes [N]
F_d	Bemessungswert der Einwirkung [N]
F_k	charakteristischer Wert der Einwirkung [N]
F_{max}	Höchstlast [N]
F_S	Zugkraft im Spannschloss [kN]
F_V	Vertikalkraft für Flächenpressung im Reibungsversuch [N]
FS	Fasersättigungsbereich [%]
Δf	Änderung der Festigkeit pro Prozent Holzfeuchteänderung [%/% Δu]
f_0	Eigenfrequenz bei Schwingungsmessung [Hz]
$f_{c,0}$	Druckfestigkeit in Faserrichtung [N/mm ²]
$f_{c,90}$	Druckfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung [N/mm ²]
f_m	Biegefestigkeit [N/mm ²]
f_v	Scher- bzw. Schubfestigkeit [N/mm ²]
$f_{y,k}$	charakteristischer Wert der Streckgrenze für Stahl [N/mm ²]: $f_{y,k} = 240$ [N/mm ²] für S235 bzw. 360 [N/mm ²] für S355
$f_{y,b,k}$	charakteristischer Wert der Streckgrenze für Gewindebolzen [N/mm ²]: $f_{y,k} = 240$ [N/mm ²] für S235 bzw. 360 [N/mm ²] für S355
ϕ	Winkel beim Auflager, der die Druckrohrleitung im unteren Bereich umschließt [°]

ΔG	Änderung des Schubmoduls pro Prozent Holzfeuchteänderung [%/% Δu]
G	Schubmodul [N/mm ²]
g	Erdbeschleunigung: $g = 9,81$ [m/s ²]
γ_B	Wichte des Bodens [kN/m ³]
γ_F	Teilsicherheitsbeiwert [-]
γ_M	Teilsicherheitsbeiwert [-]
γ_R	Wichte der Rohrleitung [kN/m ³]
γ_W	Wichte von Wasser: $\gamma_W = 9,79$ [kN/m ³] (bei $T = 20^\circ\text{C}$)
H_0	hydrostatische Druckhöhe [m]
H_{br}	Bruttofallhöhe [m]
H_G	Horizontalkraft, die im Reibungsversuch gleich bleibend ein Gleiten des Prüfkörpers ergibt [N]
H_{max}	größte aufgebrauchte Horizontalkraft, bei der im Reibungsversuch der Gleitvorgang einsetzt [N]
H_n	Nettofallhöhe: $H_n = H_{br} - \sum h_v - v^2/2g$ [m] [m]
h	Höhe des Prüfkörpers [mm]; Überdeckungshöhe über Rohrscheitel bei erdverlegten Rohrleitungen [m]
h_0	Messlänge des Prüfkörpers bei Prüfung rechtwinklig zur Faserichtung [mm]
h_v	Energiehöhenverlust [m]
h_{WS}	Wassersäulenhöhe über der Rohrachse [m]
η_G	Wirkungsgrad Generator [-]
η_K	Wirkungsgrad Kupplung [-]
η_T	Wirkungsgrad Turbine [-]
η_{Tr}	Wirkungsgrad Transformator [-]
I	Flächenmoment 2. Grades [mm ⁴]
I_e	Neigung der Energielinie: $I_e = h_v / L$ [-]
i	Trägheitsradius [mm ²]
K_2	Erddruckverhältnis in der Bodenzone 2 [-]
k_b	Faktor zur Bestimmung der Biegefestigkeit in Abhängigkeit von der Holzfeuchte für verschiedene Holzarten [-]
$k_{c,90}$	Querdruckbeiwert [-]
k_{mod}	Modifikationsbeiwert [-]

k_s	äquivalente Sandrauigkeit [mm]
krit p_a	kritischer äußerer Wasserdruck [kN/m ²]
krit q_v	kritische vertikale Gesamtlast [kN/m ²]
κ	Abminderungsbeiwert für Grabenlast (Silotheorie) [-]
κ_0	Abminderungsbeiwert für Flächenlast (Silotheorie) [-]
L	Rohrleitungslänge [m]
l	Stützweite bzw. bei Querdruckversuch Länge des Prüfkörpers zwischen den Einspannvorrichtungen [mm]
l_0	Maß des Holzes bei Versuchsbeginn in einer bestimmten holz-anatomischen Richtung [mm]
l_D	Länge der Holzdauben [m]
l_w	Maß des Holzes mit einer Holzfeuchte über dem Fasersättigungsbereich in einer bestimmten holz-anatomischen Richtung [mm]
λ	Rohrreibungsbeiwert [-]
λ_B	Konzentrationsfaktor über dem Boden neben dem Rohr [-]
λ_R	Konzentrationsfaktor [-]
long	longitudinal
M	Biegemoment [Nmm]
m	Momentenbeiwert [-]
max	größter Wert
min	kleinster Wert
mittel (MW)	Mittelwert (=mean)
μ_G	Reibungskoeffizient [-]
μ_H	Haftungskoeffizient [-]
N	elektrische Leistung [kW/h] bzw. Normalkraft [N]
$N_{R,d}$	Bemessungswert der Grenzzugkraft im Spannschloss [N]
n	Normalkraftbeiwert [-]
n_D	Anzahl der Holzdauben im Querschnitt [-]
n_R	Anzahl der Spannringe zwischen zwei Auflager [-]
v	Querdehnungsfaktor [-]
ν_w	kinematische Viskosität von Wasser: $\nu_w = 1,004 \cdot 10^{-6}$ [m ² /s] (bei T = 20°C)
P_T	Turbinenleistung [kW]

Δp	Druckanstieg bei instationärer Strömung (Druckstoß) [bar]
p	Druck bei stationärer Strömung [bar]
p_a	äußerer Wasserdruck (Grundwasser) [kN/m ²]
p_E	Bodenspannung infolge Erdlast [kN/m ²]
p_0	Flächenlast [kN/m ²]
$p(\varphi)$	Flächenlast infolge Wasserinnendruck [kN/m ²]
Q	Durchfluss [m ³ /s]
q	differentielles Quellmaß [%/%]
q_h	horizontale Bodenspannung am Rohr [kN/m ²]
q_h^*	horizontaler Bettungsreaktionsdruck [kN/m ²]
q_v	vertikale Bodenspannung am Rohr [kN/m ²]
$q_{v,A}$	vertikale Bodenspannung unter Berücksichtigung des Auftriebs [kN/m ²]
Re	Reynoldszahl [-]
r	Korrelationskoeffizient [-]
r_{innen}	Innenradius der Druckrohrleitung [m]
r_m	mittlerer Radius der Druckrohrleitung [m]
rad	radial
ρ	Rohdichte von Holz [kg/m ³]
ρ_0	Darr-Rohdichte von Holz [kg/m ³]
ρ_W	Dichte von Wasser: $\rho_W = 0,998$ [t/m ³] (bei $T = 20^\circ\text{C}$)
s	Standardabweichung bzw. Wandstärke der Rohrleitung [m]
σ	Ausnutzungsgrad der Holzdauben für Nachweis auf Biegung und Druck [-]
$\sigma_{c,0}$	Druckspannung in Faserrichtung [N/mm ²]
$\sigma_{c,90,rad}$	Querdruckspannung in radialer Richtung [N/mm ²]
$\sigma_{c,90,U}$	Querdruckspannung in Umfangsrichtung [N/mm ²]
σ_i	Schwerpunktspannung [N/mm ²]
σ_m	Biegespannung [N/mm ²]
$\sigma_{m,Rand}$	Biegerandspannung [N/mm ²]
σ_R	Normalspannung im Spannring [N/mm ²]
σ_S	Zugspannung im Spannring [N/mm ²]
σ_V	Vorspannungsgrad bzw. Flächenpressung [N/mm ²]

$\sigma_{1,R,d}$	Bemessungswert der Grenzspannung im Spannschloss [N/mm ²]: $\sigma_{1,R,d} = f_{y,b,k} / (1,1 \cdot \gamma_M)$
T	Temperatur [K]
T_S	Schließzeit des Schiebers [sec]
tan	tangential
τ	Schubspannung [N/mm ²]
τ_S	Schließungsgrad des Schiebers [-]
u	Holzfeuchte [%]
u_0	Holzfeuchte zu Versuchsbeginn [%]
V	maßgebende Querkraft [N]
Vol	Volumen
Δv	Änderung der Strömungsgeschwindigkeit [m/s]
v	mittlere Strömungsgeschwindigkeit [m/s]
W	Widerstandsmoment [mm ³]
w	Durchbiegung [mm]
Z_R	Zugkraft im Spannring [kN]
ζ_e	Energieverlustbeiwert [-]

14 Literatur

Alliévi, L., Dubs, R., Bataillard, V. (1909). Allgemeine Theorie über die veränderliche Bewegung des Wassers in Leitungen. Springer Verlag, Berlin.

ATV-DVWK-A 127. Arbeitsblatt für statische Berechnung von Abwasserkanälen und -leitungen. 3. Auflage, August 2000. GFA Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik, Hennef.

ATV-DVWK-A 139. Arbeitsblatt für Einbau und Prüfung von Abwasserkanälen und -leitungen. Juni 2001. GFA Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik, Hennef.

Autorenkollektiv (1988). Holz-Lexikon. 3. Auflage. DRW-Verlag Weinbrenner, Leinfelden-Echterdingen.

Becker, P. (2002). Modellierung des zeit- und feuchteabhängigen Materialverhaltens zur Untersuchung des Langzeittragverhaltens von Druckstäben aus Holz. Dissertation. Bauhaus Universität Weimar.

Begemann, H. F. (1981). Das große Lexikon der Nutzhölzer. Deutsche Betriebswirte-Verlag, Gernsbach.

Bengtsson, C. (2000). Stiffness of spruce wood – Influence of moisture conditions. In: Holz als Roh- und Werkstoff. Band Nr. 58, S. 344 - 352. Springer Verlag, Berlin.

Blaß, H.J., Fellmoser, P. (2002). Erstellung eines Rechenverfahrens zur Ermittlung von Festigkeitskennwerten von Mehrschichtplatten. Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abteilung Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen. Universität Karlsruhe (TH).

Blaß, H.J., Fellmoser, P. (2006). Druckrohrleitungen aus Holz - Abschlussbericht zum BMBF-Verbundprojekt Erschließung und Bewirtschaftung unterirdischer Karstfließgewässer in Mitteljava, Indonesien. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Band 3, Universitätsverlag Karlsruhe, ISBN 3-86644-025-1.

Blaß, H.J., Fellmoser, P. (2005). Druckrohrleitungen aus Holz. In: Bauen mit Holz. Band Nr. 107, S. 34 - 38. Bruderverlag, Karlsruhe.

Blaß, H.J., Görlacher, R. (2004). Compression perpendicular to the grain. In: Proceedings of the 8th World Conference on Timber Engineering, Volume II. Lahti, Finland.

Boxholm Produktion AB. Homepage: www.boxprod.com. Boxholm, Schweden.

Canbar Inc.. Homepage: www.canbar.com. Ontario, Kanada.

Carstensen, J. (1993). Beiträge zum Biegekriechverhalten von Holzbauteilen unter baupraktischen Beanspruchungen. Dissertation. Universität Hannover.

Damkilde, L., Hoffmeyer, P., Pedersen, T.N. (1998). Compression strength perpendicular to the grain of structural timber and glulam. In: Proceedings of the CIB-W-18. Paper 31-6-4.

Dinwoodie, J.M. (2000). Timber: It's nature and behaviour. 2nd ed. E & FN Spon. London, UK.

Dracos, T. (1990). Hydraulik. 3., überarbeitete Auflage. Zürich.

Fridley, K.J., Tang, R.C., Soltis, L.A. (1992). Hygrothermal effects on mechanical properties of lumber. In: Journal of Structural Engineering. Band Nr. 118(2), S. 567 – 581.

Gehri, E. (1997). Timber in compression perpendicular to the grain. International Conference of IUFRO S 5.02 Timber Engineering. Copenhagen, Denmark.

Giesecke, J. (1984). Dynamische Vorgänge in Rohrleitungen und ihre Auswirkungen. In: Wasserwirtschaft 74, Heft 4, S. 216 - 224.

Giesecke, J., Mosonyi, E. (2005). Wasserkraftanlagen – Planung, Bau und Betrieb. 4., aktualisierte und erweiterte Auflage. Springer Verlag, Berlin.

Glos, P. (1978). Zur Bestimmung des Festigkeitsverhaltens von Brettschichtholz bei Druckbeanspruchung aus Werkstoff- und Einwirkungskenngrößen. Berichte zur Zuverlässigkeitstheorie der Bauwerke. Heft 35/78. Laboratorium für den konstruktiven Ingenieurbau. Technische Universität München.

Glos, P. (1981). Zur Modellierung des Festigkeitsverhaltens von Bauholz bei Druck-, Zug- und Biegebeanspruchung. Berichte zur Zuverlässigkeitstheorie der Bauwerke. Sonderforschungsbereich 96. Heft 61. Technische Universität München.

Goens, E. (1931). Über die Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Stäben mit Hilfe von Biegeschwingungen. In: Analen der Physik. 5. Folge, Band 11, Heft 6, S. 649 - 678.

Görlacher, R. (1984). Ein neues Messverfahren zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Holz. In: Holz als Roh- und Werkstoff. Band Nr. 42, S. 219 - 222. Springer Verlag, Berlin.

Görlacher, R. (1990). Klassifizierung von Brettschichtholzlamellen durch Messung von Longitudinalschwingungen. Dissertation. Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abteilung Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen. Universität Karlsruhe (TH).

Hanhijärvi, A. (1995). Modelling of creep deformation mechanisms in wood. VTT Publication 231. Technical Research Centre of Finland, Espoo.

Hearmon, R.F.S. (1958). The influence of shear and rotary inertia on the free flexural vibration of wooden beams. In: British Journal of Applied Physics. 10/1958. S. 381 - 388.

Heimeshoff, B., Glos, P. (1980). Zugfestigkeit und Biege-E-Modul von Fichten-Brettlamellen. In: Holz als Roh- und Werkstoff. Band Nr. 38, S. 51 - 59. Springer Verlag, Berlin.

Hoffmeyer, P. (1979). Vandindholdets betydning for konstruktionstraes strykeog elasticitetsegenskaber. Nordisk trätidskrift, S. 191 – 203.

Hoffmeyer, P. (1995). Holz als Baustoff. In: Blaß, H.J., Görlacher, R., Steck, G. (Hrsg.) Step 1 – Holzbauwerke nach Eurocode 5. Fachverlag Holz, Düsseldorf.

Horlacher, H.-B. (1981). Druckstoßdiagramme für einsträngige Druckrohrleitungen. In: 3R international, Nr. 2/3, S. 128 - 133.

Idelchik, I.E. (1986). Handbook of hydraulic resistance. Hemisphere Publication. Washington, DC.

Keith, C.T. (1972). The mechanical behaviour of wood in longitudinal compression. In: Wood Science. Band Nr. 4, S. 235 - 245.

Keylwerth, R. (1962a). Untersuchungen über freie und behinderte Quellung von Holz. Erste Mitteilung: Freie Quellung. In: Holz als Roh- und Werkstoff. Band Nr. 20, S. 252 - 259. Springer Verlag, Berlin.

Keylwerth, R. (1962b). Untersuchungen über freie und behinderte Quellung von Holz. Zweite Mitteilung: Behinderte Quellung. In: Holz als Roh- und Werkstoff. Band Nr. 20, S. 292 - 303. Springer Verlag, Berlin.

Keylwerth, R. (1962c). Untersuchungen über freie und behinderte Quellung von Holz. Fünfte Mitteilung: Parallel zur Faserrichtung behinderte Quellung. In: Holz als Roh- und Werkstoff. Band Nr. 22, S. 295 - 296. Springer Verlag, Berlin.

Kingston, R.S.T., Perkitny, T. (1972). Zusammenhänge zwischen aktivem Quellungsdruck und passiver Zusammendruckbarkeit von Holz durch äußere Kräfte. In: Holz als Roh- und Werkstoff. Band Nr. 30, S. 18 - 28. Springer Verlag, Berlin.

Klotter, K. (1981). Lineare Schwingungen. Korrigierter Nachdruck der 3. Auflage. ISBN: 3-540-08673-0. Springer Verlag, Berlin.

Knigge, W., Schulz, H. (1966). Grundriss der Forstnutzung. Parey, Hamburg.

Kollmann, F. (1961). Rheologie und Strukturfestigkeit von Holz. In: Holz als Roh- und Werkstoff. Band Nr. 19, S. 73 - 80. Springer Verlag, Berlin.

Kollmann, F. (1982). Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. 2. Auflage, 1. Band. Springer-Verlag, Berlin.

Kollmann, F., Krech, H. (1960). Dynamische Messung der elastischen Holzeigenschaften und der Dämpfung. In: Holz als Roh- und Werkstoff. Band Nr. 18, S. 41 - 54. Springer Verlag, Berlin.

Küch, W. (1943). Holz als Roh- und Werkstoff. Band Nr. 6, S. 157. Springer Verlag, Berlin.

Kufner, M. (1978). Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit von Holz verschiedener Rohdichte in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt. In: Holz als Roh- und Werkstoff. Band Nr. 36, S. 435 - 439. Springer Verlag, Berlin.

Lang, C., Detert, M. (2004). Hydraulik von Rohrsystemen. Institut für Hydromechanik. Universität Karlsruhe (TH).

Lawniczak, M. (1964). Über die Formänderung von Holz nach aufgehobener Quellungsbehinderung. In: Holz als Roh- und Werkstoff. Band Nr. 22, S. 89 - 94. Springer Verlag, Berlin.

Leonhardt, G. (1973). Die Belastung von starren Rohrleitungen unter Dämmen. Heft 4 der Mitteilungshefte des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau. Universität Hannover.

MacDonald & Partners (1984). Greater Yogyakarta Groundwater Resources Study. Volume 1 - 3.

Machek, L., Militz, H., Sierra-Alvarez, R. (2001). The influence of wood moisture content on dynamic modulus of elasticity measurements in durability testing. In: Holzfor-

schung - Holzverwertung. Band Nr. 05/2001, S. 97 - 99. Mitteilungen der österreichischen Gesellschaft für Holzforschung. Österreichischer Agrarverlag, Leopoldsdorf.

Madsen, B. (2000). Behaviour of timber connections. Timber Engineering Ltd. Vancouver, Canada.

Mang, F. (1970). Festigkeitsprobleme bei örtlich gestützten Rohren und Behältern. In: Angewandte Forschung im Stahl-, Leichtmetall-, Holz- und Steinbau. Sammelband der wissenschaftlichen Veröffentlichungen 1969 - 1972. Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine. Universität Karlsruhe (TH).

Miller, D.S. (1990). Internal flow systems. BHRA Fluid Engineering. Cranfield.

Möhler, K., Maier, G. (1969). Der Reibbeiwert bei Fichtenholz im Hinblick auf die Wirksamkeit reibschlüssiger Holzverbindungen. In: Holz als Roh- und Werkstoff. Band Nr. 27, S. 303 - 307. Springer Verlag, Berlin.

Möhler, K., Herröder, W. (1979). Obere und untere Reibbeiwerte von sägerauhem Fichtenholz. In: Holz als Roh- und Werkstoff. Band Nr. 37, S. 27 - 32. Springer Verlag, Berlin.

Nestmann, F., Oberle, P. (2002). Machbarkeitsuntersuchung: Erkundung und Grenzen der Wasser- und Energiebewirtschaftung großer unterirdischer Wasservorräte in Wonosari, Yogyakarta, Java, Indonesien. Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Bereich Wasserwirtschaft und Kulturtechnik. Universität Karlsruhe (TH).

Neuhaus, F.-H. (1981). Elastizitätszahlen von Fichtenholz in Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit. Mitteilung Nr. 81-8. Institut für konstruktiven Ingenieurbau. Ruhr-Universität Bochum.

Niemz, P. (1993). Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. DRW-Verlag Weinbrenner, Leinfelden-Echterdingen.

Oberle, P., Kappler, J., Unger, B. (2005). Abschlussbericht Ideenwettbewerb: Integriertes Wasserressourcen-Management in Gunung Kidul, Java, Indonesien. Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Bereich Wasserwirtschaft und Kulturtechnik. Universität Karlsruhe (TH).

Perkitny, T. (1958). Untersuchungen über den Quellungsdruck des Holzes. In: Holz als Roh- und Werkstoff. Band Nr. 16, S. 241 - 242. Springer Verlag, Berlin.

Perkitny, T., Helińska, L. (1963). Der Quellungsdruck des Holzes in Wasser und wassergesättigter Luft. In: Holz als Roh- und Werkstoff. Band Nr. 21, S. 19 - 22. Springer Verlag, Berlin.

Prayitno, T.A. (2003). Wood Description. Institute for Wood Science and Technology. Gadjah Mada University. Indonesia.

Rabovsky, H. (1926). Holzdaubenrohre – Ein Beitrag zur Baustoffkunde und Hydraulik von Rohrleitungen für Wasserkraft-, Wasserversorgungsanlagen. VDI-Verlag, Berlin.

Rayleigh, S.J.W. (1929). Theory of sound. 2nd Edition. Macmillan and Co. London.

Raczkowski, J. (1962). Über den durch Teile eines Probekörpers ausgeübten Quellungsdruck – Erste Mitteilung: Der Schwellen-Quellungsdruck. In: Holz als Roh- und Werkstoff. Band Nr. 20, S. 185 - 188. Springer Verlag, Berlin.

Schlyter, R., Winberg, G. (1929). Svenskt furuvirkes hallfasthetsegenskaper och deras beroende av fuktighetshalt och volymvikt. Stat. Provningsanst. Medd. 42. Stockholm, Sweden.

Schweingruber, F. H. (1990). Anatomie europäischer Hölzer. Herausgeber: Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf. Haupt, Bern und Stuttgart.

Stamer, J. (1920). Druckversuche mit Holz in der Richtung quer zur Faser. Mitt. Materialprüfungsamt. Heft 1, S. 28. Berlin. In: Kollmann, F. (1982). Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. 2. Auflage, 1. Band. Springer-Verlag, Berlin.

Stevens, W.C. (1938). Forestry (Great Britain). 12.38.

Thelandersson, S., Mårtensson, A. (1997). Design Principles for timber in compression perpendicular to grain. In: Proceedings of the CIB-W-18. Paper 30-20-1.

Thunell, B. (1941). Strength Properties of Swedish pine-wood as determined from small clear specimens. The Royal Swedish Institute for Engineering Research. No. 161. Sweden.

Toratti, T. (1992). Creep in timber beams in a variable environment. Dissertation. University of Technology Helsinki. Finland.

Trendelenburg, R. (1939). Das Holz als Rohstoff. München.

Trendelenburg, R., Mayer-Wegelin, H. (1955). Das Holz als Rohstoff. 2. Auflage. München.

U.S. Forest Products Laboratory (1974). Wood Handbook: Wood as an engineering material. Government Printing Office Washington.

Wagenführ, R. (1989). Anatomie des Holzes. 4. Auflage, VEB Fachbuchverlag Leipzig.

Wagenführ, R. (1996). Holzatlas. 4. Auflage, VEB Fachbuchverlag Leipzig.

Walldén, P. (1939). Acta forestalia. Fennica Bd. 39.

Wilson, T.R.C. (1932). Strength-moisture relations for wood. Technical Bulletin Nr. 282. United States Department of Agriculture, Washington D.C.

Zhou, Y., Fushitani, M., Kubo, T. (2000). Effect of stress level on bending creep behaviour of wood during cyclic moisture changes. In: Wood and Fiber Science. Band Nr. 32(1), S. 20 – 28.

Zwick Holzbau GmbH. Homepage: www.zwick-holzbau.de. Donaueschingen-Wolterdingen.

15 Zitierte Normen

ASTM Standard D 143-83. Ausgabe 1993. Standard methods of testing small clear specimens of timber.

DIN 1052, Ausgabe August 2004. Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau.

DIN 1072, Ausgabe Dezember 1985. Straßen- und Wegbrücken – Lastannahmen.

DIN 18 800 Teil 1, Ausgabe November 1990. Stahlbauten – Bemessung und Konstruktion.

DIN 50 014, Ausgabe Juli 1985. Klimate und ihre technische Anwendung – Normalklimate.

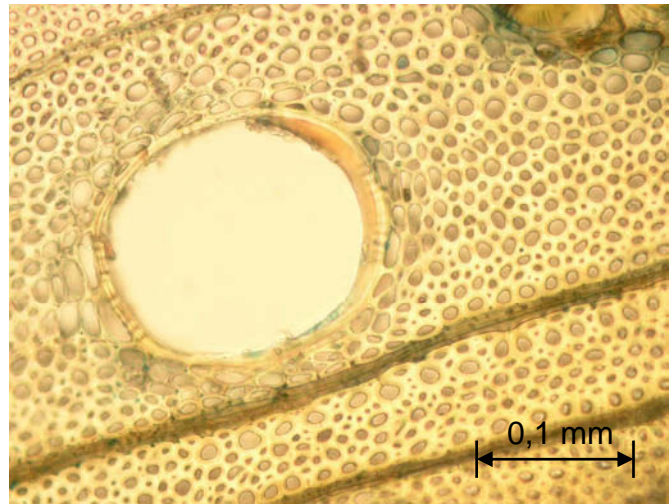
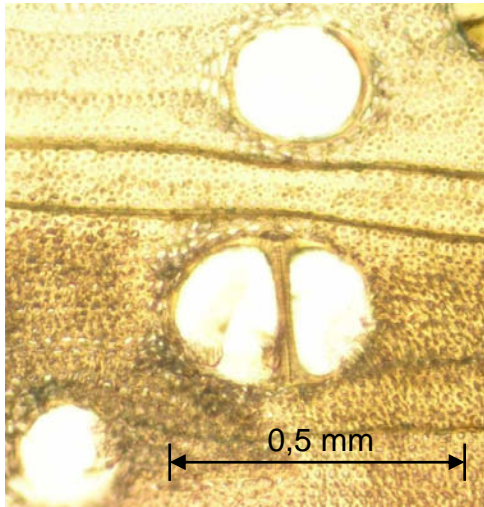
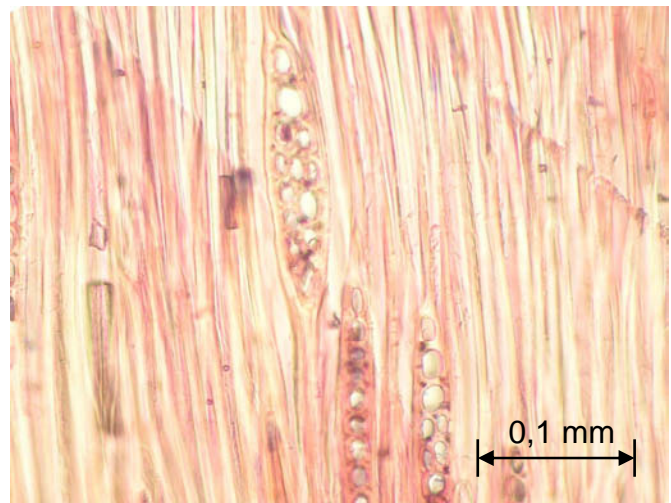
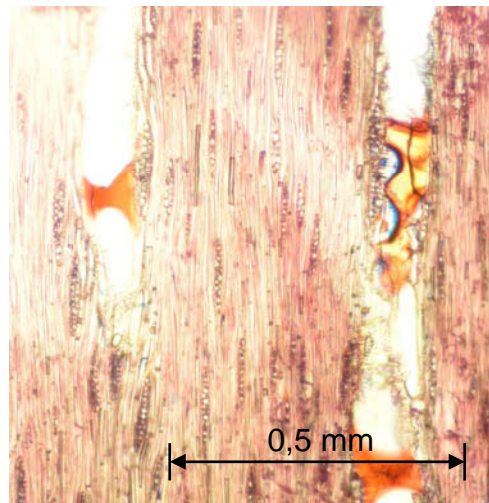
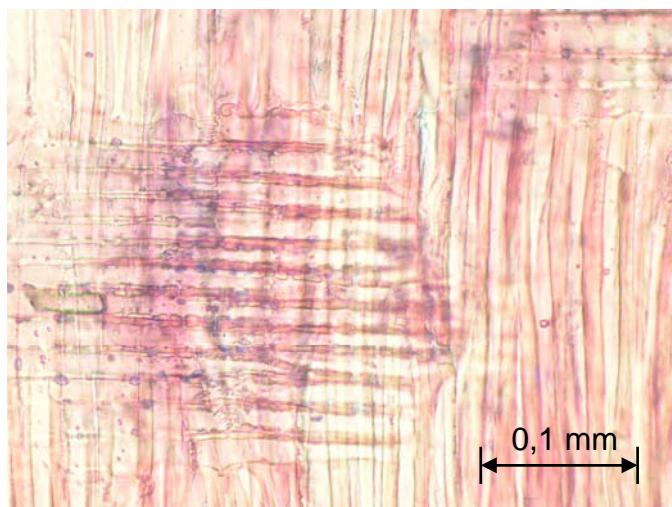
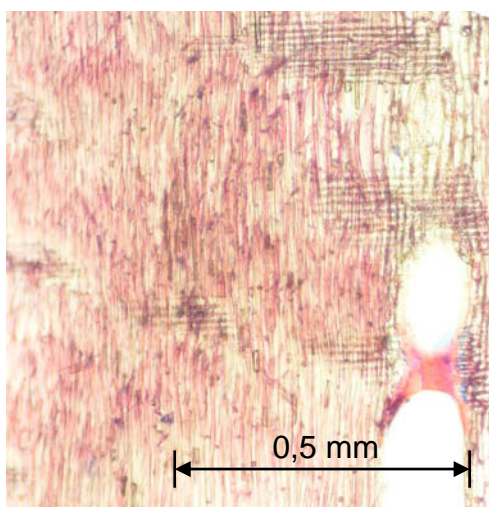
DIN 52 182, Ausgabe September 1976. Prüfung von Holz – Bestimmung der Rohdichte.

DIN 52 184, Ausgabe Mai 1979. Prüfung von Holz – Bestimmung der Quellung und Schwindung.

DIN EN 384, Ausgabe Mai 2004. Bauholz für tragende Zwecke – Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte.

DIN EN 408, Ausgabe August 2003. Holzbauwerke – Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz – Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften.

EN 1193, Ausgabe Juni 1998. Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz – Bestimmung der Scherfestigkeit und der mechanischen Eigenschaften rechtwinklig zur Faserrichtung.

Anhang A Anlagen zu Kapitel 2.2**Bild A1 Akasia: Querschnitt (10x und 40x)****Bild A2 Akasia: Tangentialschnitt (10x und 40x)****Bild A3 Akasia: Radialschnitt (10x und 40x)**

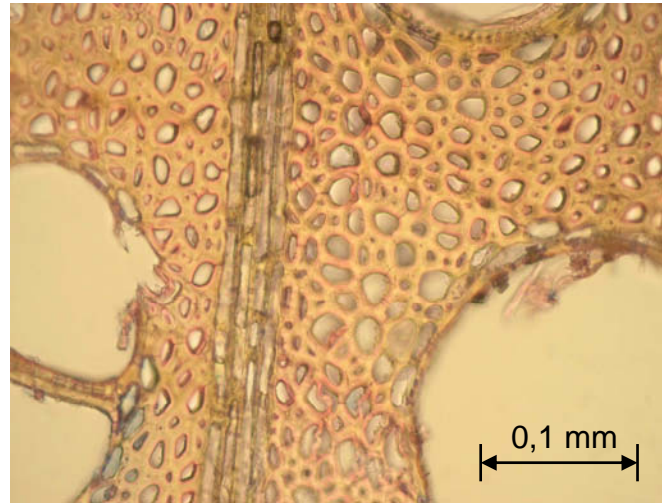
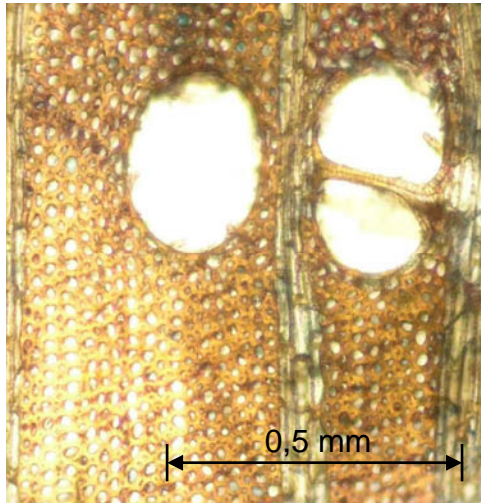


Bild A4 Jati: Querschnitt (10x und 40x)

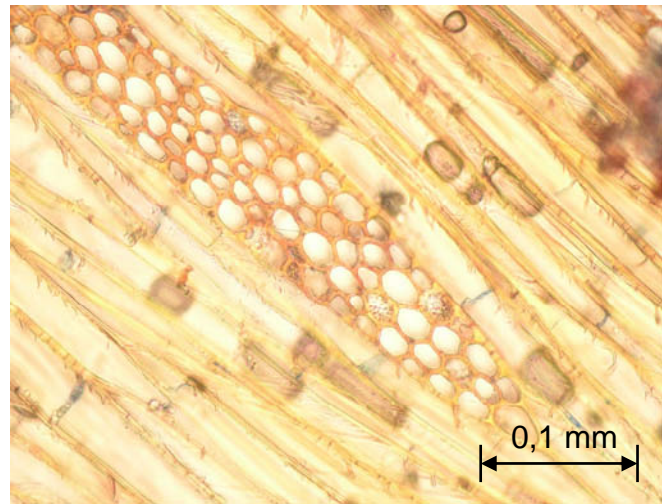
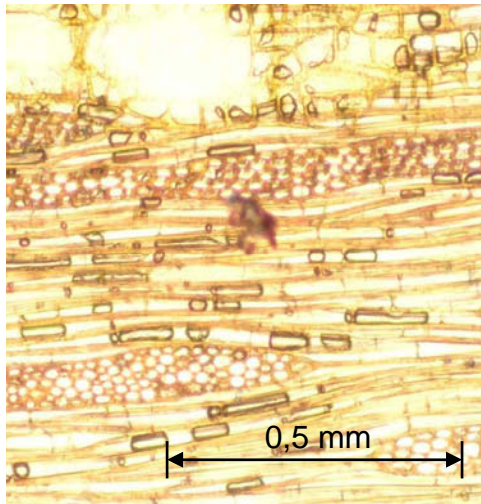


Bild A5 Jati: Tangentialschnitt (10x und 40x)

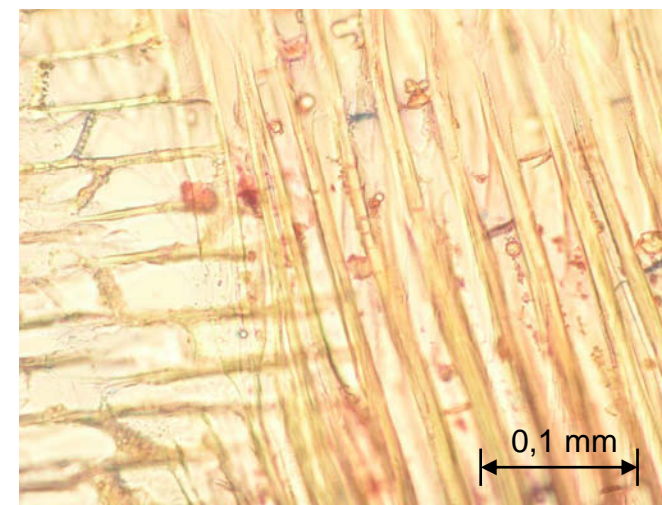
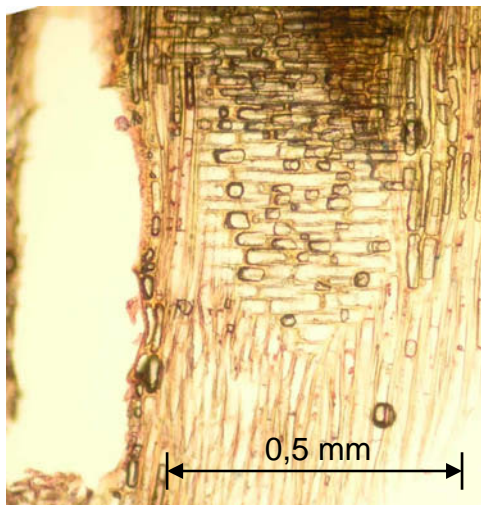


Bild A6 Jati: Radialschnitt (10x und 40x)

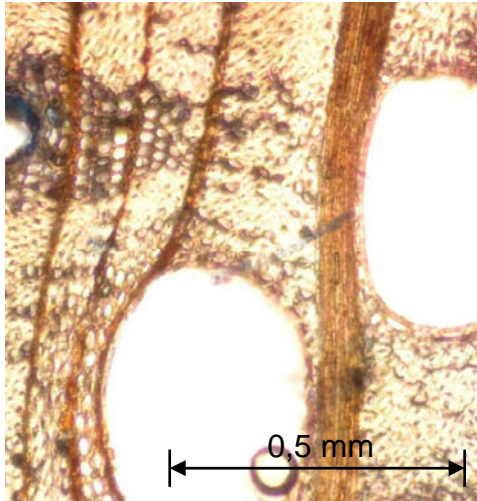


Bild A7 Keruing: Querschnitt (10x und 40x)

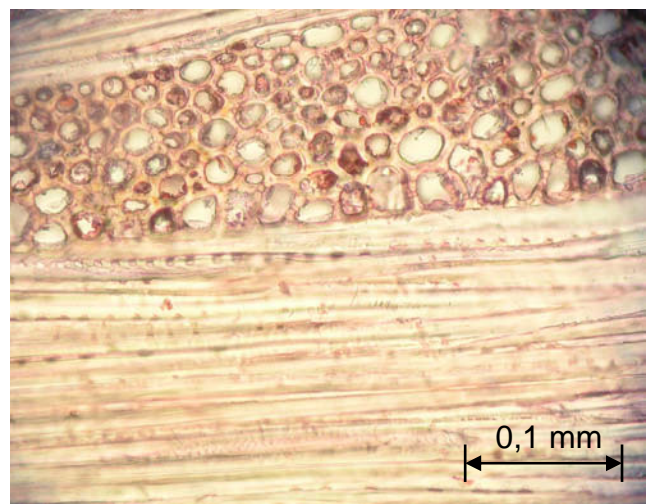
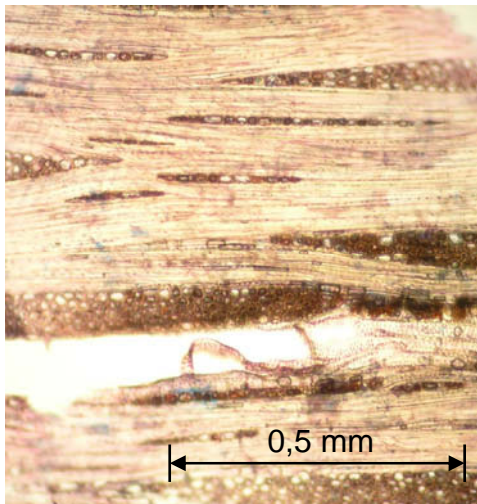


Bild A8 Keruing: Tangentialschnitt (10x und 40x)

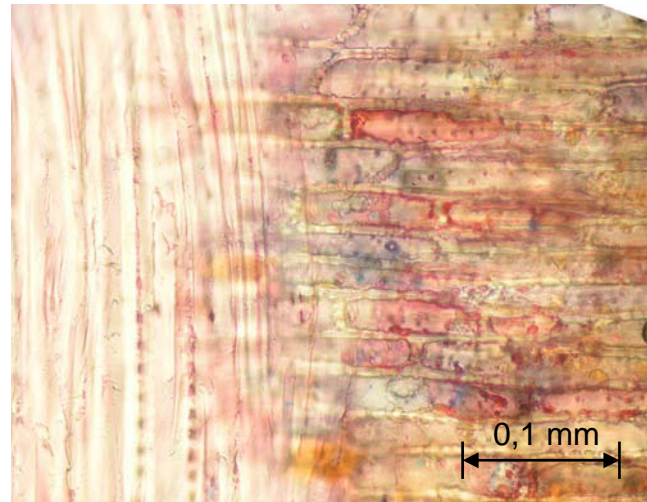
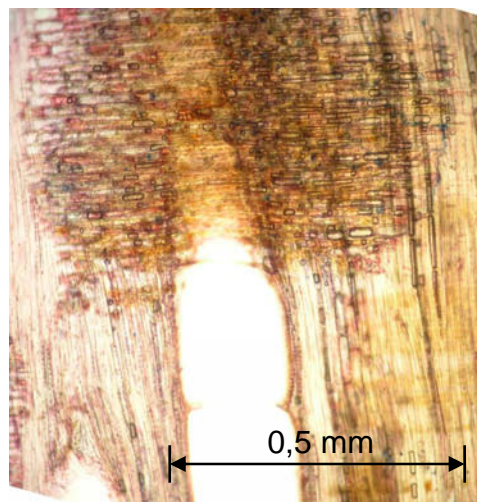


Bild A9 Keruing: Radialschnitt (10x und 40x)

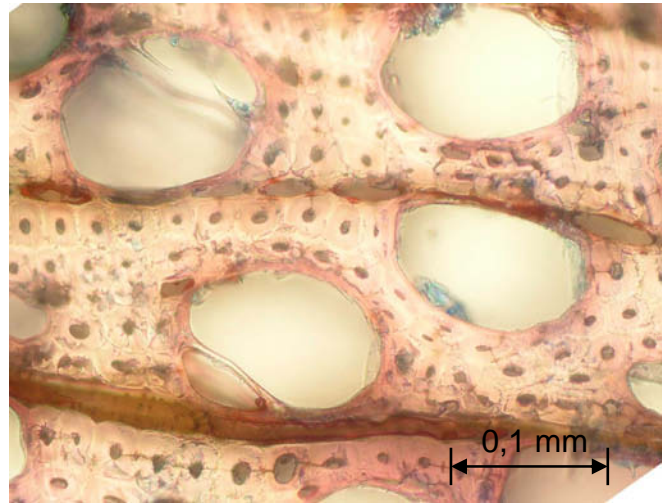
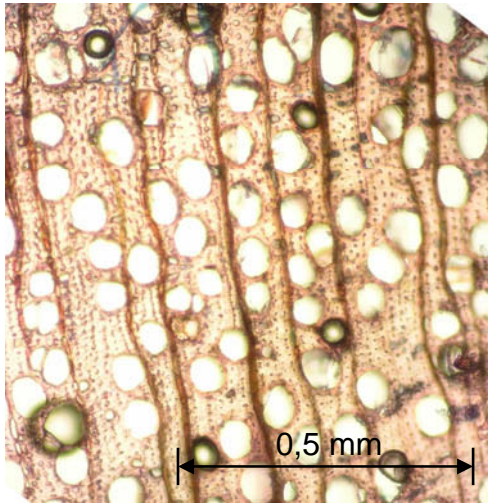


Bild A10 Puspa: Querschnitt (10x und 40x)

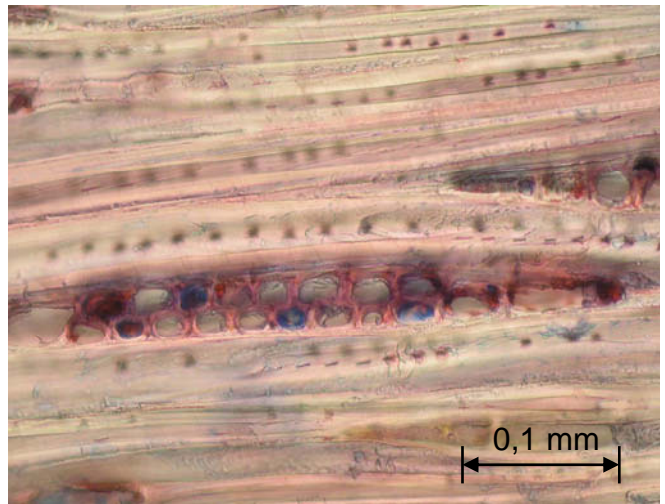
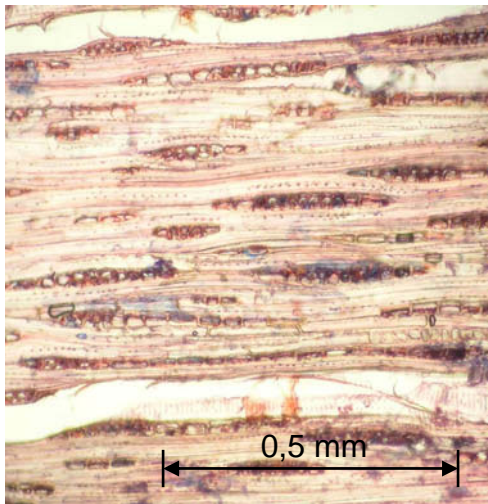


Bild A11 Puspa: Tangentialschnitt (10x und 40x)

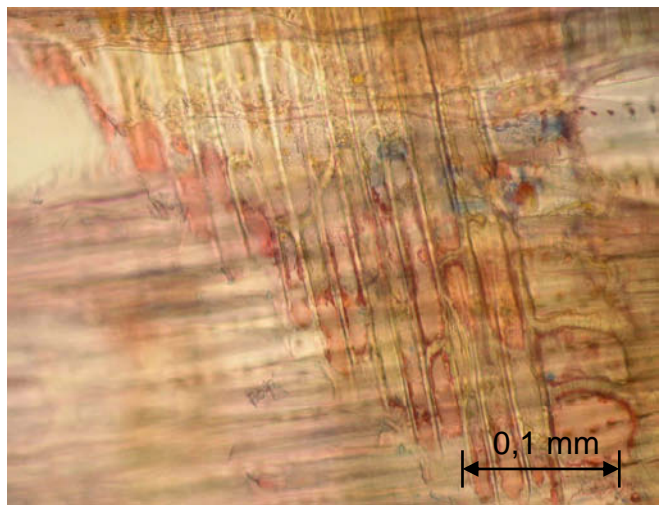
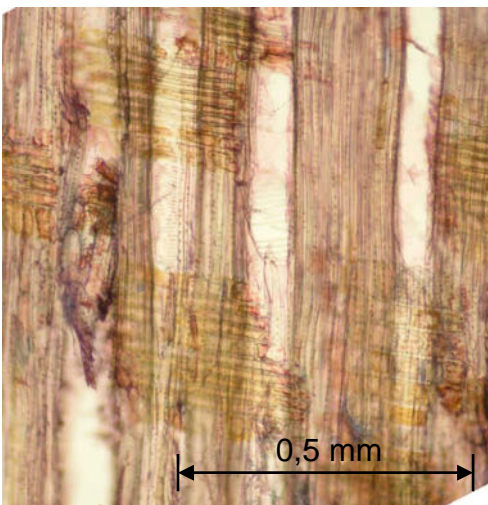


Bild A12 Puspa: Radialschnitt (10x und 40x)

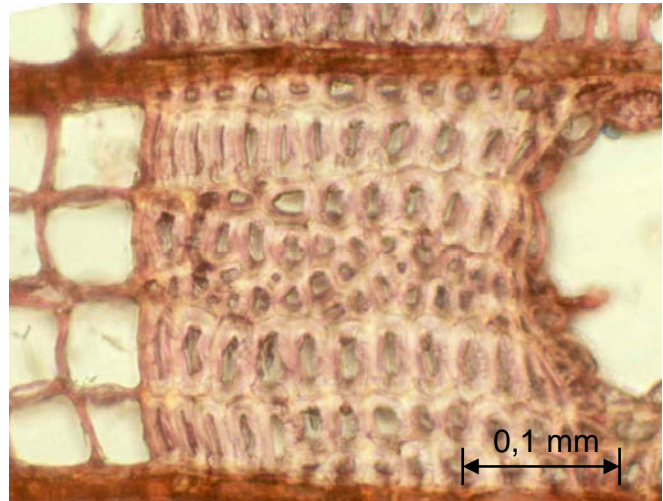
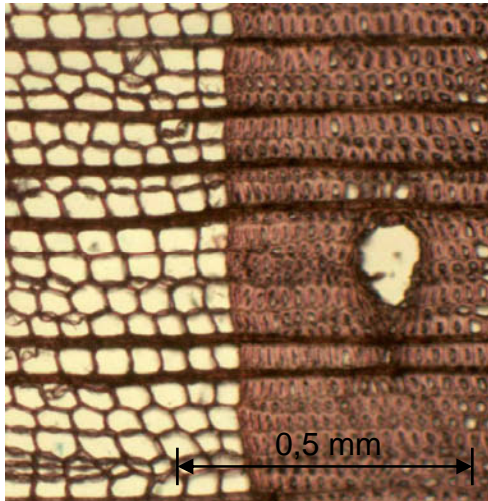


Bild A13 Lärche: Querschnitt (10x und 40x)

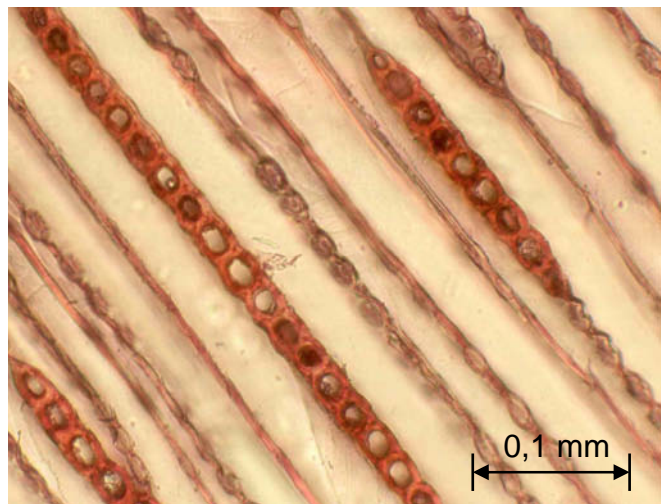
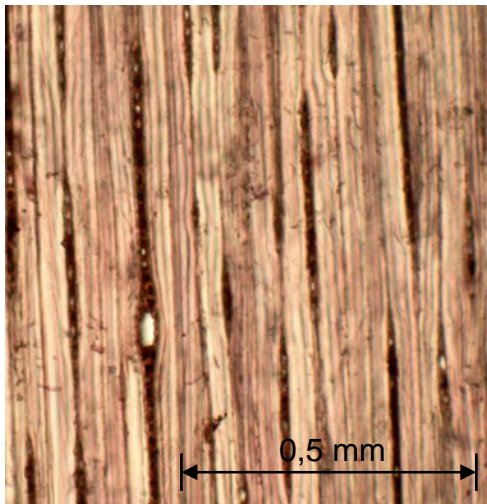


Bild A14 Lärche: Tangentialschnitt (10x und 40x)

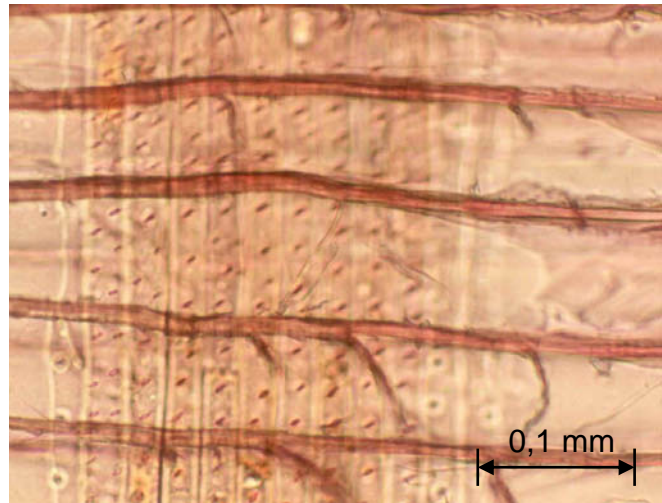
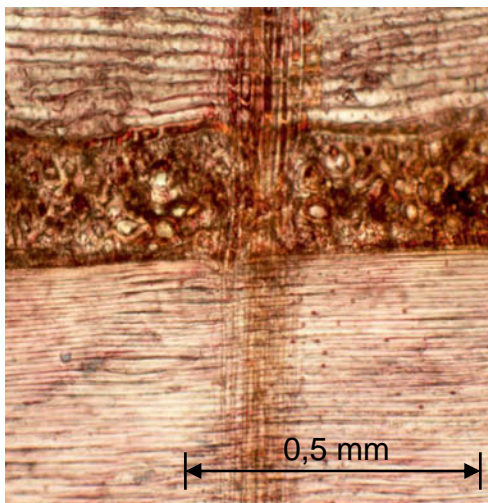


Bild A15 Lärche: Radialschnitt (10x und 40x)

Anhang B Anlagen zu Kapitel 5.1

Tabelle B1 Regressionskurven für Quellmaße bei freier Quellung (t = Zeit in [min])

Holzart	Holzfeuchte zu Versuchsbeginn [%]	Regressionsgleichung: $\alpha = A \cdot (1 - e^{-t/B})$	Quellmaß		
			α_{tan}	α_{rad}	α_{long}
Akasia	0	A	4,99	2,32	0,50
		B	-0,0050	-0,0055	-0,0113
	12	A	2,99	1,71	0,35
		B	-0,0103	-0,0130	-0,0152
	18	A	1,85	0,96	0,35
		B	-0,0093	-0,0116	-0,0073
Jati	0	A	4,63	2,60	0,43
		B	-0,0057	-0,0061	-0,0123
	12	A	2,44	1,34	0,42
		B	-0,0074	-0,0079	-0,0155
	18	A	1,17	0,76	0,32
		B	-0,0066	-0,0078	-0,0080
Keruing	0	A	7,67	3,86	1,18
		B	-0,0040	-0,0053	-0,0083
	12	A	4,91	2,70	0,72
		B	-0,0113	-0,0158	-0,0074
	18	A	3,28	1,41	0,57
		B	-0,0098	-0,0094	-0,0100
Puspa	0	A	7,91	3,85	0,64
		B	-0,0074	-0,0099	-0,0131
	12	A	5,36	2,78	0,53
		B	-0,0153	-0,0140	-0,0192
	18	A	4,07	1,76	0,51
		B	-0,0163	-0,0187	-0,0131
Lärche	0	A	8,69	3,66	0,35
		B	-0,0043	-0,0064	-0,0060
	12	A	6,47	2,42	0,31
		B	-0,0061	-0,0129	-0,0090
	18	A	4,06	1,67	0,24
		B	-0,0036	-0,0075	-0,0069

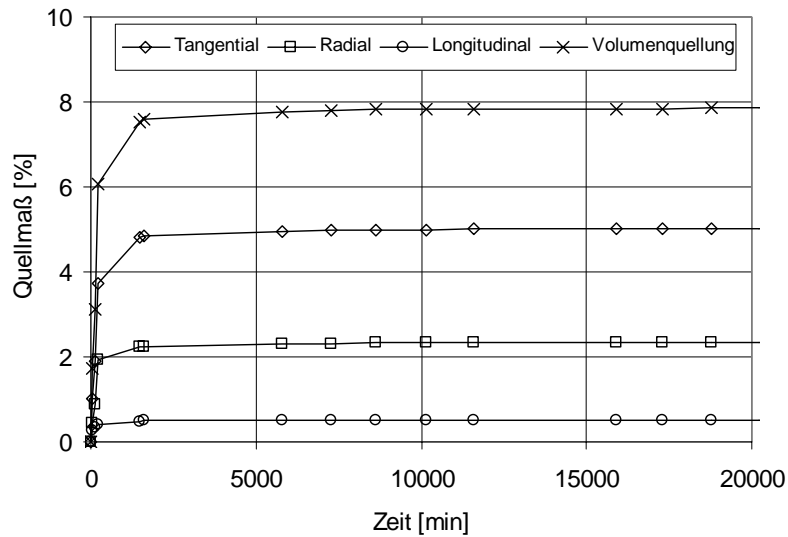


Bild B1 Quellungskurven von Akasia (Mittelwerte; Holzfeuchte zu Versuchsbeginn: 0 %)

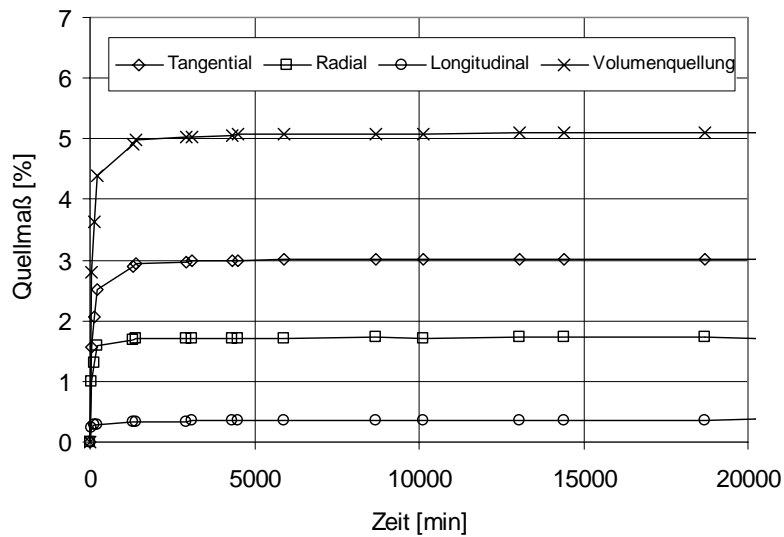


Bild B2 Quellungskurven von Akasia (Mittelwerte; Holzfeuchte zu Versuchsbeginn: 12 %)

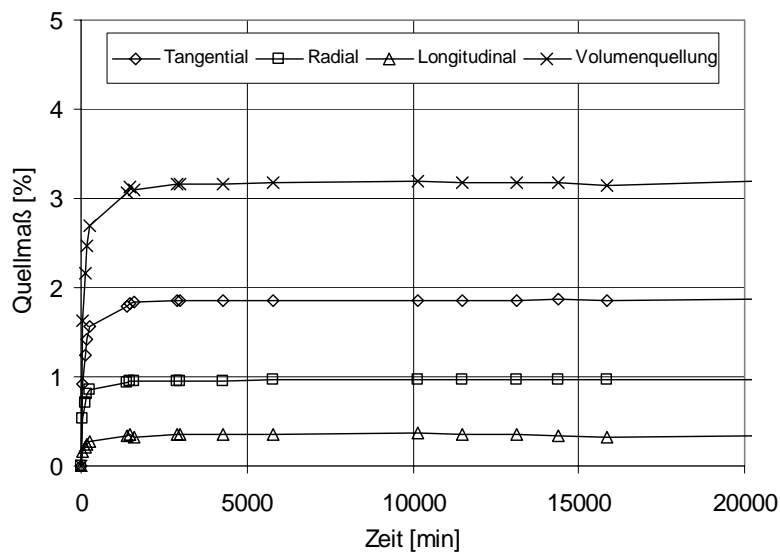


Bild B3 Quellungskurven von Akasia (Mittelwerte; Holzfeuchte zu Versuchsbeginn: 18 %)

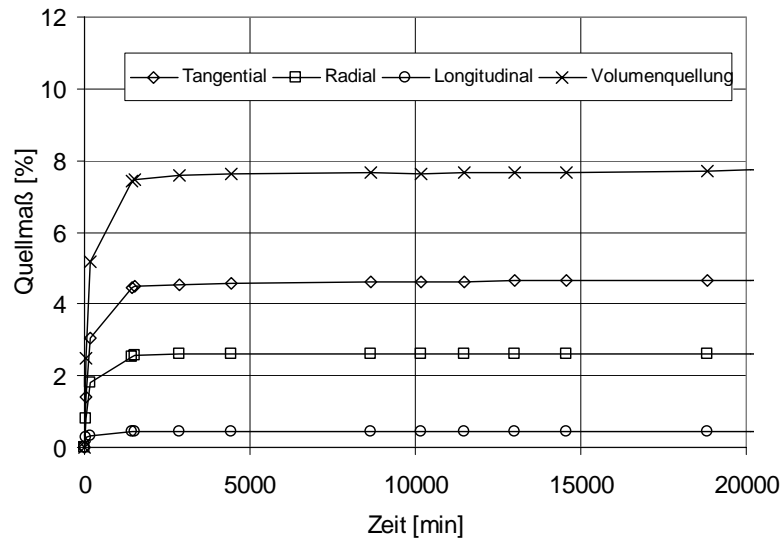


Bild B4 Quellungskurven von Jati (Mittelwerte; Holzfeuchte zu Versuchsbeginn: 0 %)

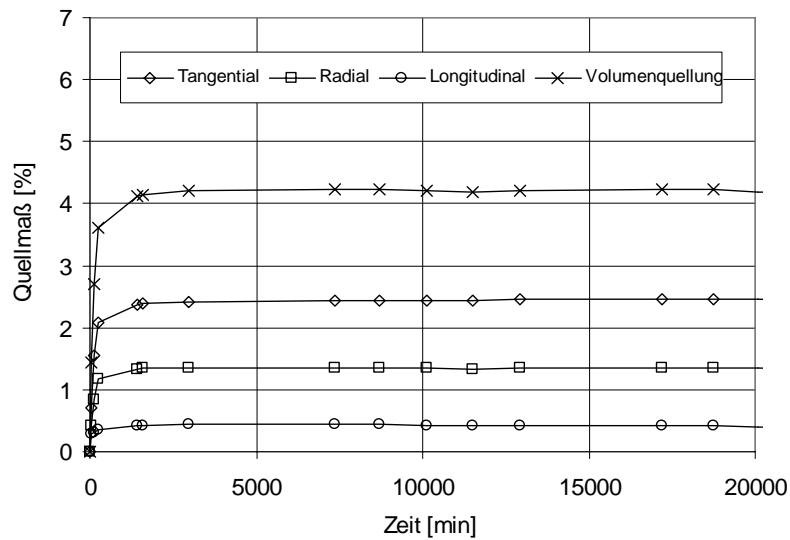


Bild B5 Quellungskurven von Jati (Mittelwerte; Holzfeuchte zu Versuchsbeginn: 12 %)

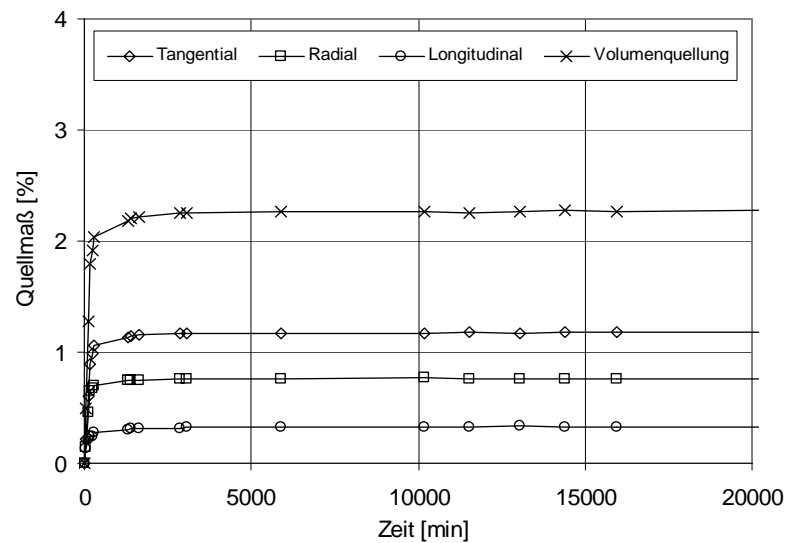


Bild B6 Quellungskurven von Jati (Mittelwerte; Holzfeuchte zu Versuchsbeginn: 18 %)

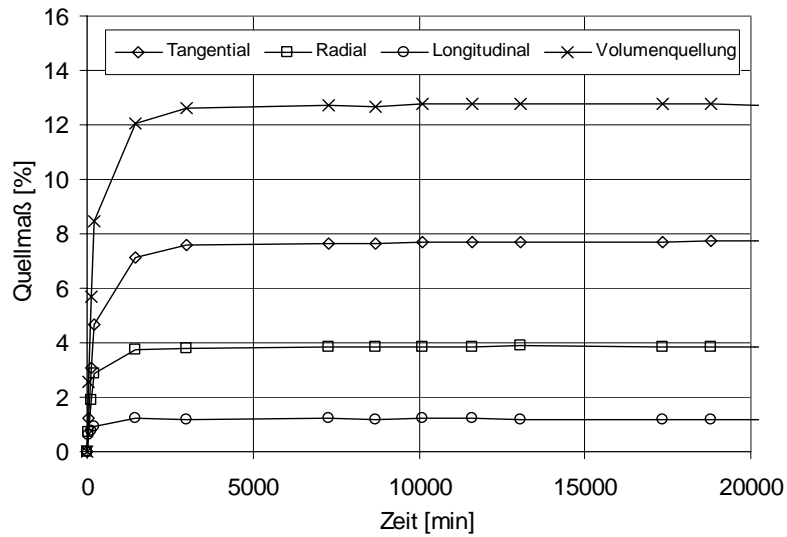


Bild B7 Quellungskurven von Keruing (Mittelwerte; Holzfeuchte zu Versuchsbeginn: 0 %)

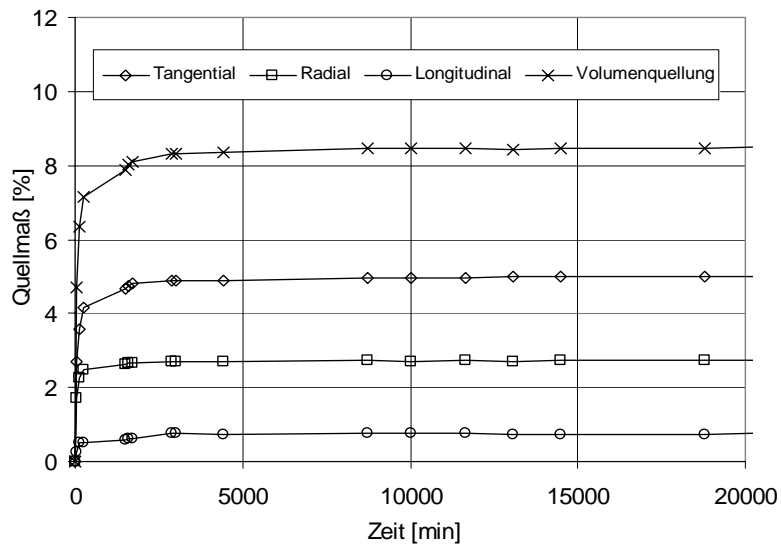


Bild B8 Quellungskurven von Keruing (Mittelwerte; Holzfeuchte zu Versuchsbeginn: 12 %)

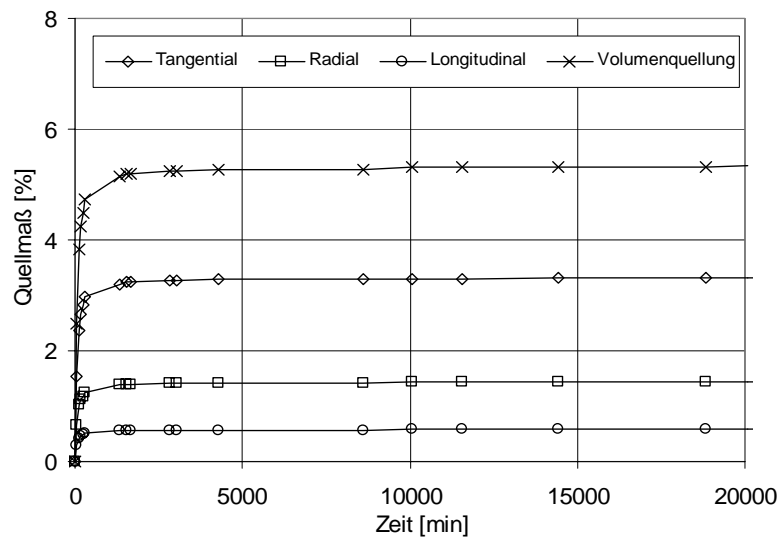


Bild B9 Quellungskurven von Keruing (Mittelwerte; Holzfeuchte zu Versuchsbeginn: 18 %)

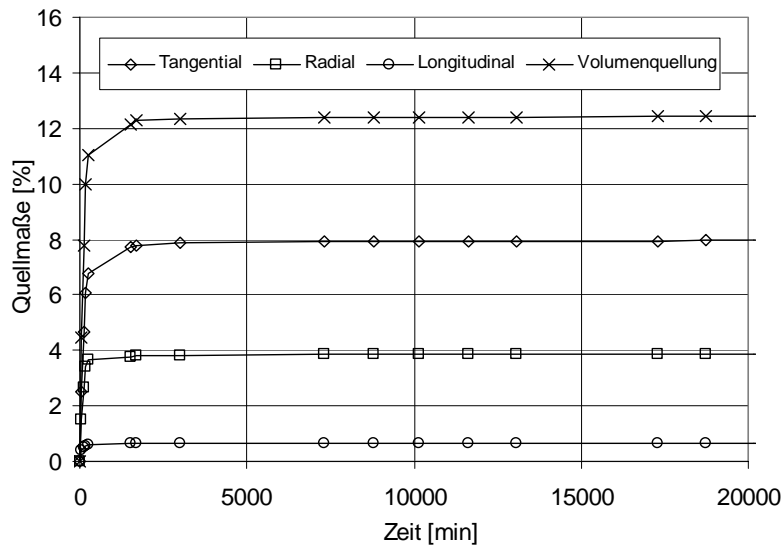


Bild B10 Quellungskurven von Puspa (Mittelwerte; Holzfeuchte zu Versuchsbeginn: 0 %)

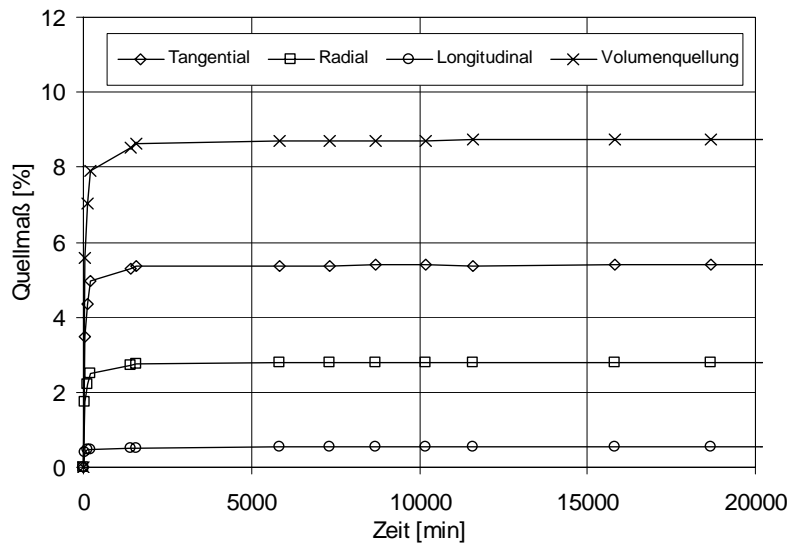


Bild B11 Quellungskurven von Puspa (Mittelwerte; Holzfeuchte zu Versuchsbeginn: 12 %)

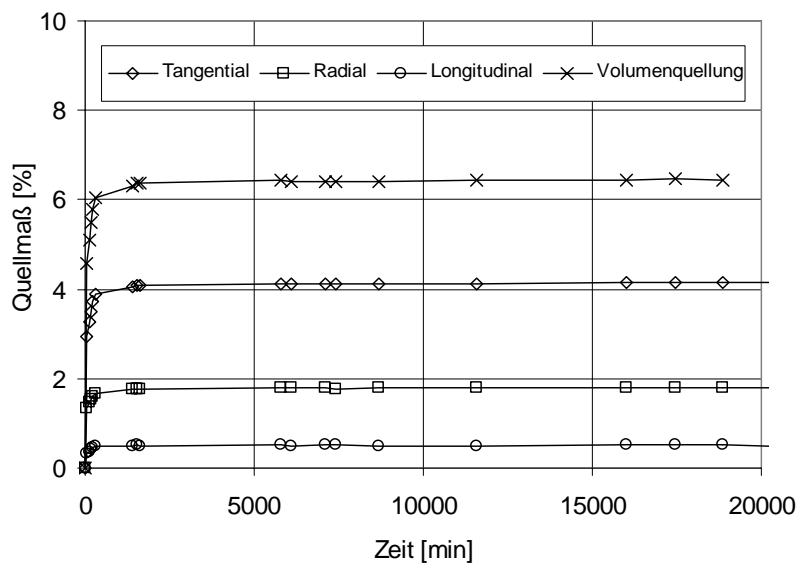


Bild B12 Quellungskurven von Puspa (Mittelwerte; Holzfeuchte zu Versuchsbeginn: 18 %)

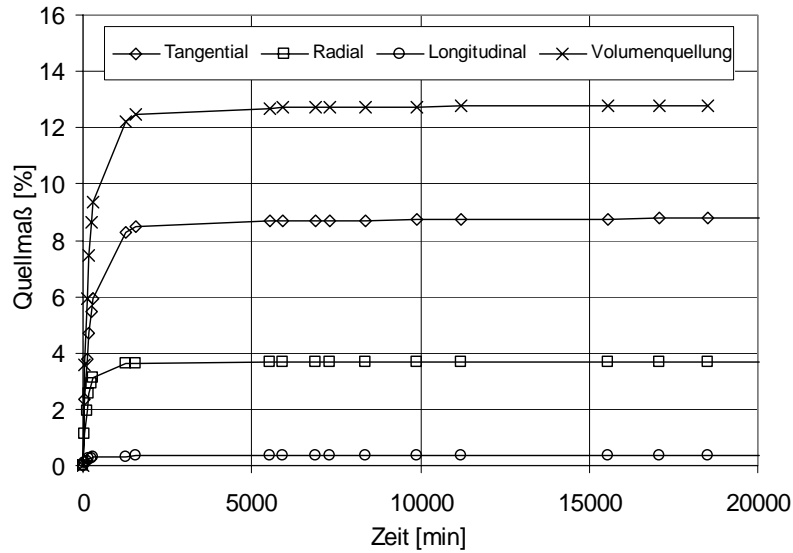


Bild B13 Quellungskurven von Lärche (Mittelwerte; Holzfeuchte zu Versuchsbeginn: 0 %)

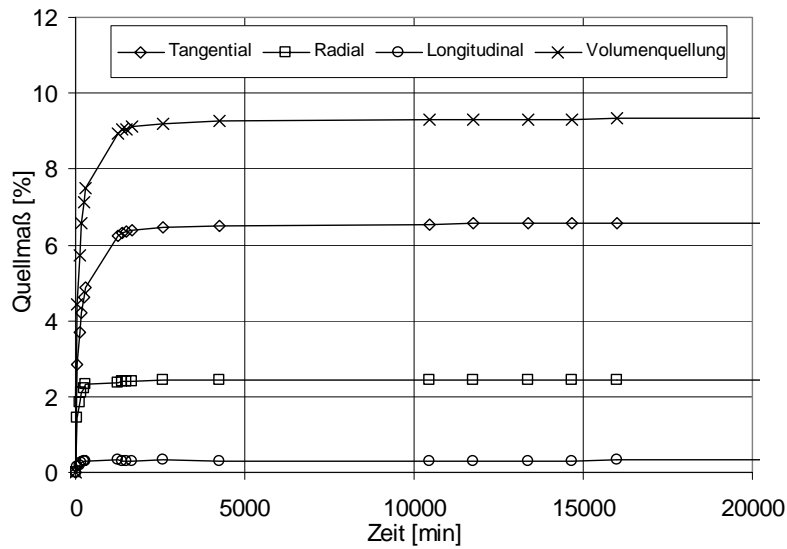


Bild B14 Quellungskurven von Lärche (Mittelwerte; Holzfeuchte zu Versuchsbeginn: 12 %)

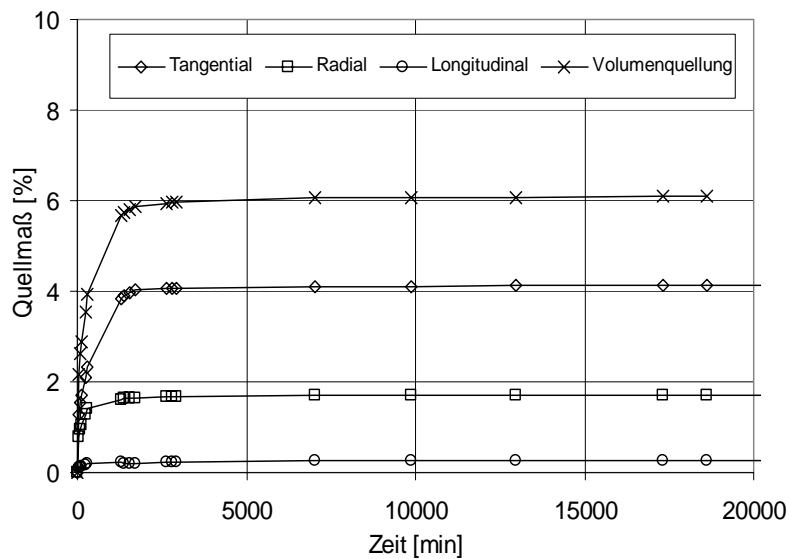


Bild B15 Quellungskurven von Lärche (Mittelwerte; Holzfeuchte zu Versuchsbeginn: 18 %)

Anhang C Anlagen zu Kapitel 5.2

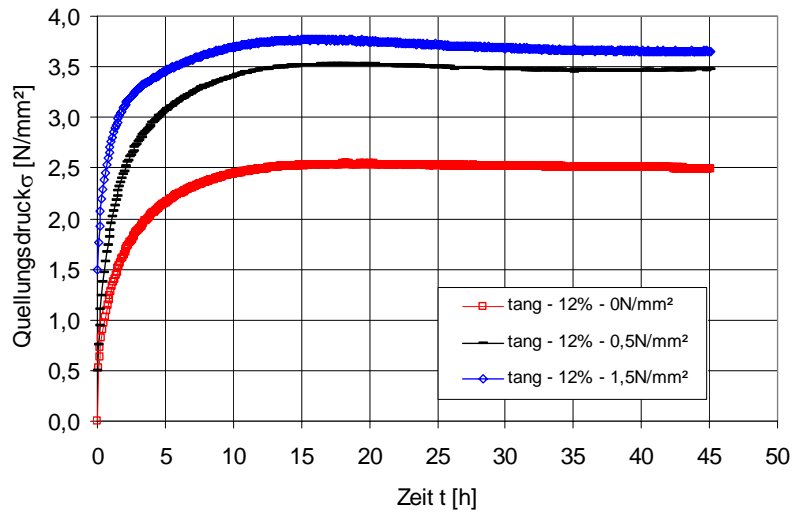


Bild C1 Akasia: tangentialer Quellsdruck (Mittelwerte; $u_0 = 12\%$; $\sigma_v = 0 - 1,5 \text{ N/mm}^2$)

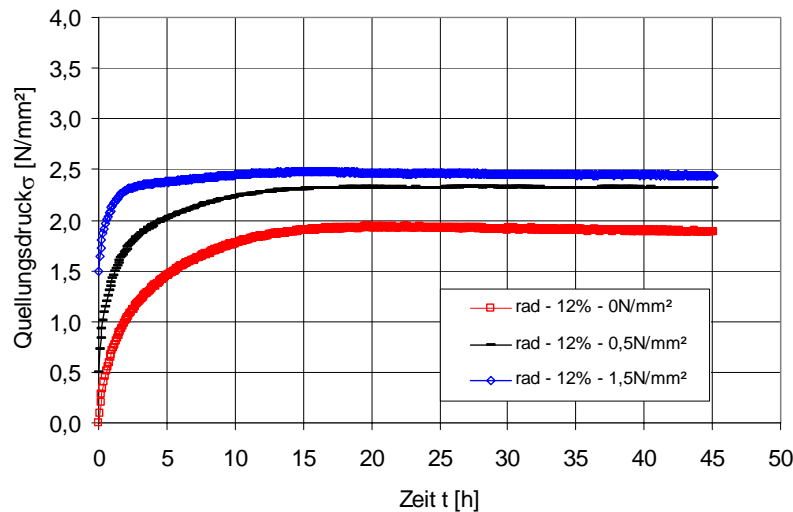


Bild C2 Akasia: radialer Quellsdruck (Mittelwerte; $u_0 = 12\%$; $\sigma_v = 0 - 1,5 \text{ N/mm}^2$)

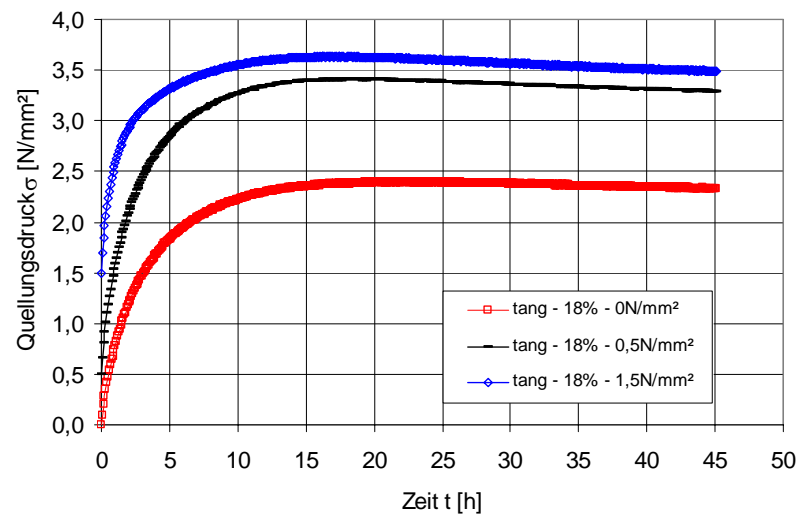


Bild C3 Akasia: tangentialer Quellsdruck (Mittelwerte; $u_0 = 18\%$; $\sigma_v = 0 - 1,5 \text{ N/mm}^2$)

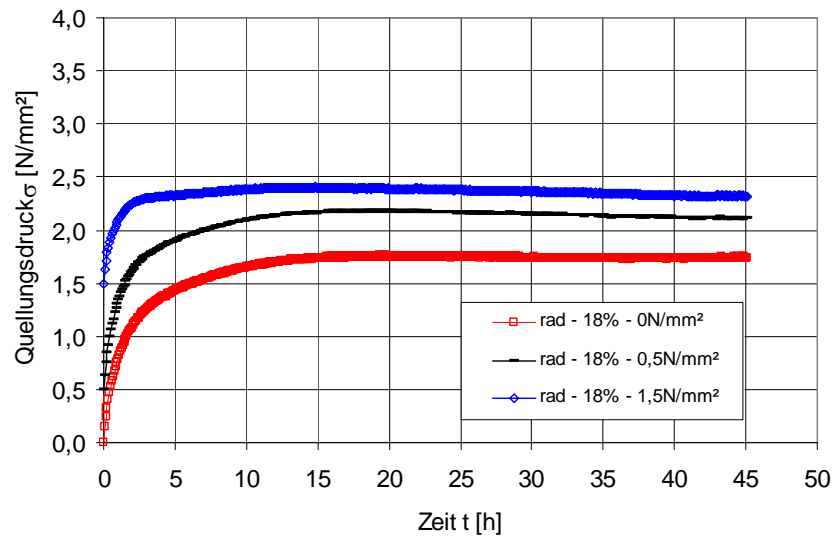


Bild C4 Akasia: radialer Quellungsdruck (Mittelwerte; $u_0 = 18\%$; $\sigma_V = 0 - 1,5 \text{ N/mm}^2$)

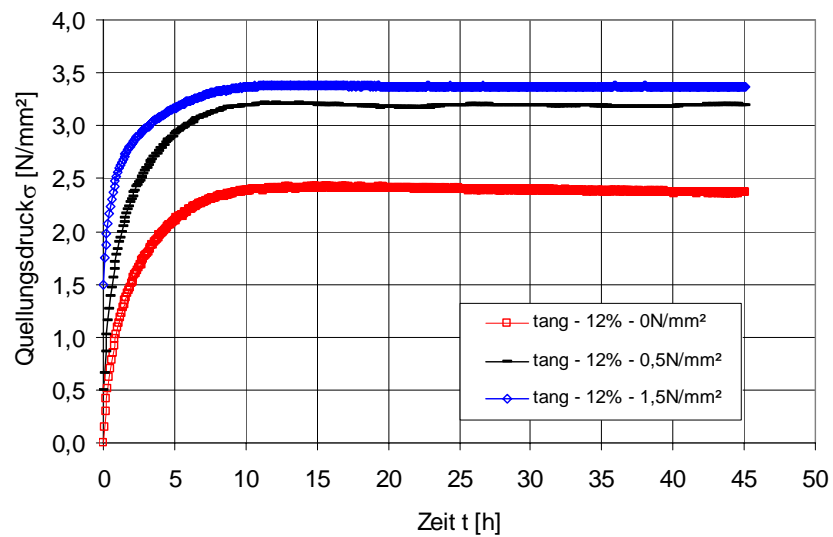


Bild C5 Jati: tangentialer Quellungsdruck (Mittelwerte; $u_0 = 12\%$; $\sigma_V = 0 - 1,5 \text{ N/mm}^2$)

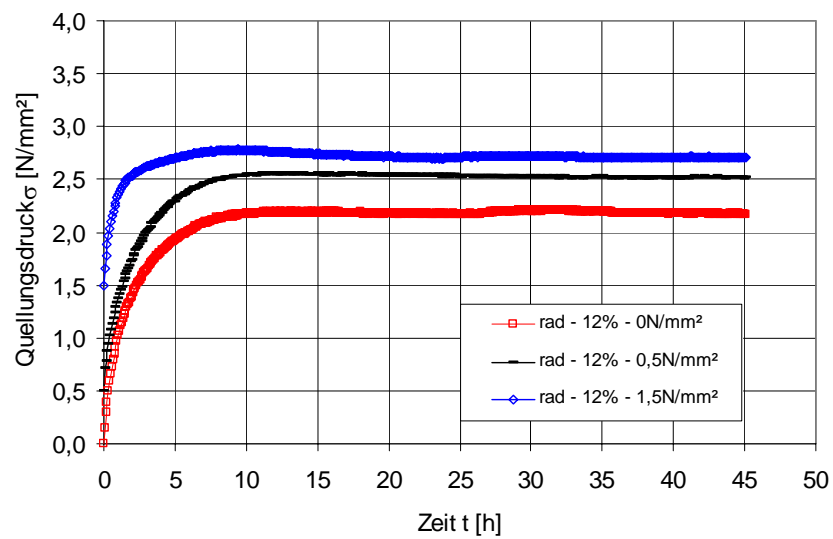


Bild C6 Jati: radialer Quellungsdruck (Mittelwerte; $u_0 = 12\%$; $\sigma_V = 0 - 1,5 \text{ N/mm}^2$)

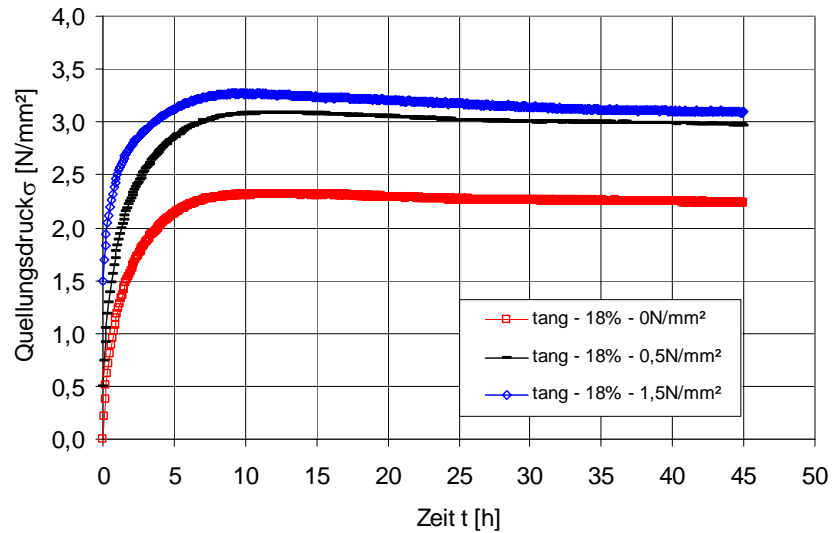


Bild C7 Jati: tangentialer Quellungsdruck (Mittelwerte; $u_0 = 18\%$; $\sigma_V = 0 - 1,5 \text{ N/mm}^2$)

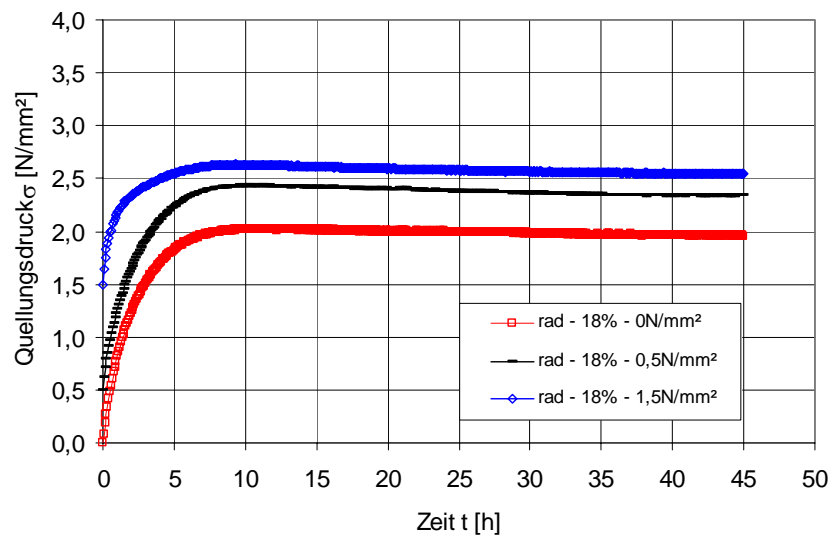


Bild C8 Jati: radialer Quellungsdruck (Mittelwerte; $u_0 = 18\%$; $\sigma_V = 0 - 1,5 \text{ N/mm}^2$)

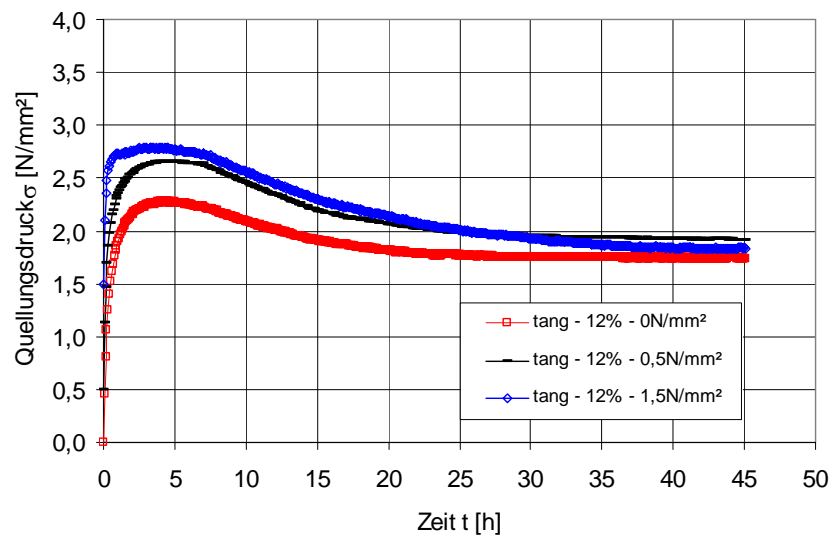


Bild C9 Keruing: tangentialer Quellungsdruck (Mittelwerte; $u_0 = 12\%$; $\sigma_V = 0 - 1,5 \text{ N/mm}^2$)

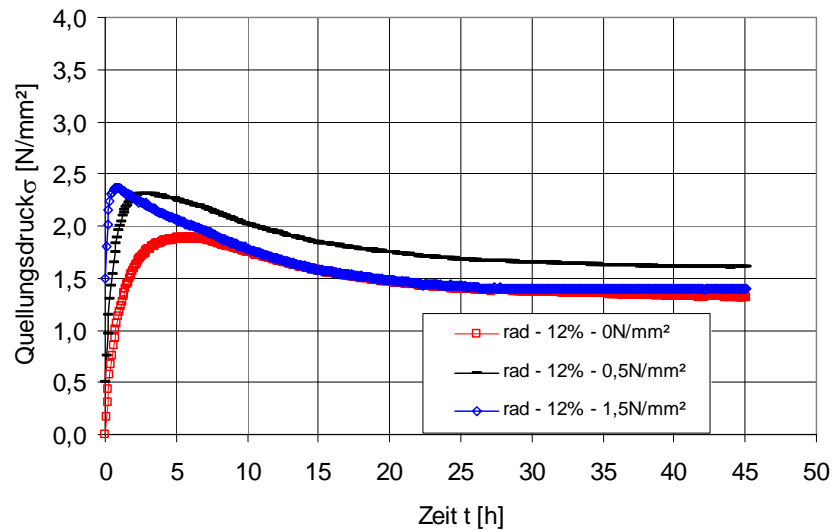


Bild C10 Keruing: radialer Quellungsdruk (Mittelwerte; $u_0 = 12\%$; $\sigma_V = 0 - 1,5 \text{ N/mm}^2$)

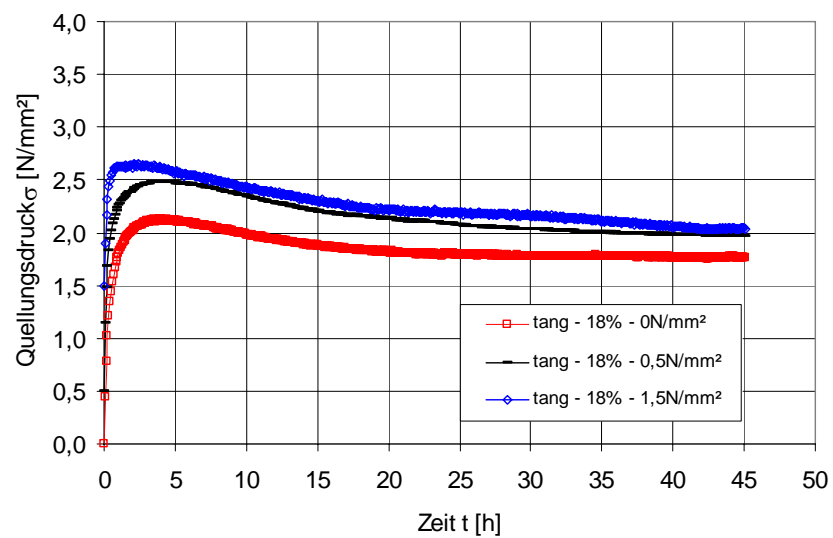


Bild C11 Keruing: tangentialer Quellungsdruk (Mittelwerte; $u_0 = 18\%$; $\sigma_V = 0 - 1,5 \text{ N/mm}^2$)

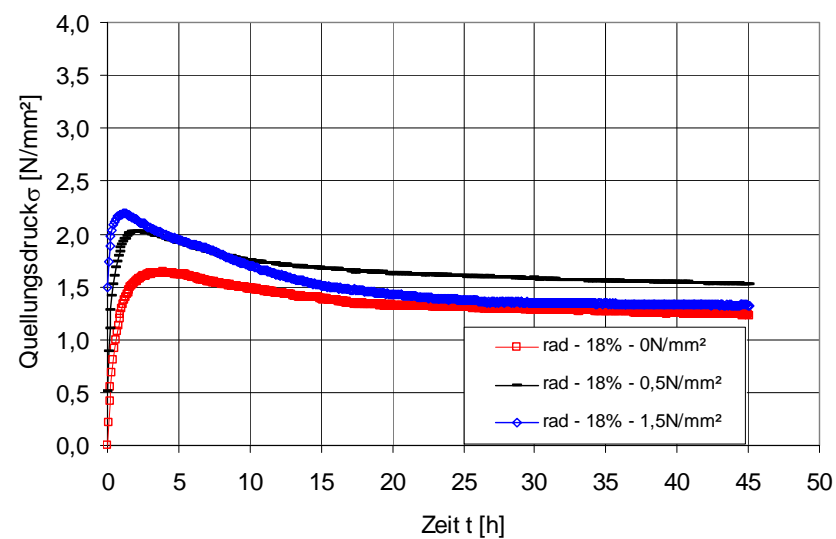


Bild C12 Keruing: radialer Quellungsdruk (Mittelwerte; $u_0 = 18\%$; $\sigma_V = 0 - 1,5 \text{ N/mm}^2$)

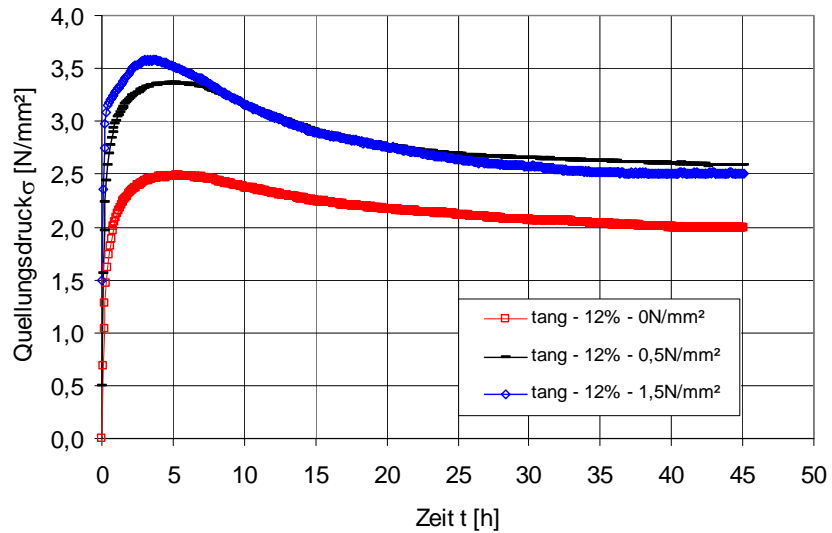


Bild C13 Puspa: tangentialer Quellungsdruck (Mittelwerte; $u_0 = 12\%$; $\sigma_V = 0 - 1,5 \text{ N/mm}^2$)

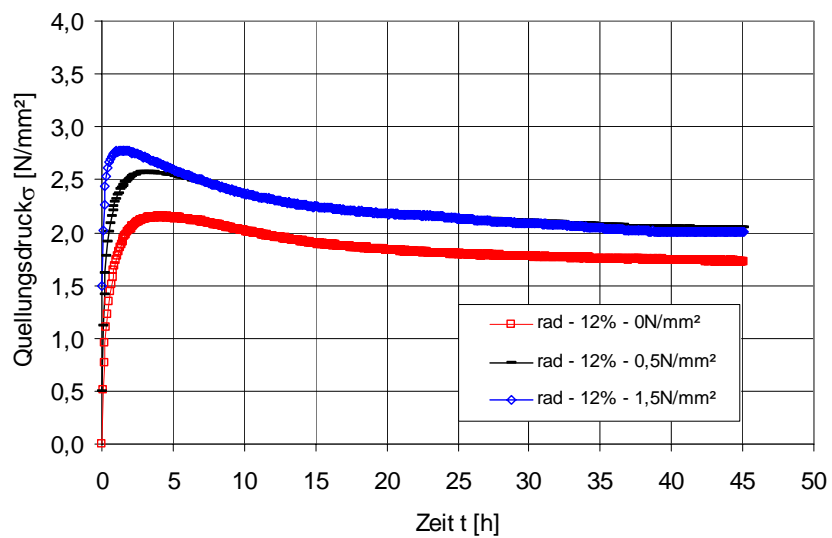


Bild C14 Puspa: radialer Quellungsdruck (Mittelwerte; $u_0 = 12\%$; $\sigma_V = 0 - 1,5 \text{ N/mm}^2$)

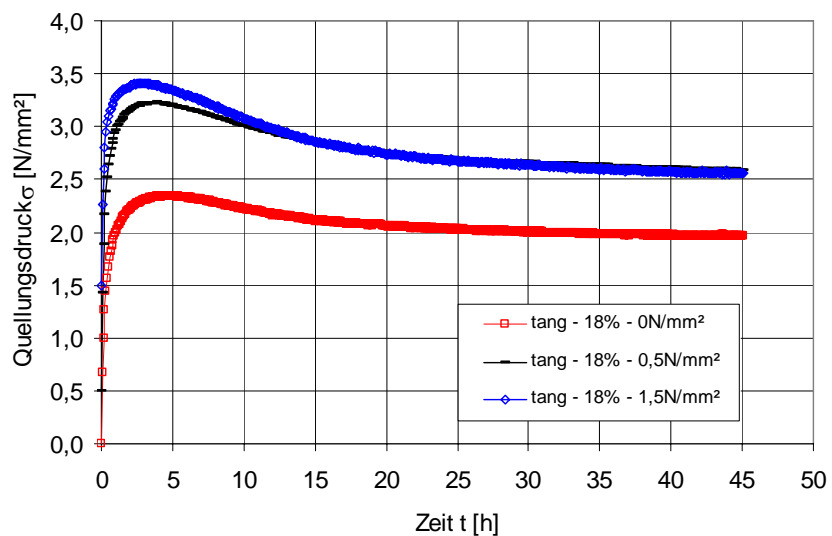


Bild C15 Puspa: tangentialer Quellungsdruck (Mittelwerte; $u_0 = 18\%$; $\sigma_V = 0 - 1,5 \text{ N/mm}^2$)

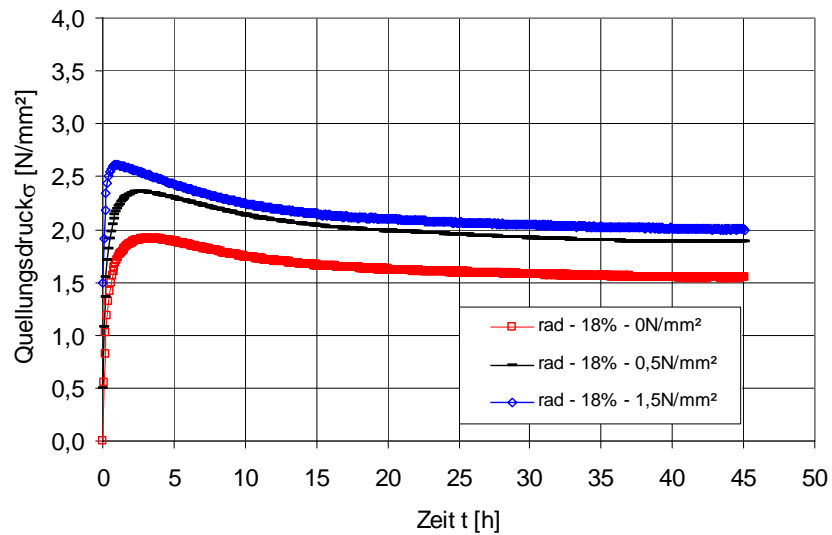


Bild C16 Puspa: radialer Quellungsdruck (Mittelwerte; $u_0 = 18\%$; $\sigma_V = 0 - 1,5 \text{ N/mm}^2$)

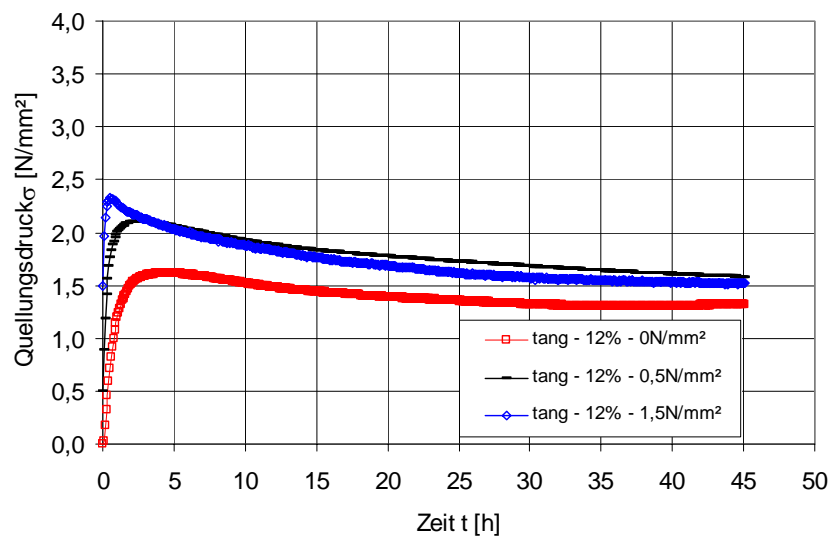


Bild C17 Lärche: tangentialer Quellungsdruck (Mittelwerte; $u_0 = 12\%$; $\sigma_V = 0 - 1,5 \text{ N/mm}^2$)

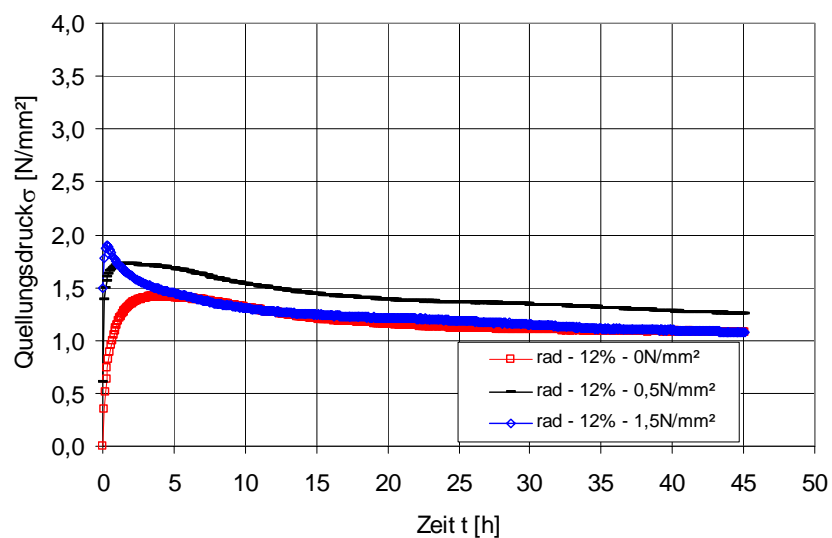


Bild C18 Lärche: radialer Quellungsdruck (Mittelwerte; $u_0 = 12\%$; $\sigma_V = 0 - 1,5 \text{ N/mm}^2$)

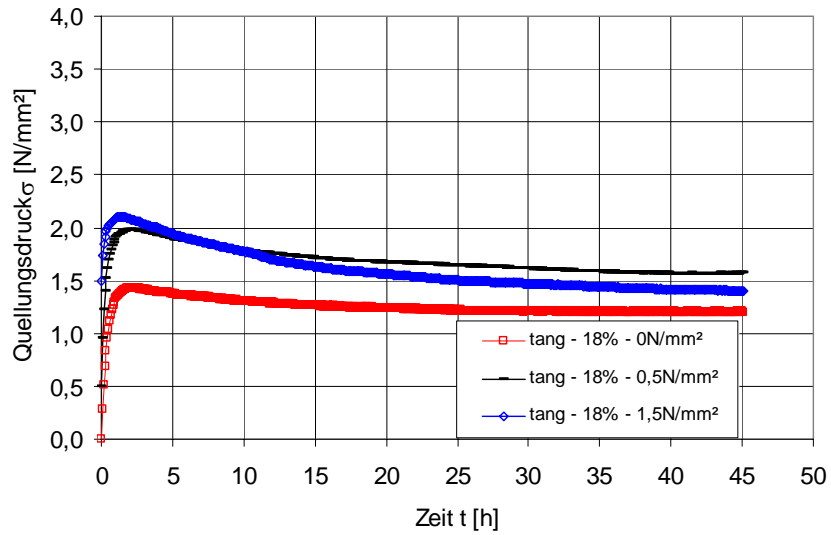


Bild C19 Lärche: tangentialer Quellungsdruck (Mittelwerte; $u_0 = 18\%$; $\sigma_V = 0 - 1,5 \text{ N/mm}^2$)

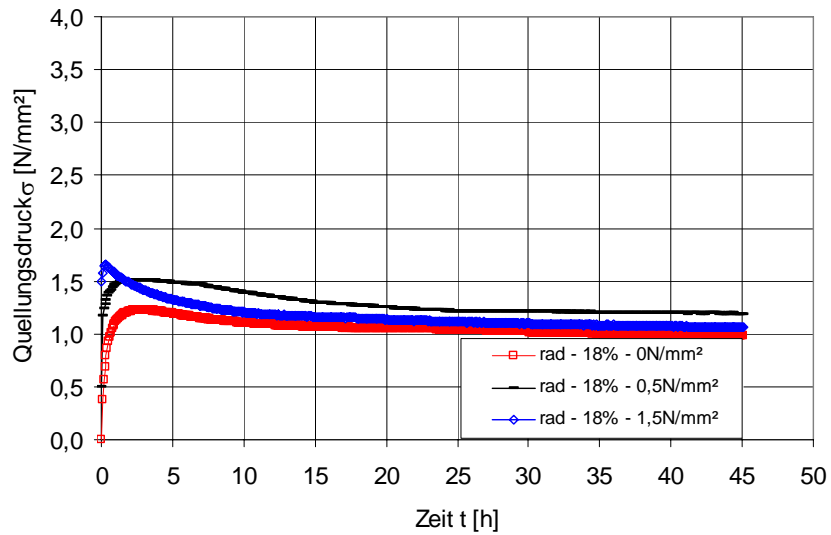


Bild C20 Lärche: radialer Quellungsdruck (Mittelwerte; $u_0 = 18\%$; $\sigma_V = 0 - 1,5 \text{ N/mm}^2$)

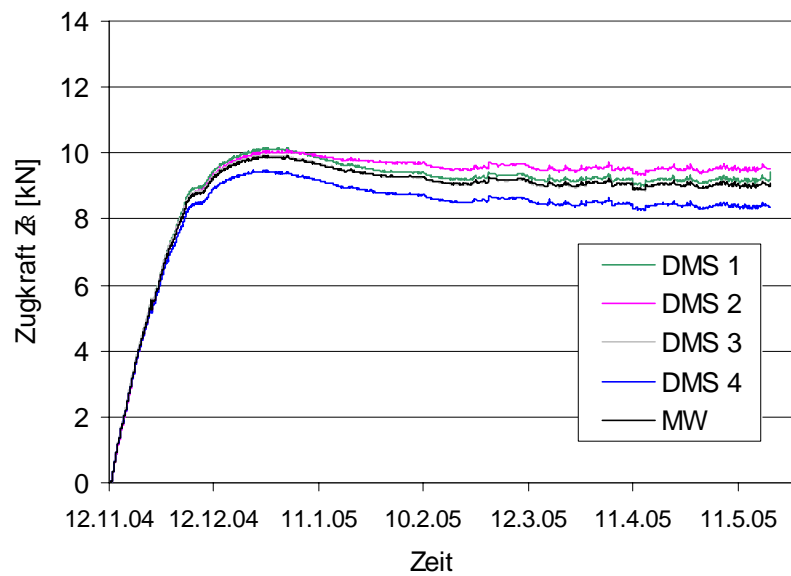
Anhang D Anlagen zu Kapitel 7.1

Bild D1 stehender Rohrabschnitt 1 (Vorspannung 5 kN): Verlauf der Zugkraft in Spanning 1 infolge Quellen

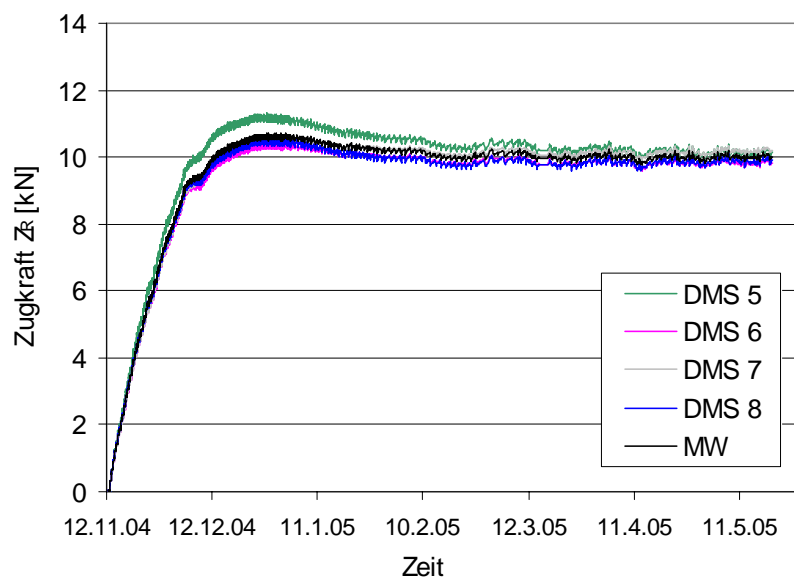


Bild D2 stehender Rohrabschnitt 1 (Vorspannung 5 kN): Verlauf der Zugkraft in Spanning 2 infolge Quellen

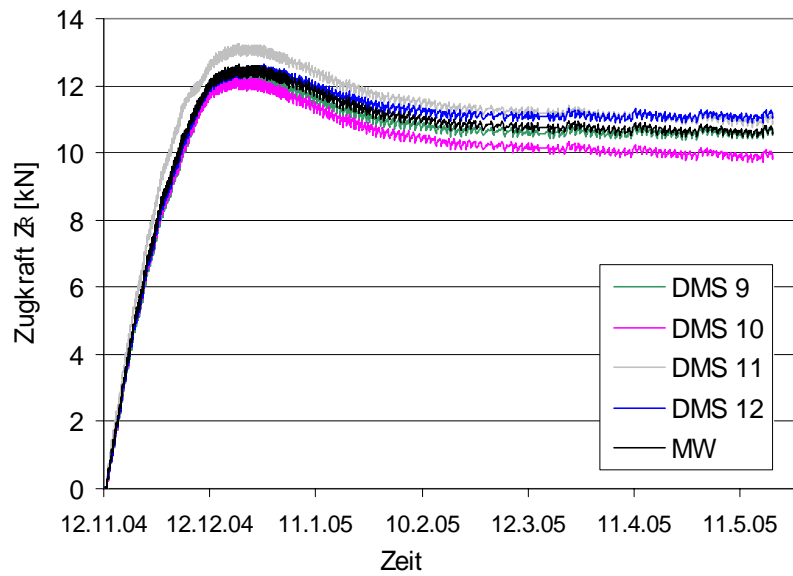


Bild D3 stehender Rohrabschnitt 2 (Vorspannung 20 kN): Verlauf der Zugkraft in Spanning 1 infolge Quellen

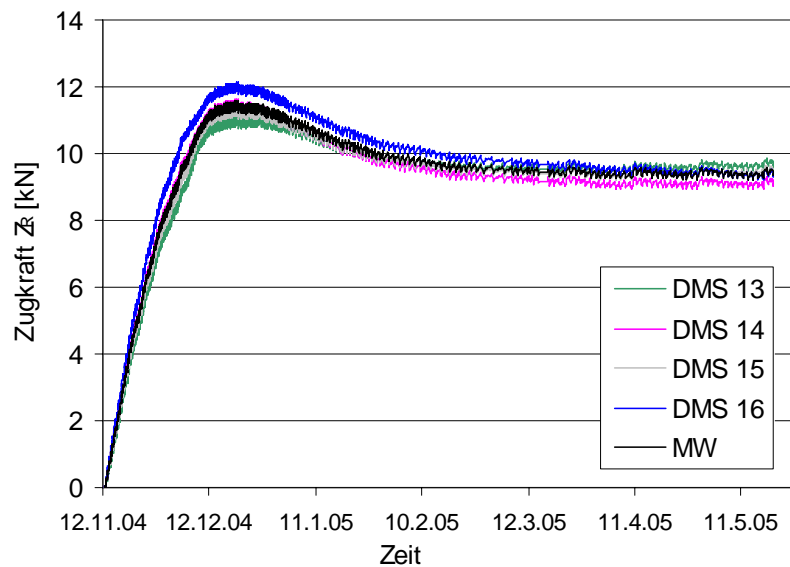


Bild D4 stehender Rohrabschnitt 2 (Vorspannung 20 kN): Verlauf der Zugkraft in Spanning 2 infolge Quellen

Anhang E Anlagen zu Kapitel 7.2

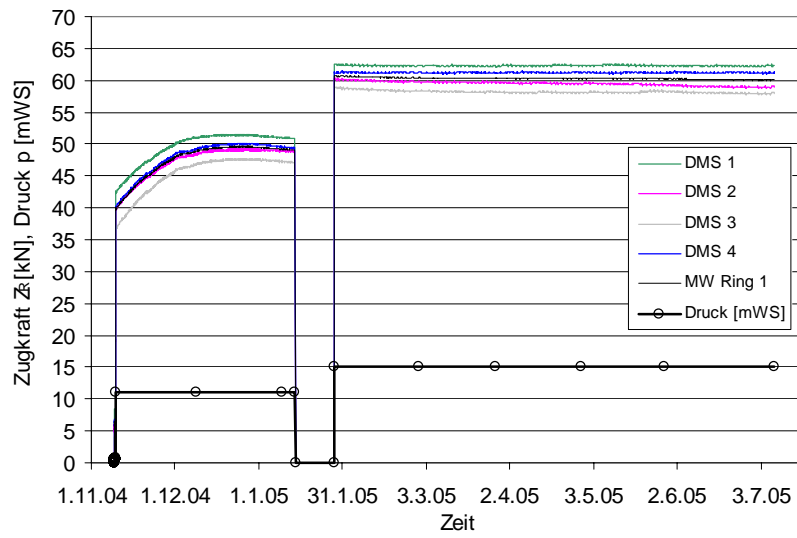


Bild E1 horizontaler Rohrabschnitt: Verlauf der Zugkraft in Spannring 1

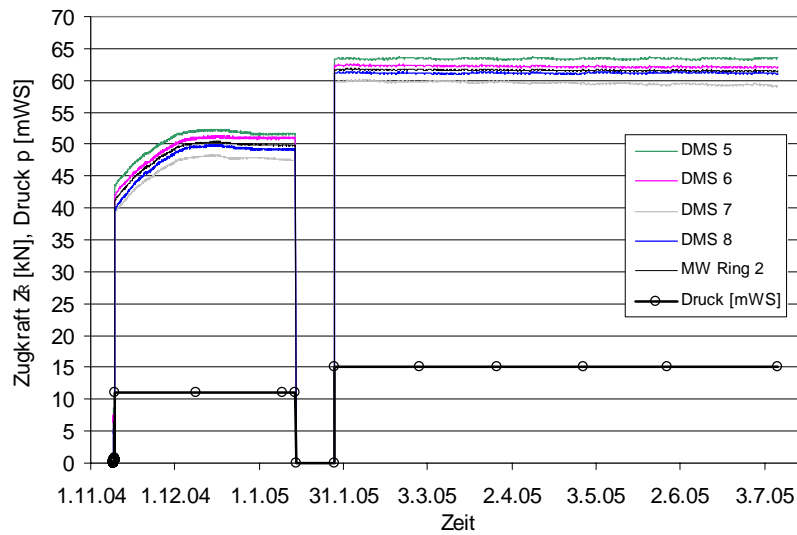


Bild E2 horizontaler Rohrabschnitt: Verlauf der Zugkraft in Spannring 2

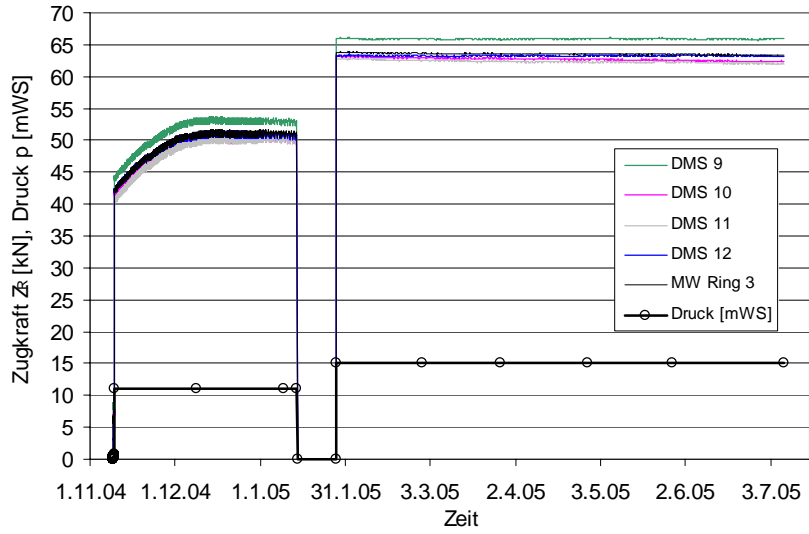


Bild E3 horizontaler Rohrabschnitt: Verlauf der Zugkraft in Spanning 3

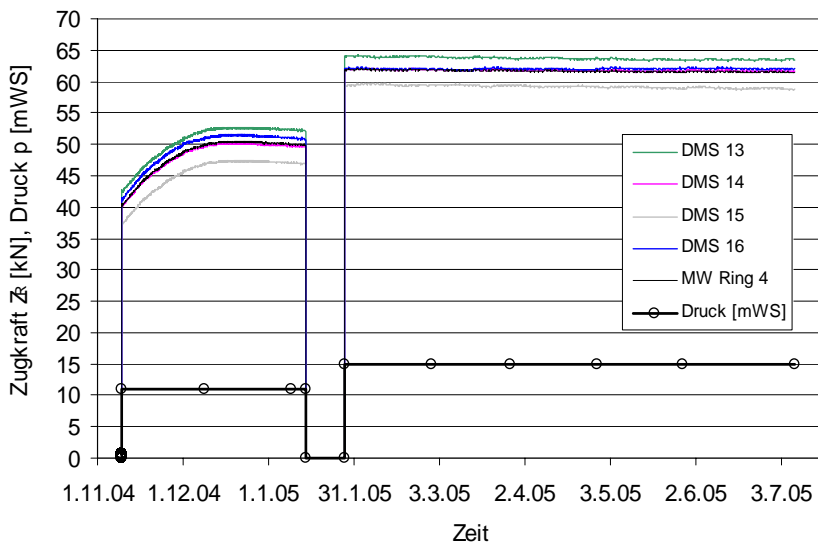


Bild E4 horizontaler Rohrabschnitt: Verlauf der Zugkraft in Spanning 4

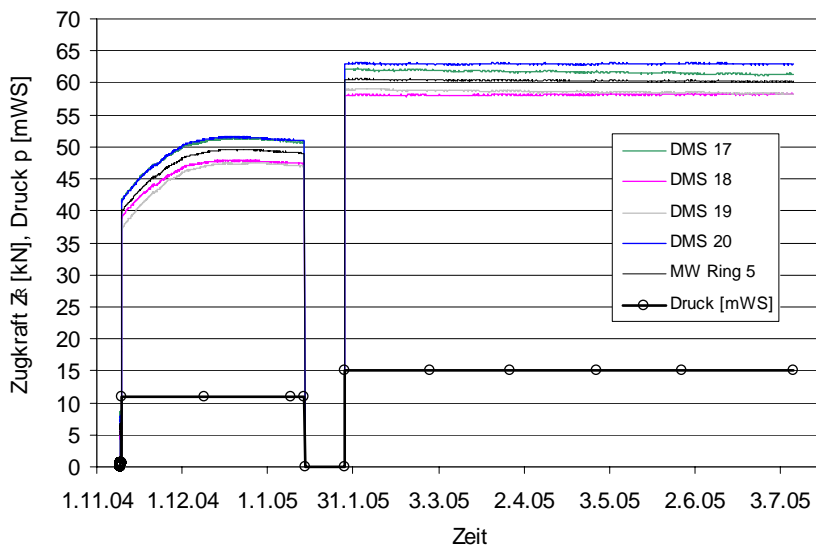


Bild E5 horizontaler Rohrabschnitt: Verlauf der Zugkraft in Spanning 5

Anhang F Anlagen zu Kapitel 10.2

Tabelle F1 Ausnutzungsgrad für Druckrohrleitung auf Sättel mit $d_i = 1,00$ m
 Holzdaube $d_D = 70$ mm, C24; Spannring $b_R/d_R = 60/6$ mm, S235; Spansschloss M27, S235

p [mWS]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$e_R = 10$ cm												
σ_R	21%	23%	26%	29%	32%	34%	37%	40%	43%	45%	48%	51%
F_S	18%	20%	23%	25%	27%	30%	32%	34%	37%	39%	41%	44%
$\sigma_{c,90,U}$	71%	71%	71%	70%	70%	70%	70%	70%	69%	69%	69%	69%
$\sigma_{c,90,rad}$	16%	24%	31%	38%	45%	52%	60%	67%	74%	81%	88%	95%
σ	11%	17%	23%	29%	35%	41%	47%	53%	59%	65%	71%	77%
τ	15%	23%	30%	37%	44%	52%	59%	66%	74%	81%	88%	95%
$e_R = 20$ cm												
σ_R	30%	35%	41%	47%	52%	58%	64%	69%	75%			
F_S	26%	31%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%			
$\sigma_{c,90,U}$	69%	69%	68%	68%	67%	67%	66%	66%	65%			
$\sigma_{c,90,rad}$	18%	27%	37%	46%	55%	64%	73%	83%	92%			
σ	13%	21%	29%	37%	45%	53%	61%	69%	77%			
τ	18%	28%	38%	48%	58%	68%	78%	88%	98%			
$e_R = 30$ cm												
σ_R	38%	47%	56%	64%	73%	81%	90%					
F_S	33%	41%	48%	55%	63%	70%	78%					
$\sigma_{c,90,U}$	67%	67%	66%	65%	64%	64%	63%					
$\sigma_{c,90,rad}$	20%	32%	43%	54%	65%	77%	88%					
σ	17%	27%	38%	48%	59%	69%	79%					
τ	22%	35%	48%	61%	74%	87%	100%					
$e_R = 40$ cm												
σ_R	47%	58%	70%	81%	93%							
F_S	40%	50%	60%	70%	80%							
$\sigma_{c,90,U}$	66%	65%	64%	63%	62%							
$\sigma_{c,90,rad}$	22%	36%	50%	64%	77%							
σ	21%	35%	48%	62%	76%							
τ	27%	44%	60%	77%	94%							
$e_R = 50$ cm												
σ_R	55%	69%	84%	98%								
F_S	47%	60%	72%	85%								
$\sigma_{c,90,U}$	64%	63%	62%	60%								
$\sigma_{c,90,rad}$	25%	42%	58%	75%								
σ	27%	44%	62%	79%								
τ	32%	54%	75%	97%								
$e_R = 60$ cm												
σ_R	63%	80%	97%									
F_S	54%	69%	84%									
$\sigma_{c,90,U}$	63%	61%	60%									
$\sigma_{c,90,rad}$	29%	49%	69%									
σ	33%	56%	79%									
τ	39%	66%	93%									
$e_R = 70$ cm												
σ_R	69%	90%										
F_S	60%	77%										
$\sigma_{c,90,U}$	61%	60%										
$\sigma_{c,90,rad}$	33%	57%										
σ	41%	71%										
τ	47%	82%										
$e_R = 80$ cm												
σ_R	76%											
F_S	65%											
$\sigma_{c,90,U}$	60%											
$\sigma_{c,90,rad}$	38%											
σ	52%											
τ	57%											

p [mWS]

Schnitt A - A

Tabelle F2 Ausnutzungsgrad für Druckrohrleitung auf Sättel mit $d_i = 1,10$ m
 Holzdaube $d_D = 70$ mm, C24; Spannring $b_R/d_R = 60/6$ mm, S235; Spannschloss M27, S235

p [mWS]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$e_R = 10$ cm												
σ_R	21%	24%	27%	30%	33%	36%	39%	42%	45%	48%	51%	55%
F_S	18%	21%	23%	26%	29%	31%	34%	37%	39%	42%	44%	47%
$\sigma_{c,90,U}$	71%	71%	71%	70%	70%	70%	69%	69%	69%	69%	68%	68%
$\sigma_{c,90,rad}$	17%	24%	32%	39%	46%	54%	61%	68%	75%	83%	90%	97%
σ	12%	18%	24%	30%	36%	42%	48%	54%	60%	66%	72%	78%
τ	16%	23%	31%	38%	45%	53%	60%	68%	75%	82%	90%	97%
$e_R = 20$ cm												
σ_R	31%	37%	43%	49%	56%	62%	68%	74%	81%			
F_S	26%	32%	37%	43%	48%	53%	59%	64%	69%			
$\sigma_{c,90,U}$	69%	69%	68%	67%	67%	66%	66%	65%	65%			
$\sigma_{c,90,rad}$	19%	28%	38%	47%	56%	66%	75%	84%	94%			
σ	14%	22%	30%	38%	46%	54%	62%	70%	78%			
τ	18%	29%	39%	49%	59%	69%	79%	89%	100%			
$e_R = 30$ cm												
σ_R	40%	49%	59%	68%	78%	87%						
F_S	34%	42%	51%	59%	67%	75%						
$\sigma_{c,90,U}$	67%	66%	66%	65%	64%	63%						
$\sigma_{c,90,rad}$	21%	32%	44%	55%	67%	78%						
σ	18%	28%	39%	49%	60%	71%						
τ	23%	36%	49%	63%	76%	89%						
$e_R = 40$ cm												
σ_R	49%	61%	74%	87%	99%							
F_S	42%	53%	64%	75%	86%							
$\sigma_{c,90,U}$	66%	64%	63%	62%	61%							
$\sigma_{c,90,rad}$	23%	37%	51%	65%	79%							
σ	22%	36%	50%	63%	77%							
τ	28%	45%	62%	79%	96%							
$e_R = 50$ cm												
σ_R	57%	73%	89%									
F_S	49%	63%	77%									
$\sigma_{c,90,U}$	64%	62%	61%									
$\sigma_{c,90,rad}$	26%	43%	60%									
σ	28%	45%	63%									
τ	33%	55%	77%									
$e_R = 60$ cm												
σ_R	65%	84%										
F_S	56%	73%										
$\sigma_{c,90,U}$	62%	61%										
$\sigma_{c,90,rad}$	30%	50%										
σ	35%	58%										
τ	40%	68%										
$e_R = 70$ cm												
σ_R	73%	95%										
F_S	63%	82%										
$\sigma_{c,90,U}$	61%	59%										
$\sigma_{c,90,rad}$	34%	59%										
σ	43%	73%										
τ	49%	84%										
$e_R = 80$ cm												
σ_R	79%											
F_S	69%											
$\sigma_{c,90,U}$	60%											
$\sigma_{c,90,rad}$	39%											
σ	53%											
τ	59%											

Schnitt A - A

Tabelle F3 Ausnutzungsgrad für Druckrohrleitung auf Sättel mit $d_i = 1,20$ m
 Holzdaube $d_D = 70$ mm, C24; Spannring $b_R/d_R = 60/6$ mm, S235; Spansschloss M27, S235

p [mWS]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$e_R = 10$ cm												
σ_R	21%	25%	28%	32%	35%	38%	42%	45%	48%	52%	55%	58%
F_S	19%	21%	24%	27%	30%	33%	36%	39%	42%	44%	47%	50%
$\sigma_{c,90,U}$	71%	71%	70%	70%	70%	70%	69%	69%	69%	68%	68%	68%
$\sigma_{c,90,rad}$	18%	25%	33%	40%	48%	55%	63%	70%	77%	85%	92%	100%
σ	12%	19%	25%	31%	37%	43%	49%	56%	62%	68%	74%	81%
τ	16%	24%	32%	39%	47%	55%	62%	70%	77%	85%	92%	100%
$e_R = 20$ cm												
σ_R	31%	38%	45%	52%	59%	66%	72%	79%				
F_S	27%	33%	39%	45%	51%	57%	62%	68%				
$\sigma_{c,90,U}$	69%	68%	68%	67%	67%	66%	65%	65%				
$\sigma_{c,90,rad}$	20%	29%	39%	49%	58%	68%	77%	87%				
σ	14%	23%	31%	39%	47%	56%	64%	72%				
τ	19%	30%	40%	51%	61%	71%	82%	92%				
$e_R = 30$ cm												
σ_R	41%	51%	62%	72%	82%	93%						
F_S	35%	44%	53%	62%	71%	80%						
$\sigma_{c,90,U}$	67%	66%	65%	64%	64%	63%						
$\sigma_{c,90,rad}$	22%	34%	45%	57%	69%	81%						
σ	19%	29%	40%	51%	62%	73%						
τ	24%	37%	51%	65%	78%	92%						
$e_R = 40$ cm												
σ_R	50%	64%	78%	92%								
F_S	43%	55%	67%	79%								
$\sigma_{c,90,U}$	65%	64%	63%	62%								
$\sigma_{c,90,rad}$	24%	39%	53%	67%								
σ	23%	37%	51%	66%								
τ	29%	46%	64%	82%								
$e_R = 50$ cm												
σ_R	59%	77%	94%									
F_S	51%	66%	81%									
$\sigma_{c,90,U}$	64%	62%	61%									
$\sigma_{c,90,rad}$	27%	45%	62%									
σ	29%	47%	66%									
τ	35%	57%	80%									
$e_R = 60$ cm												
σ_R	68%	89%										
F_S	59%	77%										
$\sigma_{c,90,U}$	62%	60%										
$\sigma_{c,90,rad}$	31%	52%										
σ	36%	60%										
τ	42%	71%										
$e_R = 70$ cm												
σ_R	76%											
F_S	65%											
$\sigma_{c,90,U}$	61%											
$\sigma_{c,90,rad}$	36%											
σ	45%											
τ	51%											
$e_R = 80$ cm												
σ_R	83%											
F_S	72%											
$\sigma_{c,90,U}$	60%											
$\sigma_{c,90,rad}$	41%											
σ	56%											
τ	62%											

Tabelle F4 Ausnutzungsgrad für Druckrohrleitung auf Sättel mit $d_i = 1,30$ m
 Holzdaube $d_D = 70$ mm, C24; Spannring $b_R/d_R = 60/6$ mm, S235; Spanschloss M27, S235

p [mWS]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$e_R = 10$ cm												
σ_R	22%	26%	29%	33%	36%	40%	44%	47%	51%	55%	58%	
F_S	19%	22%	25%	28%	31%	35%	38%	41%	44%	47%	50%	
$\sigma_{c,90,U}$	71%	71%	70%	70%	70%	69%	69%	69%	68%	68%	68%	
$\sigma_{c,90,rad}$	19%	26%	34%	42%	50%	58%	65%	73%	81%	89%	96%	
σ	13%	19%	26%	32%	39%	45%	51%	58%	64%	71%	77%	
τ	17%	25%	33%	41%	49%	57%	65%	73%	80%	88%	96%	
$e_R = 20$ cm												
σ_R	32%	40%	47%	54%	62%	69%	77%	84%				
F_S	28%	34%	41%	47%	53%	60%	66%	73%				
$\sigma_{c,90,U}$	69%	68%	68%	67%	66%	66%	65%	64%				
$\sigma_{c,90,rad}$	21%	31%	41%	51%	61%	71%	80%	90%				
σ	15%	24%	32%	41%	49%	58%	67%	75%				
τ	20%	31%	42%	53%	64%	74%	85%	96%				
$e_R = 30$ cm												
σ_R	42%	53%	65%	76%	87%	98%						
F_S	36%	46%	56%	66%	75%	85%						
$\sigma_{c,90,U}$	67%	66%	65%	64%	63%	62%						
$\sigma_{c,90,rad}$	23%	35%	48%	60%	72%	84%						
σ	20%	31%	42%	53%	65%	76%						
τ	25%	39%	53%	68%	82%	96%						
$e_R = 40$ cm												
σ_R	52%	67%	82%	97%								
F_S	45%	58%	71%	84%								
$\sigma_{c,90,U}$	65%	64%	63%	61%								
$\sigma_{c,90,rad}$	26%	41%	55%	70%								
σ	24%	39%	54%	68%								
τ	31%	49%	67%	85%								
$e_R = 50$ cm												
σ_R	61%	80%	99%									
F_S	53%	69%	86%									
$\sigma_{c,90,U}$	63%	62%	60%									
$\sigma_{c,90,rad}$	29%	47%	65%									
σ	31%	50%	69%									
τ	37%	60%	83%									
$e_R = 60$ cm												
σ_R	70%	93%										
F_S	61%	80%										
$\sigma_{c,90,U}$	62%	60%										
$\sigma_{c,90,rad}$	33%	54%										
σ	38%	63%										
τ	45%	74%										
$e_R = 70$ cm												
σ_R	79%											
F_S	68%											
$\sigma_{c,90,U}$	60%											
$\sigma_{c,90,rad}$	38%											
σ	48%											
τ	54%											
$e_R = 80$ cm												
σ_R	87%											
F_S	75%											
$\sigma_{c,90,U}$	59%											
$\sigma_{c,90,rad}$	43%											
σ	59%											
τ	65%											

p [mWS]

Tabelle F5 Ausnutzungsgrad für Druckrohrleitung auf Sättel mit $d_i = 1,40$ m
 Holzdaube $d_D = 70$ mm, C24; Spannring $b_R/d_R = 60/6$ mm, S235; Spansschloss M27, S235

p [mWS]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$e_R = 10$ cm												
σ_R	22%	26%	30%	34%	38%	42%	46%	50%	54%	58%		
F_S	19%	23%	26%	29%	33%	36%	40%	43%	46%	50%		
$\sigma_{c,90,U}$	71%	70%	70%	70%	69%	69%	69%	68%	68%	68%		
$\sigma_{c,90,rad}$	20%	28%	36%	44%	53%	61%	69%	77%	85%	93%		
σ	14%	21%	27%	34%	41%	48%	54%	61%	68%	75%		
τ	19%	27%	35%	43%	52%	60%	68%	76%	85%	93%		
$e_R = 20$ cm												
σ_R	33%	41%	49%	57%	65%	73%	81%					
F_S	28%	35%	42%	49%	56%	63%	70%					
$\sigma_{c,90,U}$	69%	68%	67%	67%	66%	65%	65%					
$\sigma_{c,90,rad}$	22%	33%	43%	54%	64%	74%	85%					
σ	16%	25%	34%	43%	52%	61%	70%					
τ	22%	33%	44%	56%	67%	78%	90%					
$e_R = 30$ cm												
σ_R	43%	56%	68%	80%	92%							
F_S	37%	48%	58%	69%	79%							
$\sigma_{c,90,U}$	67%	66%	65%	64%	63%							
$\sigma_{c,90,rad}$	25%	38%	50%	63%	76%							
σ	21%	33%	44%	56%	68%							
τ	27%	42%	57%	71%	86%							
$e_R = 40$ cm												
σ_R	53%	69%	85%									
F_S	45%	59%	73%									
$\sigma_{c,90,U}$	65%	64%	62%									
$\sigma_{c,90,rad}$	28%	43%	59%									
σ	26%	42%	57%									
τ	33%	52%	71%									
$e_R = 50$ cm												
σ_R	63%	83%										
F_S	54%	72%										
$\sigma_{c,90,U}$	63%	61%										
$\sigma_{c,90,rad}$	31%	50%										
σ	33%	53%										
τ	40%	64%										
$e_R = 60$ cm												
σ_R	73%	97%										
F_S	63%	84%										
$\sigma_{c,90,U}$	62%	59%										
$\sigma_{c,90,rad}$	35%	58%										
σ	41%	67%										
τ	48%	79%										
$e_R = 70$ cm												
σ_R	82%											
F_S	71%											
$\sigma_{c,90,U}$	60%											
$\sigma_{c,90,rad}$	40%											
σ	51%											
τ	58%											
$e_R = 80$ cm												
σ_R	90%											
F_S	78%											
$\sigma_{c,90,U}$	59%											
$\sigma_{c,90,rad}$	46%											
σ	63%											
τ	70%											

Tabelle F6 Ausnutzungsgrad für Druckrohrleitung auf Sättel mit $d_i = 1,50$ m
 Holzdaube $d_D = 75$ mm, C24; Spannring $b_R/d_R = 60/8$ mm, S235; Spansschloss M30, S235

p [mWS]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$e_R = 10$ cm												
σ_R	17%	21%	24%	27%	30%	33%	36%	40%	43%	46%	49%	52%
F_S	16%	19%	22%	25%	28%	31%	34%	37%	40%	43%	46%	49%
$\sigma_{c,90,U}$	71%	71%	70%	70%	70%	69%	69%	69%	68%	68%	67%	67%
$\sigma_{c,90,rad}$	18%	25%	32%	39%	45%	52%	59%	66%	72%	79%	86%	93%
σ	12%	18%	24%	29%	35%	41%	46%	52%	58%	64%	69%	75%
τ	16%	24%	31%	39%	46%	53%	60%	68%	75%	82%	89%	97%
$e_R = 20$ cm												
σ_R	26%	32%	39%	45%	52%	58%	65%	71%	78%			
F_S	24%	31%	37%	43%	49%	55%	61%	67%	73%			
$\sigma_{c,90,U}$	69%	69%	68%	67%	66%	66%	65%	64%	63%			
$\sigma_{c,90,rad}$	20%	29%	38%	47%	56%	65%	74%	83%	92%			
σ	14%	22%	29%	37%	45%	53%	61%	68%	76%			
τ	19%	29%	39%	49%	59%	69%	79%	89%	98%			
$e_R = 30$ cm												
σ_R	34%	44%	54%	64%	74%	83%	93%					
F_S	32%	42%	51%	60%	69%	78%	88%					
$\sigma_{c,90,U}$	68%	67%	65%	64%	63%	62%	61%					
$\sigma_{c,90,rad}$	23%	34%	46%	57%	68%	79%	91%					
σ	18%	29%	39%	49%	59%	69%	79%					
τ	24%	36%	49%	62%	74%	87%	100%					
$e_R = 40$ cm												
σ_R	43%	56%	69%	82%	95%							
F_S	40%	53%	65%	77%	89%							
$\sigma_{c,90,U}$	66%	65%	63%	62%	60%							
$\sigma_{c,90,rad}$	26%	40%	54%	68%	82%							
σ	23%	36%	49%	62%	76%							
τ	29%	45%	61%	77%	93%							
$e_R = 50$ cm												
σ_R	51%	67%	84%	100%								
F_S	48%	63%	79%	94%								
$\sigma_{c,90,U}$	65%	63%	61%	59%								
$\sigma_{c,90,rad}$	29%	46%	63%	80%								
σ	28%	45%	62%	78%								
τ	34%	54%	75%	95%								
$e_R = 60$ cm												
σ_R	59%	78%	98%									
F_S	55%	74%	92%									
$\sigma_{c,90,U}$	63%	61%	59%									
$\sigma_{c,90,rad}$	33%	54%	74%									
σ	34%	56%	77%									
τ	41%	67%	92%									
$e_R = 70$ cm												
σ_R	66%	89%										
F_S	62%	84%										
$\sigma_{c,90,U}$	62%	59%										
$\sigma_{c,90,rad}$	37%	63%										
σ	41%	69%										
τ	49%	82%										
$e_R = 80$ cm												
σ_R	73%											
F_S	69%											
$\sigma_{c,90,U}$	60%											
$\sigma_{c,90,rad}$	42%											
σ	52%											
τ	59%											

Schnitt A - A

Spannring b_R / d_R

Holzdaube b_D / d_D

p [mWS]

d_i

d_o

e_R

e_S

Tabelle F7 Ausnutzungsgrad für Druckrohrleitung auf Sättel mit $d_i = 1,60$ m
 Holzdaube $d_D = 75$ mm, C24; Spannring $b_R/d_R = 60/8$ mm, S235; Spansschloss M30, S235

p [mWS]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$e_R = 10$ cm												
σ_R	18%	21%	24%	28%	31%	35%	38%	41%	45%	48%	52%	55%
F_S	17%	20%	23%	26%	29%	33%	36%	39%	42%	45%	49%	52%
$\sigma_{c,90,U}$	71%	71%	70%	70%	69%	69%	69%	68%	68%	67%	67%	67%
$\sigma_{c,90,rad}$	19%	26%	33%	39%	46%	53%	60%	67%	74%	81%	87%	94%
σ	13%	18%	24%	30%	36%	41%	47%	53%	59%	65%	70%	76%
τ	17%	24%	32%	39%	47%	54%	61%	69%	76%	84%	91%	98%
$e_R = 20$ cm												
σ_R	27%	34%	40%	47%	54%	61%	68%	75%	82%			
F_S	25%	32%	38%	45%	51%	58%	64%	71%	77%			
$\sigma_{c,90,U}$	69%	68%	68%	67%	66%	65%	64%	64%	63%			
$\sigma_{c,90,rad}$	21%	30%	39%	48%	57%	66%	75%	84%	93%			
σ	14%	22%	30%	38%	46%	54%	62%	70%	78%			
τ	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%			
$e_R = 30$ cm												
σ_R	35%	46%	56%	67%	77%	88%						
F_S	33%	43%	53%	63%	73%	82%						
$\sigma_{c,90,U}$	68%	66%	65%	64%	63%	62%						
$\sigma_{c,90,rad}$	24%	35%	47%	58%	70%	81%						
σ	19%	29%	39%	50%	60%	70%						
τ	24%	37%	50%	63%	76%	89%						
$e_R = 40$ cm												
σ_R	44%	58%	72%	86%	100%							
F_S	41%	55%	68%	81%	94%							
$\sigma_{c,90,U}$	66%	64%	63%	61%	59%							
$\sigma_{c,90,rad}$	27%	41%	55%	69%	83%							
σ	24%	37%	50%	64%	77%							
τ	30%	46%	62%	78%	95%							
$e_R = 50$ cm												
σ_R	52%	70%	87%									
F_S	49%	66%	82%									
$\sigma_{c,90,U}$	64%	62%	60%									
$\sigma_{c,90,rad}$	30%	47%	65%									
σ	29%	46%	63%									
τ	35%	56%	76%									
$e_R = 60$ cm												
σ_R	61%	82%										
F_S	57%	77%										
$\sigma_{c,90,U}$	63%	60%										
$\sigma_{c,90,rad}$	34%	55%										
σ	35%	57%										
τ	42%	68%										
$e_R = 70$ cm												
σ_R	68%	93%										
F_S	64%	88%										
$\sigma_{c,90,U}$	61%	59%										
$\sigma_{c,90,rad}$	38%	64%										
σ	43%	71%										
τ	51%	84%										
$e_R = 80$ cm												
σ_R	76%											
F_S	72%											
$\sigma_{c,90,U}$	60%											
$\sigma_{c,90,rad}$	43%											
σ	54%											
τ	61%											

Tabelle F8 Ausnutzungsgrad für Druckrohrleitung auf Sättel mit $d_i = 1,70\text{ m}$
 Holzdaube $d_D = 75\text{ mm}$, C24; Spannring $b_R/d_R = 60/8\text{ mm}$, S235; Spanschloss M30, S235

p [mWS]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$e_R = 10\text{ cm}$												
σ_R	18%	22%	25%	29%	32%	36%	40%	43%	47%	51%	54%	
F_S	17%	20%	24%	27%	31%	34%	37%	41%	44%	48%	51%	
$\sigma_{c,90,U}$	71%	71%	70%	70%	69%	69%	68%	68%	68%	67%	67%	
$\sigma_{c,90,rad}$	19%	27%	34%	41%	48%	55%	62%	69%	76%	83%	90%	
σ	13%	19%	25%	31%	37%	43%	49%	54%	60%	66%	72%	
τ	18%	25%	33%	40%	48%	56%	63%	71%	78%	86%	93%	
$e_R = 20\text{ cm}$												
σ_R	27%	35%	42%	49%	57%	64%	71%	79%				
F_S	26%	33%	39%	46%	53%	60%	67%	74%				
$\sigma_{c,90,U}$	69%	68%	67%	67%	66%	65%	64%	63%				
$\sigma_{c,90,rad}$	22%	31%	41%	50%	59%	68%	77%	87%				
σ	15%	23%	31%	39%	47%	55%	63%	72%				
τ	21%	31%	41%	52%	62%	72%	82%	93%				
$e_R = 30\text{ cm}$												
σ_R	36%	47%	59%	70%	81%	92%						
F_S	34%	45%	55%	66%	76%	86%						
$\sigma_{c,90,U}$	67%	66%	65%	64%	62%	61%						
$\sigma_{c,90,rad}$	25%	36%	48%	60%	72%	83%						
σ	20%	30%	41%	51%	62%	72%						
τ	25%	39%	52%	65%	78%	91%						
$e_R = 40\text{ cm}$												
σ_R	45%	60%	75%	90%								
F_S	43%	57%	71%	85%								
$\sigma_{c,90,U}$	66%	64%	62%	61%								
$\sigma_{c,90,rad}$	28%	43%	57%	71%								
σ	25%	39%	52%	66%								
τ	31%	48%	64%	81%								
$e_R = 50\text{ cm}$												
σ_R	54%	73%	91%									
F_S	51%	68%	86%									
$\sigma_{c,90,U}$	64%	62%	60%									
$\sigma_{c,90,rad}$	31%	49%	67%									
σ	30%	48%	65%									
τ	37%	58%	79%									
$e_R = 60\text{ cm}$												
σ_R	62%	85%										
F_S	59%	80%										
$\sigma_{c,90,U}$	63%	60%										
$\sigma_{c,90,rad}$	35%	57%										
σ	37%	59%										
τ	44%	71%										
$e_R = 70\text{ cm}$												
σ_R	71%	97%										
F_S	67%	91%										
$\sigma_{c,90,U}$	61%	58%										
$\sigma_{c,90,rad}$	40%	66%										
σ	45%	74%										
τ	53%	87%										
$e_R = 80\text{ cm}$												
σ_R	79%											
F_S	74%											
$\sigma_{c,90,U}$	60%											
$\sigma_{c,90,rad}$	45%											
σ	56%											
τ	63%											

Schnitt A - A

Tabelle F9 Ausnutzungsgrad für Druckrohrleitung auf Sättel mit $d_i = 1,80$ m

Holzdaube $d_D = 75$ mm, C24; Spannring $b_R/d_R = 60/8$ mm, S235; Spansschloss M30, S235

p [mWS]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$e_R = 10$ cm												
σ_R	18%	22%	26%	30%	34%	37%	41%	45%	49%	53%	57%	
F_S	17%	21%	24%	28%	32%	35%	39%	42%	46%	50%	53%	
$\sigma_{c,90,U}$	71%	70%	70%	70%	69%	69%	68%	68%	67%	67%	66%	
$\sigma_{c,90,rad}$	20%	28%	35%	42%	50%	57%	64%	71%	79%	86%	93%	
σ	14%	20%	26%	32%	38%	44%	50%	57%	63%	69%	75%	
τ	19%	26%	34%	42%	50%	58%	66%	73%	81%	89%	97%	
$e_R = 20$ cm												
σ_R	28%	36%	43%	51%	59%	67%	75%	82%				
F_S	26%	34%	41%	48%	56%	63%	70%	78%				
$\sigma_{c,90,U}$	69%	68%	67%	66%	65%	65%	64%	63%				
$\sigma_{c,90,rad}$	23%	33%	42%	52%	61%	71%	80%	90%				
σ	16%	24%	32%	41%	49%	58%	66%	74%				
τ	22%	33%	43%	54%	64%	75%	86%	96%				
$e_R = 30$ cm												
σ_R	37%	49%	61%	73%	84%	96%						
F_S	35%	46%	57%	68%	79%	90%						
$\sigma_{c,90,U}$	67%	66%	65%	63%	62%	61%						
$\sigma_{c,90,rad}$	26%	38%	50%	62%	74%	87%						
σ	21%	32%	43%	53%	64%	75%						
τ	27%	40%	54%	68%	81%	95%						
$e_R = 40$ cm												
σ_R	46%	62%	78%	94%								
F_S	44%	59%	73%	88%								
$\sigma_{c,90,U}$	66%	64%	62%	60%								
$\sigma_{c,90,rad}$	29%	44%	59%	74%								
σ	26%	40%	54%	68%								
τ	32%	50%	67%	84%								
$e_R = 50$ cm												
σ_R	56%	75%	95%									
F_S	52%	71%	89%									
$\sigma_{c,90,U}$	64%	62%	59%									
$\sigma_{c,90,rad}$	33%	51%	70%									
σ	32%	50%	68%									
τ	38%	60%	82%									
$e_R = 60$ cm												
σ_R	64%	88%										
F_S	61%	83%										
$\sigma_{c,90,U}$	62%	60%										
$\sigma_{c,90,rad}$	37%	60%										
σ	39%	62%										
τ	46%	74%										
$e_R = 70$ cm												
σ_R	73%											
F_S	69%											
$\sigma_{c,90,U}$	61%											
$\sigma_{c,90,rad}$	42%											
σ	47%											
τ	56%											
$e_R = 80$ cm												
σ_R	81%											
F_S	76%											
$\sigma_{c,90,U}$	60%											
$\sigma_{c,90,rad}$	48%											
σ	59%											
τ	67%											

Schnitt A - A

Tabelle F10 Ausnutzungsgrad für Druckrohrleitung auf Sättel mit $d_i = 1,90\text{ m}$

Holzdaube $d_D = 75\text{mm}$, C24; Spannring $b_R/d_R = 60/8\text{mm}$, S235; Spansschloss M30, S235

p [mWS]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$e_R = 10\text{ cm}$												
σ_R	19%	23%	27%	31%	35%	39%	43%	47%	51%	55%		
F_S	17%	21%	25%	29%	33%	37%	40%	44%	48%	52%		
$\sigma_{c,90,U}$	71%	70%	70%	69%	69%	68%	68%	68%	67%	67%		
$\sigma_{c,90,rad}$	22%	29%	37%	45%	52%	60%	67%	75%	82%	90%		
σ	15%	21%	27%	34%	40%	47%	53%	59%	66%	72%		
τ	20%	28%	36%	44%	53%	61%	69%	77%	85%	93%		
$e_R = 20\text{ cm}$												
σ_R	28%	37%	45%	53%	61%	70%	78%					
F_S	27%	35%	42%	50%	58%	66%	73%					
$\sigma_{c,90,U}$	69%	68%	67%	66%	65%	64%	63%					
$\sigma_{c,90,rad}$	25%	35%	45%	55%	65%	75%	84%					
σ	17%	26%	34%	43%	52%	61%	69%					
τ	23%	34%	46%	57%	68%	79%	90%					
$e_R = 30\text{ cm}$												
σ_R	38%	51%	63%	75%	88%							
F_S	36%	48%	59%	71%	83%							
$\sigma_{c,90,U}$	67%	66%	64%	63%	61%							
$\sigma_{c,90,rad}$	28%	40%	53%	66%	78%							
σ	22%	34%	45%	56%	68%							
τ	29%	43%	57%	71%	86%							
$e_R = 40\text{ cm}$												
σ_R	48%	64%	81%	98%								
F_S	45%	61%	76%	92%								
$\sigma_{c,90,U}$	66%	64%	62%	60%								
$\sigma_{c,90,rad}$	31%	47%	63%	78%								
σ	28%	43%	57%	72%								
τ	35%	53%	71%	89%								
$e_R = 50\text{ cm}$												
σ_R	57%	78%	99%									
F_S	54%	73%	93%									
$\sigma_{c,90,U}$	64%	61%	59%									
$\sigma_{c,90,rad}$	35%	54%	74%									
σ	34%	53%	72%									
τ	41%	64%	87%									
$e_R = 60\text{ cm}$												
σ_R	66%	91%										
F_S	62%	86%										
$\sigma_{c,90,U}$	62%	59%										
$\sigma_{c,90,rad}$	40%	63%										
σ	41%	65%										
τ	49%	78%										
$e_R = 70\text{ cm}$												
σ_R	75%											
F_S	71%											
$\sigma_{c,90,U}$	61%											
$\sigma_{c,90,rad}$	45%											
σ	50%											
τ	60%											
$e_R = 80\text{ cm}$												
σ_R	84%											
F_S	79%											
$\sigma_{c,90,U}$	59%											
$\sigma_{c,90,rad}$	51%											
σ	63%											
τ	71%											

p [mWS]

Schnitt A - A

Tabelle F11 Ausnutzungsgrad für Druckrohrleitung auf Sättel mit $d_i = 2,00$ m
 Holzdaube $d_D = 80$ mm, C24; Spannring $b_R/d_R = 60/6$ mm, S355; Spansschloss M27, S355

p [mWS]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$e_R = 10$ cm												
σ_R	17%	21%	25%	28%	32%	36%	40%	44%	47%	51%	55%	
F_S	16%	19%	23%	26%	30%	33%	37%	40%	44%	48%	51%	
$\sigma_{c,90,U}$	70%	70%	69%	69%	68%	68%	67%	67%	66%	66%	65%	
$\sigma_{c,90,rad}$	21%	28%	36%	43%	51%	58%	65%	73%	80%	87%	95%	
σ	15%	21%	27%	33%	39%	46%	52%	58%	64%	70%	77%	
τ	18%	25%	33%	41%	48%	55%	63%	70%	78%	85%	93%	
$e_R = 20$ cm												
σ_R	26%	34%	42%	49%	57%	65%	73%	80%				
F_S	24%	31%	39%	46%	53%	60%	67%	74%				
$\sigma_{c,90,U}$	68%	67%	66%	65%	64%	63%	62%	61%				
$\sigma_{c,90,rad}$	24%	34%	43%	53%	63%	72%	82%	91%				
σ	17%	25%	33%	41%	49%	57%	65%	73%				
τ	21%	31%	41%	51%	60%	70%	80%	90%				
$e_R = 30$ cm												
σ_R	35%	47%	58%	70%	82%	93%						
F_S	33%	43%	54%	65%	76%	87%						
$\sigma_{c,90,U}$	66%	64%	63%	61%	60%	58%						
$\sigma_{c,90,rad}$	27%	39%	51%	63%	76%	88%						
σ	21%	31%	41%	51%	61%	71%						
τ	25%	38%	51%	63%	76%	88%						
$e_R = 40$ cm												
σ_R	44%	60%	75%	91%								
F_S	41%	55%	70%	84%								
$\sigma_{c,90,U}$	63%	61%	59%	57%								
$\sigma_{c,90,rad}$	30%	45%	60%	75%								
σ	25%	38%	50%	63%								
τ	31%	47%	62%	78%								
$e_R = 50$ cm												
σ_R	53%	72%	92%									
F_S	49%	67%	85%									
$\sigma_{c,90,U}$	61%	59%	56%									
$\sigma_{c,90,rad}$	33%	52%	69%									
σ	30%	46%	62%									
τ	36%	56%	75%									
$e_R = 60$ cm												
σ_R	61%	84%										
F_S	57%	78%										
$\sigma_{c,90,U}$	59%	56%										
$\sigma_{c,90,rad}$	37%	59%										
σ	36%	57%										
τ	43%	68%										
$e_R = 70$ cm												
σ_R	69%	97%										
F_S	64%	90%										
$\sigma_{c,90,U}$	58%	54%										
$\sigma_{c,90,rad}$	42%	68%										
σ	43%	70%										
τ	51%	83%										
$e_R = 80$ cm												
σ_R	77%											
F_S	72%											
$\sigma_{c,90,U}$	56%											
$\sigma_{c,90,rad}$	46%											
σ	52%											
τ	61%											

p [mWS]

Tabelle F12 Ausnutzungsgrad für Druckrohrleitung auf Sättel mit $d_i = 2,10\text{ m}$

Holzdaube $d_D = 80\text{mm}$, C24; Spannring $b_R/d_R = 60/6\text{mm}$, S355; Spanschloss M27, S355

p [mWS]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$e_R = 10\text{ cm}$												
σ_R	17%	21%	25%	29%	33%	37%	41%	45%	49%	53%	57%	
F_S	16%	20%	23%	27%	31%	35%	38%	42%	46%	49%	53%	
$\sigma_{c,90,U}$	70%	70%	69%	69%	68%	68%	67%	66%	66%	65%	65%	
$\sigma_{c,90,rad}$	21%	29%	37%	44%	51%	59%	66%	74%	81%	89%	96%	
σ	15%	21%	28%	34%	40%	46%	53%	59%	65%	71%	78%	
τ	18%	26%	34%	41%	49%	56%	64%	72%	79%	87%	94%	
$e_R = 20\text{ cm}$												
σ_R	27%	35%	43%	51%	59%	67%	75%	84%				
F_S	25%	32%	40%	47%	55%	62%	70%	78%				
$\sigma_{c,90,U}$	68%	67%	66%	65%	64%	62%	61%	60%				
$\sigma_{c,90,rad}$	24%	34%	44%	54%	64%	73%	83%	93%				
σ	18%	26%	34%	42%	50%	58%	66%	74%				
τ	21%	32%	42%	52%	62%	72%	81%	91%				
$e_R = 30\text{ cm}$												
σ_R	36%	48%	61%	73%	85%	97%						
F_S	33%	45%	56%	67%	79%	90%						
$\sigma_{c,90,U}$	65%	64%	62%	61%	59%	58%						
$\sigma_{c,90,rad}$	28%	40%	52%	65%	77%	89%						
σ	21%	31%	42%	52%	62%	72%						
τ	26%	39%	52%	64%	77%	90%						
$e_R = 40\text{ cm}$												
σ_R	45%	61%	78%	94%								
F_S	42%	57%	72%	87%								
$\sigma_{c,90,U}$	63%	61%	59%	57%								
$\sigma_{c,90,rad}$	31%	46%	61%	76%								
σ	26%	39%	51%	64%								
τ	32%	48%	63%	79%								
$e_R = 50\text{ cm}$												
σ_R	54%	74%	95%									
F_S	50%	69%	88%									
$\sigma_{c,90,U}$	61%	59%	56%									
$\sigma_{c,90,rad}$	35%	53%	71%									
σ	31%	47%	63%									
τ	37%	57%	77%									
$e_R = 60\text{ cm}$												
σ_R	63%	87%										
F_S	58%	81%										
$\sigma_{c,90,U}$	59%	56%										
$\sigma_{c,90,rad}$	38%	60%										
σ	37%	58%										
τ	44%	69%										
$e_R = 70\text{ cm}$												
σ_R	71%	100%										
F_S	66%	93%										
$\sigma_{c,90,U}$	57%	54%										
$\sigma_{c,90,rad}$	43%	69%										
σ	45%	72%										
τ	53%	85%										
$e_R = 80\text{ cm}$												
σ_R	79%											
F_S	74%											
$\sigma_{c,90,U}$	56%											
$\sigma_{c,90,rad}$	48%											
σ	54%											
τ	62%											

p [mWS]

Tabelle F13 Ausnutzungsgrad für Druckrohrleitung auf Sättel mit $d_i = 2,20$ m

Holzdaube $d_D = 80$ mm, C24; Spannring $b_R/d_R = 60/6$ mm, S355; Spansschloss M27, S355

p [mWS]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$e_R = 10$ cm												
σ_R	18%	22%	26%	30%	34%	39%	43%	47%	51%	55%	60%	
F_S	16%	20%	24%	28%	32%	36%	40%	44%	47%	51%	55%	
$\sigma_{c,90,U}$	70%	70%	69%	68%	68%	67%	67%	66%	66%	65%	65%	
$\sigma_{c,90,rad}$	22%	30%	38%	45%	53%	60%	68%	75%	83%	91%	98%	
σ	16%	22%	28%	35%	41%	48%	54%	60%	67%	73%	80%	
τ	19%	27%	35%	42%	50%	58%	66%	73%	81%	89%	96%	
$e_R = 20$ cm												
σ_R	27%	36%	44%	53%	61%	70%	78%	87%				
F_S	25%	33%	41%	49%	57%	65%	73%	81%				
$\sigma_{c,90,U}$	68%	67%	65%	64%	63%	62%	61%	60%				
$\sigma_{c,90,rad}$	25%	36%	45%	55%	65%	75%	85%	95%				
σ	18%	27%	35%	43%	51%	59%	67%	76%				
τ	22%	33%	43%	53%	63%	73%	83%	94%				
$e_R = 30$ cm												
σ_R	37%	50%	63%	75%	88%							
F_S	34%	46%	58%	70%	82%							
$\sigma_{c,90,U}$	65%	64%	62%	60%	59%							
$\sigma_{c,90,rad}$	29%	41%	54%	66%	79%							
σ	22%	32%	43%	53%	63%							
τ	27%	40%	53%	66%	79%							
$e_R = 40$ cm												
σ_R	46%	63%	81%	98%								
F_S	43%	59%	75%	91%								
$\sigma_{c,90,U}$	63%	61%	59%	56%								
$\sigma_{c,90,rad}$	32%	48%	63%	78%								
σ	27%	40%	53%	66%								
τ	33%	49%	65%	81%								
$e_R = 50$ cm												
σ_R	55%	77%	98%									
F_S	51%	71%	91%									
$\sigma_{c,90,U}$	61%	58%	55%									
$\sigma_{c,90,rad}$	36%	54%	73%									
σ	32%	48%	65%									
τ	38%	59%	79%									
$e_R = 60$ cm												
σ_R	64%	90%										
F_S	60%	84%										
$\sigma_{c,90,U}$	59%	56%										
$\sigma_{c,90,rad}$	40%	62%										
σ	39%	60%										
τ	46%	72%										
$e_R = 70$ cm												
σ_R	73%											
F_S	68%											
$\sigma_{c,90,U}$	57%											
$\sigma_{c,90,rad}$	45%											
σ	47%											
τ	55%											
$e_R = 80$ cm												
σ_R	81%											
F_S	75%											
$\sigma_{c,90,U}$	55%											
$\sigma_{c,90,rad}$	50%											
σ	56%											
τ	65%											

Schnitt A - A

Tabelle F14 Ausnutzungsgrad für Druckrohrleitung auf Sättel mit $d_i = 2,30\text{ m}$

Holzdaube $d_D = 80\text{mm}$, C24; Spannring $b_R/d_R = 60/6\text{mm}$, S355; Spannschloss M27, S355

p [mWS]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$e_R = 10\text{ cm}$												
σ_R	18%	22%	27%	31%	35%	40%	44%	49%	53%	57%		
F_S	17%	21%	25%	29%	33%	37%	41%	45%	49%	53%		
$\sigma_{c,90,U}$	70%	69%	69%	68%	68%	67%	67%	66%	65%	65%		
$\sigma_{c,90,rad}$	23%	31%	39%	47%	55%	63%	70%	78%	86%	94%		
σ	17%	23%	30%	36%	43%	49%	56%	62%	69%	76%		
τ	20%	28%	36%	44%	52%	60%	68%	76%	84%	92%		
$e_R = 20\text{ cm}$												
σ_R	28%	37%	46%	55%	64%	72%	81%	90%				
F_S	26%	34%	42%	51%	59%	67%	75%	84%				
$\sigma_{c,90,U}$	68%	66%	65%	64%	63%	62%	61%	59%				
$\sigma_{c,90,rad}$	27%	37%	47%	58%	68%	78%	88%	98%				
σ	19%	28%	36%	44%	53%	61%	70%	78%				
τ	23%	34%	44%	55%	65%	76%	86%	97%				
$e_R = 30\text{ cm}$												
σ_R	38%	51%	65%	78%	91%							
F_S	35%	47%	60%	72%	85%							
$\sigma_{c,90,U}$	65%	64%	62%	60%	58%							
$\sigma_{c,90,rad}$	30%	43%	56%	69%	82%							
σ	23%	34%	44%	55%	66%							
τ	29%	42%	55%	69%	82%							
$e_R = 40\text{ cm}$												
σ_R	47%	65%	83%									
F_S	44%	61%	77%									
$\sigma_{c,90,U}$	63%	61%	58%									
$\sigma_{c,90,rad}$	34%	50%	66%									
σ	28%	42%	55%									
τ	35%	51%	68%									
$e_R = 50\text{ cm}$												
σ_R	57%	79%										
F_S	53%	73%										
$\sigma_{c,90,U}$	61%	58%										
$\sigma_{c,90,rad}$	38%	57%										
σ	33%	50%										
τ	40%	61%										
$e_R = 60\text{ cm}$												
σ_R	66%	93%										
F_S	61%	86%										
$\sigma_{c,90,U}$	59%	55%										
$\sigma_{c,90,rad}$	42%	65%										
σ	41%	63%										
τ	48%	75%										
$e_R = 70\text{ cm}$												
σ_R	75%											
F_S	70%											
$\sigma_{c,90,U}$	57%											
$\sigma_{c,90,rad}$	47%											
σ	49%											
τ	58%											
$e_R = 80\text{ cm}$												
σ_R	84%											
F_S	78%											
$\sigma_{c,90,U}$	55%											
$\sigma_{c,90,rad}$	52%											
σ	59%											
τ	68%											

Schnitt A - A

d_i , d_o , d_R , e_R , e_s

Tabelle F15 Ausnutzungsgrad für Druckrohrleitung auf Sättel mit $d_i = 2,40\text{ m}$

Holzdaube $d_D = 80\text{mm}$, C24; Spannring $b_R/d_R = 60/6\text{mm}$, S355; Spanschloss M27, S355

p [mWS]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$e_R = 10\text{ cm}$												
σ_R	18%	23%	27%	32%	36%	41%	46%	50%	55%	60%		
F_S	17%	21%	25%	30%	34%	38%	42%	47%	51%	55%		
$\sigma_{c,90,U}$	70%	69%	69%	68%	68%	67%	66%	66%	65%	65%		
$\sigma_{c,90,rad}$	25%	33%	41%	49%	57%	66%	74%	82%	90%	98%		
σ	18%	24%	31%	38%	45%	52%	59%	65%	72%	79%		
τ	21%	30%	38%	46%	54%	63%	71%	79%	88%	96%		
$e_R = 20\text{ cm}$												
σ_R	28%	38%	47%	56%	66%	75%	84%					
F_S	26%	35%	44%	52%	61%	70%	78%					
$\sigma_{c,90,U}$	68%	66%	65%	64%	63%	61%	60%					
$\sigma_{c,90,rad}$	28%	39%	50%	60%	71%	82%	92%					
σ	20%	29%	38%	47%	55%	64%	73%					
τ	25%	36%	47%	58%	69%	80%	91%					
$e_R = 30\text{ cm}$												
σ_R	38%	52%	66%	80%	94%							
F_S	36%	49%	61%	74%	87%							
$\sigma_{c,90,U}$	65%	63%	62%	60%	58%							
$\sigma_{c,90,rad}$	32%	46%	59%	72%	86%							
σ	25%	36%	47%	58%	69%							
τ	31%	44%	58%	72%	86%							
$e_R = 40\text{ cm}$												
σ_R	48%	67%	86%									
F_S	45%	62%	80%									
$\sigma_{c,90,U}$	63%	60%	58%									
$\sigma_{c,90,rad}$	36%	53%	69%									
σ	30%	44%	58%									
τ	37%	54%	71%									
$e_R = 50\text{ cm}$												
σ_R	58%	82%										
F_S	54%	76%										
$\sigma_{c,90,U}$	61%	58%										
$\sigma_{c,90,rad}$	40%	60%										
σ	36%	53%										
τ	43%	65%										
$e_R = 60\text{ cm}$												
σ_R	68%	96%										
F_S	63%	89%										
$\sigma_{c,90,U}$	59%	55%										
$\sigma_{c,90,rad}$	45%	68%										
σ	43%	66%										
τ	51%	79%										
$e_R = 70\text{ cm}$												
σ_R	77%											
F_S	71%											
$\sigma_{c,90,U}$	57%											
$\sigma_{c,90,rad}$	50%											
σ	52%											
τ	62%											
$e_R = 80\text{ cm}$												
σ_R	86%											
F_S	80%											
$\sigma_{c,90,U}$	55%											
$\sigma_{c,90,rad}$	55%											
σ	62%											
τ	73%											

Tabelle F16 Ausnutzungsgrad für Druckrohrleitung auf Sättel mit $d_i = 2,50\text{ m}$
 Holzdaube $d_D = 85\text{ mm}$, C24; Spannring $b_R/d_R = 60/8\text{ mm}$, S355; Spannschloss M30, S355

p [mWS]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$e_R = 10\text{ cm}$												
σ_R	14%	18%	21%	25%	28%	32%	36%	39%	43%			
F_S	13%	17%	20%	23%	27%	30%	33%	37%	40%			
$\sigma_{c,90,U}$	70%	70%	69%	68%	68%	67%	67%	66%	65%			
$\sigma_{c,90,rad}$	25%	33%	42%	51%	59%	68%	76%	85%	93%			
σ	13%	18%	23%	29%	34%	39%	44%	49%	54%			
τ	20%	28%	36%	44%	52%	60%	68%	76%	84%			
$e_R = 20\text{ cm}$												
σ_R	22%	29%	37%	44%	51%	59%	66%					
F_S	21%	28%	35%	41%	48%	55%	62%					
$\sigma_{c,90,U}$	68%	67%	66%	64%	63%	62%	61%					
$\sigma_{c,90,rad}$	27%	38%	49%	60%	71%	81%	92%					
σ	16%	23%	30%	37%	43%	50%	57%					
τ	23%	33%	43%	53%	63%	74%	84%					
$e_R = 30\text{ cm}$												
σ_R	30%	41%	52%	63%	74%	85%						
F_S	28%	39%	49%	59%	70%	80%						
$\sigma_{c,90,U}$	66%	64%	62%	60%	59%	57%						
$\sigma_{c,90,rad}$	30%	44%	57%	70%	83%	96%						
σ	19%	28%	37%	46%	55%	64%						
τ	28%	40%	53%	65%	78%	90%						
$e_R = 40\text{ cm}$												
σ_R	38%	53%	67%	82%	97%							
F_S	36%	50%	63%	77%	91%							
$\sigma_{c,90,U}$	64%	62%	59%	57%	54%							
$\sigma_{c,90,rad}$	34%	50%	66%	81%	97%							
σ	24%	35%	47%	58%	70%							
τ	33%	48%	64%	79%	94%							
$e_R = 50\text{ cm}$												
σ_R	46%	64%	82%									
F_S	43%	60%	78%									
$\sigma_{c,90,U}$	62%	59%	56%									
$\sigma_{c,90,rad}$	38%	57%	76%									
σ	29%	43%	58%									
τ	37%	57%	75%									
$e_R = 60\text{ cm}$												
σ_R	53%	75%	97%									
F_S	50%	71%	92%									
$\sigma_{c,90,U}$	60%	57%	53%									
$\sigma_{c,90,rad}$	42%	65%	87%									
σ	36%	54%	73%									
τ	44%	68%	91%									
$e_R = 70\text{ cm}$												
σ_R	61%	87%										
F_S	57%	82%										
$\sigma_{c,90,U}$	59%	54%										
$\sigma_{c,90,rad}$	47%	74%										
σ	46%	70%										
τ	52%	82%										
$e_R = 80\text{ cm}$												
σ_R	68%	98%										
F_S	64%	92%										
$\sigma_{c,90,U}$	57%	52%										
$\sigma_{c,90,rad}$	52%	85%										
σ	56%	87%										
τ	61%	99%										

Schnitt A - A

Tabelle F17 Ausnutzungsgrad für Druckrohrleitung auf Sättel mit $d_i = 2,60\text{ m}$

Holzdaube $d_D = 85\text{ mm}$, C24; Spannring $b_R/d_R = 60/8\text{ mm}$, S355; Spansschloss M30, S355

p [mWS]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$e_R = 10\text{ cm}$												
σ_R	14%	18%	22%	25%	29%	33%	37%	40%	44%			
F_S	13%	17%	20%	24%	27%	31%	35%	38%	42%			
$\sigma_{c,90,U}$	70%	70%	69%	68%	68%	67%	66%	66%	65%			
$\sigma_{c,90,rad}$	25%	34%	43%	51%	60%	69%	77%	86%	95%			
σ	13%	19%	24%	29%	34%	39%	45%	50%	55%			
τ	20%	28%	36%	45%	53%	61%	69%	77%	85%			
$e_R = 20\text{ cm}$												
σ_R	23%	30%	38%	45%	53%	60%	68%					
F_S	21%	28%	35%	43%	50%	57%	64%					
$\sigma_{c,90,U}$	68%	67%	66%	64%	63%	62%	60%					
$\sigma_{c,90,rad}$	28%	39%	50%	61%	72%	82%	93%					
σ	16%	23%	30%	37%	44%	51%	58%					
τ	23%	34%	44%	54%	64%	75%	85%					
$e_R = 30\text{ cm}$												
σ_R	31%	42%	54%	65%	76%	88%						
F_S	29%	40%	50%	61%	72%	83%						
$\sigma_{c,90,U}$	66%	64%	62%	60%	58%	56%						
$\sigma_{c,90,rad}$	31%	45%	58%	71%	84%	97%						
σ	20%	29%	38%	47%	56%	65%						
τ	28%	41%	54%	66%	79%	91%						
$e_R = 40\text{ cm}$												
σ_R	39%	54%	69%	85%	100%							
F_S	37%	51%	65%	80%	94%							
$\sigma_{c,90,U}$	64%	61%	59%	56%	53%							
$\sigma_{c,90,rad}$	35%	51%	67%	82%	98%							
σ	24%	36%	47%	59%	71%							
τ	34%	49%	65%	80%	95%							
$e_R = 50\text{ cm}$												
σ_R	47%	66%	85%									
F_S	44%	62%	80%									
$\sigma_{c,90,U}$	62%	59%	55%									
$\sigma_{c,90,rad}$	39%	58%	77%									
σ	29%	44%	59%									
τ	39%	58%	77%									
$e_R = 60\text{ cm}$												
σ_R	55%	78%										
F_S	51%	73%										
$\sigma_{c,90,U}$	60%	56%										
$\sigma_{c,90,rad}$	43%	66%										
σ	37%	55%										
τ	45%	69%										
$e_R = 70\text{ cm}$												
σ_R	62%	89%										
F_S	59%	84%										
$\sigma_{c,90,U}$	58%	54%										
$\sigma_{c,90,rad}$	48%	76%										
σ	48%	71%										
τ	54%	84%										
$e_R = 80\text{ cm}$												
σ_R	70%											
F_S	66%											
$\sigma_{c,90,U}$	57%											
$\sigma_{c,90,rad}$	54%											
σ	58%											
τ	63%											

Schnitt A - A

Tabelle F18 Ausnutzungsgrad für Druckrohrleitung auf Sättel mit $d_i = 2,70\text{ m}$

Holzdaube $d_D = 85\text{mm}$, C24; Spannring $b_R/d_R = 60/8\text{mm}$, S355; Spansschloss M30, S355

p [mWS]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$e_R = 10\text{ cm}$												
σ_R	14%	18%	22%	26%	30%	34%	38%	42%	46%			
F_S	14%	17%	21%	25%	28%	32%	36%	39%	43%			
$\sigma_{c,90,U}$	70%	70%	69%	68%	68%	67%	66%	66%	65%			
$\sigma_{c,90,rad}$	26%	35%	44%	53%	61%	70%	79%	88%	97%			
σ	14%	19%	25%	30%	35%	40%	46%	51%	56%			
τ	21%	29%	37%	46%	54%	62%	70%	78%	87%			
$e_R = 20\text{ cm}$												
σ_R	23%	31%	39%	47%	54%	62%	70%					
F_S	22%	29%	36%	44%	51%	59%	66%					
$\sigma_{c,90,U}$	68%	67%	65%	64%	63%	61%	60%					
$\sigma_{c,90,rad}$	29%	40%	51%	62%	73%	84%	95%					
σ	17%	24%	31%	38%	45%	52%	59%					
τ	24%	35%	45%	55%	66%	76%	87%					
$e_R = 30\text{ cm}$												
σ_R	31%	43%	55%	67%	79%	91%						
F_S	30%	41%	52%	63%	74%	85%						
$\sigma_{c,90,U}$	66%	64%	62%	60%	58%	56%						
$\sigma_{c,90,rad}$	32%	46%	59%	73%	86%	100%						
σ	21%	30%	39%	48%	57%	67%						
τ	29%	42%	55%	68%	80%	93%						
$e_R = 40\text{ cm}$												
σ_R	40%	56%	71%	87%								
F_S	37%	52%	67%	82%								
$\sigma_{c,90,U}$	64%	61%	58%	56%								
$\sigma_{c,90,rad}$	36%	52%	68%	85%								
σ	25%	37%	49%	60%								
τ	35%	51%	66%	82%								
$e_R = 50\text{ cm}$												
σ_R	48%	68%	88%									
F_S	45%	64%	82%									
$\sigma_{c,90,U}$	62%	58%	55%									
$\sigma_{c,90,rad}$	41%	60%	79%									
σ	31%	46%	60%									
τ	40%	59%	79%									
$e_R = 60\text{ cm}$												
σ_R	56%	80%										
F_S	53%	75%										
$\sigma_{c,90,U}$	60%	56%										
$\sigma_{c,90,rad}$	45%	68%										
σ	38%	57%										
τ	47%	71%										
$e_R = 70\text{ cm}$												
σ_R	64%	92%										
F_S	60%	86%										
$\sigma_{c,90,U}$	58%	53%										
$\sigma_{c,90,rad}$	50%	78%										
σ	49%	74%										
τ	56%	86%										
$e_R = 80\text{ cm}$												
σ_R	72%											
F_S	67%											
$\sigma_{c,90,U}$	56%											
$\sigma_{c,90,rad}$	56%											
σ	60%											
τ	65%											

p [mWS]

Schnitt A - A

Tabelle F19 Ausnutzungsgrad für Druckrohrleitung auf Sättel mit $d_i = 2,80$ m

Holzdaube $d_D = 85$ mm, C24; Spannring $b_R/d_R = 60/8$ mm, S355; Spansschloss M30, S355

p [mWS]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$e_R = 10$ cm												
σ_R	15%	19%	23%	27%	31%	35%	39%	43%	47%			
F_S	14%	18%	21%	25%	29%	33%	37%	40%	44%			
$\sigma_{c,90,U}$	70%	70%	69%	68%	67%	67%	66%	65%	65%			
$\sigma_{c,90,rad}$	27%	36%	46%	55%	64%	73%	82%	91%	100%			
σ	15%	20%	25%	31%	36%	42%	47%	53%	58%			
τ	22%	30%	39%	47%	56%	64%	73%	81%	89%			
$e_R = 20$ cm												
σ_R	23%	32%	40%	48%	56%	64%	72%					
F_S	22%	30%	37%	45%	53%	60%	68%					
$\sigma_{c,90,U}$	68%	67%	65%	64%	62%	61%	60%					
$\sigma_{c,90,rad}$	30%	42%	53%	65%	76%	87%	98%					
σ	18%	25%	32%	39%	47%	54%	61%					
τ	25%	36%	47%	57%	68%	79%	89%					
$e_R = 30$ cm												
σ_R	32%	44%	57%	69%	81%							
F_S	30%	42%	53%	65%	76%							
$\sigma_{c,90,U}$	66%	64%	62%	59%	57%							
$\sigma_{c,90,rad}$	34%	48%	62%	75%	89%							
σ	22%	31%	40%	50%	59%							
τ	31%	44%	57%	70%	83%							
$e_R = 40$ cm												
σ_R	40%	57%	73%	90%								
F_S	38%	54%	69%	85%								
$\sigma_{c,90,U}$	64%	61%	58%	55%								
$\sigma_{c,90,rad}$	38%	54%	71%	87%								
σ	26%	38%	50%	63%								
τ	37%	53%	69%	85%								
$e_R = 50$ cm												
σ_R	49%	69%	90%									
F_S	46%	65%	85%									
$\sigma_{c,90,U}$	62%	58%	55%									
$\sigma_{c,90,rad}$	42%	62%	82%									
σ	32%	47%	63%									
τ	42%	62%	82%									
$e_R = 60$ cm												
σ_R	57%	82%										
F_S	54%	77%										
$\sigma_{c,90,U}$	60%	56%										
$\sigma_{c,90,rad}$	47%	71%										
σ	40%	59%										
τ	49%	74%										
$e_R = 70$ cm												
σ_R	65%	94%										
F_S	61%	89%										
$\sigma_{c,90,U}$	58%	53%										
$\sigma_{c,90,rad}$	53%	81%										
σ	52%	77%										
τ	59%	90%										
$e_R = 80$ cm												
σ_R	73%											
F_S	69%											
$\sigma_{c,90,U}$	56%											
$\sigma_{c,90,rad}$	58%											
σ	63%											
τ	68%											

Schnitt A - A

Tabelle F20 Ausnutzungsgrad für Druckrohrleitung auf Sättel mit $d_i = 2,90 \text{ m}$

Holzdaube $d_D = 85 \text{ mm}$, C24; Spannring $b_R/d_R = 60/8 \text{ mm}$, S355; Spanschloss M30, S355

p [mWS]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$e_R = 10 \text{ cm}$												
σ_R	15%	19%	23%	27%	32%	36%	40%	44%				
F_S	14%	18%	22%	26%	30%	34%	38%	42%				
$\sigma_{c,90,U}$	70%	69%	69%	68%	67%	67%	66%	65%				
$\sigma_{c,90,rad}$	29%	38%	48%	57%	66%	76%	85%	95%				
σ	15%	21%	27%	32%	38%	44%	49%	55%				
τ	23%	32%	41%	49%	58%	67%	76%	84%				
$e_R = 20 \text{ cm}$												
σ_R	24%	32%	41%	49%	58%	66%						
F_S	22%	30%	38%	46%	54%	62%						
$\sigma_{c,90,U}$	68%	66%	65%	63%	62%	60%						
$\sigma_{c,90,rad}$	32%	44%	56%	68%	79%	91%						
σ	19%	26%	34%	41%	49%	56%						
τ	27%	38%	49%	60%	71%	82%						
$e_R = 30 \text{ cm}$												
σ_R	33%	45%	58%	71%	84%							
F_S	31%	43%	55%	67%	79%							
$\sigma_{c,90,U}$	66%	64%	61%	59%	57%							
$\sigma_{c,90,rad}$	36%	50%	65%	79%	93%							
σ	23%	33%	42%	52%	62%							
τ	33%	46%	60%	73%	87%							
$e_R = 40 \text{ cm}$												
σ_R	41%	58%	75%	92%								
F_S	39%	55%	71%	87%								
$\sigma_{c,90,U}$	64%	61%	58%	55%								
$\sigma_{c,90,rad}$	40%	57%	74%	92%								
σ	28%	40%	53%	65%								
τ	39%	56%	72%	89%								
$e_R = 50 \text{ cm}$												
σ_R	50%	71%	93%									
F_S	47%	67%	87%									
$\sigma_{c,90,U}$	62%	58%	54%									
$\sigma_{c,90,rad}$	45%	65%	86%									
σ	34%	50%	66%									
τ	44%	65%	86%									
$e_R = 60 \text{ cm}$												
σ_R	58%	84%										
F_S	55%	79%										
$\sigma_{c,90,U}$	60%	55%										
$\sigma_{c,90,rad}$	50%	74%										
σ	42%	62%										
τ	52%	78%										
$e_R = 70 \text{ cm}$												
σ_R	67%	97%										
F_S	63%	91%										
$\sigma_{c,90,U}$	58%	52%										
$\sigma_{c,90,rad}$	56%	85%										
σ	55%	81%										
τ	62%	95%										
$e_R = 80 \text{ cm}$												
σ_R	75%											
F_S	71%											
$\sigma_{c,90,U}$	56%											
$\sigma_{c,90,rad}$	62%											
σ	67%											
τ	73%											

Schnitt A - A

Tabelle F21 Ausnutzungsgrad für Druckrohrleitung auf Sättel mit $d_i = 3,00\text{ m}$

Holzdaube $d_D = 85\text{mm}$, C24; Spannring $b_R/d_R = 60/8\text{mm}$, S355; Spansschloss M30, S355

p [mWS]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$e_R = 10\text{ cm}$												
σ_R	15%	19%	24%	28%	32%	37%	41%	45%				
F_S	14%	18%	22%	26%	30%	35%	39%	43%				
$\sigma_{c,90,U}$	70%	69%	69%	68%	67%	66%	66%	65%				
$\sigma_{c,90,rad}$	31%	41%	51%	60%	70%	80%	90%	100%				
σ	17%	22%	28%	34%	40%	46%	52%	58%				
τ	25%	34%	43%	52%	61%	71%	80%	89%				
$e_R = 20\text{ cm}$												
σ_R	24%	33%	42%	50%	59%	68%						
F_S	23%	31%	39%	48%	56%	64%						
$\sigma_{c,90,U}$	68%	66%	65%	63%	62%	60%						
$\sigma_{c,90,rad}$	35%	47%	59%	71%	84%	96%						
σ	20%	28%	36%	44%	51%	59%						
τ	29%	40%	52%	63%	75%	87%						
$e_R = 30\text{ cm}$												
σ_R	33%	46%	60%	73%	86%							
F_S	31%	44%	56%	69%	81%							
$\sigma_{c,90,U}$	66%	63%	61%	59%	57%							
$\sigma_{c,90,rad}$	38%	53%	68%	83%	98%							
σ	25%	35%	45%	55%	65%							
τ	35%	49%	63%	78%	92%							
$e_R = 40\text{ cm}$												
σ_R	42%	60%	77%	95%								
F_S	40%	56%	73%	89%								
$\sigma_{c,90,U}$	64%	61%	57%	54%								
$\sigma_{c,90,rad}$	43%	61%	79%	97%								
σ	30%	43%	56%	69%								
τ	42%	59%	76%	94%								
$e_R = 50\text{ cm}$												
σ_R	51%	73%	95%									
F_S	48%	69%	89%									
$\sigma_{c,90,U}$	62%	58%	54%									
$\sigma_{c,90,rad}$	48%	70%	91%									
σ	36%	53%	70%									
τ	48%	69%	91%									
$e_R = 60\text{ cm}$												
σ_R	60%	86%										
F_S	56%	81%										
$\sigma_{c,90,U}$	60%	55%										
$\sigma_{c,90,rad}$	54%	79%										
σ	45%	66%										
τ	56%	83%										
$e_R = 70\text{ cm}$												
σ_R	68%	99%										
F_S	64%	93%										
$\sigma_{c,90,U}$	58%	52%										
$\sigma_{c,90,rad}$	60%	91%										
σ	59%	86%										
τ	67%	100%										
$e_R = 80\text{ cm}$												
σ_R	77%											
F_S	72%											
$\sigma_{c,90,U}$	56%											
$\sigma_{c,90,rad}$	66%											
σ	72%											
τ	78%											

Anhang G Anlagen zu Kapitel 10.3.2

Beanspruchung von erdverlegten Druckrohrleitungen aus Holz infolge Erddruck, Auflasten (Verkehrslasten, konzentrierte Flächenlasten) und sonstigen Lasten (z.B. Grundwasser) in Anlehnung an ATV-DVWK-A 127 (08/2000):

- **Erdlast und gleichmäßig verteilte Flächenlasten (Schüttgüter)**

Die mittlere vertikale Spannung infolge Erdlast in einem horizontalen Schnitt der Grabenverfüllung im Abstand h von der Oberfläche beträgt:

$$p_E = \kappa \cdot \gamma_B \cdot h \quad (72)$$

Für eine gleichmäßig verteilte Flächenlast p_0 ergibt sich:

$$p_E = \kappa_0 \cdot p_0 \quad (73)$$

Insgesamt ergibt sich somit eine Bodenspannung in Rohrscheitelhöhe nach Gleichung (74):

$$p_{E,ges} = \kappa \cdot \gamma_B \cdot h + \kappa_0 \cdot p_0 \quad (74)$$

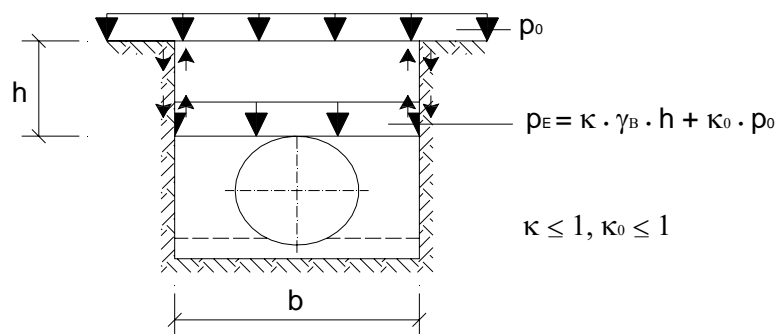


Bild G1 Bodenspannung infolge Erd- und Flächenlasten

Mit Hilfe des Erddruckverhältnisses K_1 (vgl. ATV-DVWK-A 127, Tab. 4), der Überdeckungshöhe h über Rohrscheitel, der Grabenbreite b in Höhe des Rohrscheitels und dem wirksamen Wandreibungswinkel δ (vgl. ATV-DVWK-A 127, Tab. 4) können nach der Silotheorie die Abminderungsbeiwerte κ für eine Grabenlast bzw. κ_0 für eine Flächenlast bestimmt werden:

$$\kappa = \frac{1 - e^{-2 \cdot \frac{h}{b} \cdot K_1 \cdot \tan \delta}}{2 \cdot \frac{h}{b} \cdot K_1 \cdot \tan \delta} \quad (75)$$

$$\kappa_0 = e^{-2 \cdot \frac{h}{b} \cdot K_1 \cdot \tan \delta} \quad (76)$$

Für beliebige Böschungswinkel β ergibt sich der Abminderungsbeiwert κ_β für eine Grabenlast durch lineare Interpolation entsprechend dem Böschungswinkel ($\kappa_{0\beta}$ analog):

$$\kappa_\beta = 1 - \frac{\beta}{90} + \kappa \cdot \frac{\beta}{90} \quad (77)$$

• Verkehrslasten und begrenzte Flächenlasten

Die Bodenspannung p infolge Straßenverkehrslasten berechnet sich in Abhängigkeit von der Überdeckungshöhe h und dem Rohrdurchmesser nach folgender Näherungsgleichung:

$$p = a_F \cdot p_F \quad (78)$$

Die maximale Spannung wird durch die Näherung p_F nach Boussinesq unter Radlasten und Radaufstandsflächen nach DIN 1072 (12/1985) und unter der Berücksichtigung der Hilfslasten F_A und F_E sowie der Hilfsradien r_A und r_E (vgl. ATV-DVWK-A 127, Tab. 5) bestimmt:

$$p_F = \frac{F_A}{r_A^2 \cdot \pi} \cdot \left(1 - \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{r_A}{h} \right)^2} \right)^{\frac{3}{2}} \right) + \frac{3 \cdot F_E}{2 \cdot \pi \cdot h^2} \cdot \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{r_E}{h} \right)^2} \right)^{\frac{5}{2}} \quad (79)$$

Der Korrekturfaktor a_F dient zur Berücksichtigung der Druckausbreitung über dem Rohrquerschnitt (mittlerer Rohrdurchmesser d_m) und der mittragenden Rohrlänge bei kleinen Überdeckungshöhen:

$$a_F = 1 - \frac{0,9}{0,9 + \frac{4 \cdot h^2 + h^6}{1,1 \cdot d_m^{2/3}}} \quad (80)$$

Die sich aus den Verkehrslasten ergebenden Spannungen p sind mit einem Stoßbeiwert φ nach ATV-DVWK-A 127, Tab. 6 zu bestimmen:

$$p_v = \varphi \cdot p \quad (81)$$

• Rohrsteifigkeit

Die Rohrsteifigkeit von Druckrohrleitungen aus Holz wird für die Bemessung bei Beanspruchung des Rohrquerschnitts durch Erddruck und Auflasten vereinfacht nach folgender Gleichung bestimmt:

$$S_r = \frac{E_{90}}{12} \cdot \left(\frac{d_D}{r_m} \right)^3 \quad (82)$$

• Horizontale Bettungssteifigkeit

Die horizontale Bettungssteifigkeit wird mittels des Verformungsmoduls in der Bodenzone 2 und einem Korrekturfaktor berechnet zu:

$$S_{Bh} = 0,6 \cdot \zeta \cdot E_2 \quad (83)$$

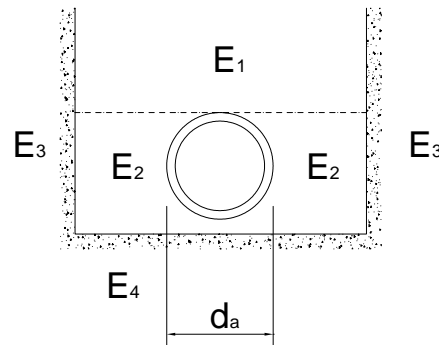


Bild G2 Einteilung der Bodenzonen

Der Korrekturfaktor ζ für die horizontale Bettungssteifigkeit zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Verformungsmoduls in den Bodenzonen ist:

$$\zeta = \frac{1,667}{\Delta f + (1,667 - \Delta f) \cdot \frac{E_2}{E_3}} \quad (84)$$

Der Hilfwert Δf wird unter Berücksichtigung der Grabenbreite b und des Rohraußendurchmessers d_a mit folgender Gleichung bestimmt:

$$\Delta f = \frac{\frac{b}{d_a} - 1}{0,980 + 0,303 \cdot \left(\frac{b}{d_a} - 1\right)} \leq 1,667 \quad (85)$$

- **Systemsteifigkeit**

Die Systemsteifigkeit V_{RB} erfasst den Grad der Inanspruchnahme von horizontalen Bettungsreaktionsdrücken:

$$V_{RB} = \frac{S_R}{S_{Bh}} = \frac{8 \cdot S_0}{S_{Bh}} \quad (86)$$

- **Vertikale Bettungssteifigkeit**

Die vertikale Bettungssteifigkeit S_{Bv} berechnet sich mit Hilfe der relativen Ausladung a zu:

$$S_{Bv} = \frac{E_2}{a} \quad (87)$$

- **Verformungsbeiwerte**

Der Reaktionsdruckbeiwert K^* berücksichtigt die Verformungsbeiwerte $c_{h,qv}$ und c_{h,qh^*} nach ATV-DVWK-A 127, Tab. 10a für unterschiedliche Auflagerwinkel:

$$K^* = \frac{c_{h,qv}}{V_{RB} - c_{h,qh^*}} \quad (88)$$

Der Beiwert c_v^* für die vertikale Verformung Δd_v beträgt:

$$c_v^* = c_{v,qv} + c_{v,qh^*} \cdot K^* \quad (89)$$

- **Steifigkeitsverhältnis**

Das Steifigkeitsverhältnis bei Berücksichtigung des horizontalen Bettungsreaktionsdruckes berechnet sich nach folgender Gleichung:

$$V_S = \frac{8 \cdot S_0}{|c_v^*| \cdot S_{Bv}} \quad (90)$$

• Konzentrationsfaktoren

Bei der Berechnung des maximalen Konzentrationsfaktor $\max \lambda$ wird von einem unendlich starren Rohr auf nachgiebigem Boden in weiter Schüttung ausgegangen. Durch Ansatz der Rohrverformungen und des Steifigkeitsverhältnisses V_S berechnet sich der Konzentrationsfaktor λ folgendermaßen:

$$\lambda_R = \frac{\max \lambda \cdot V_S + a' \cdot \frac{4 \cdot K_2 \cdot K'}{3} \cdot \frac{\max \lambda - 1}{a' - 0,25}}{V_S + a' \cdot \frac{3 + K_2 \cdot K'}{3} \cdot \frac{\max \lambda - 1}{a' - 0,25}} \quad (91)$$

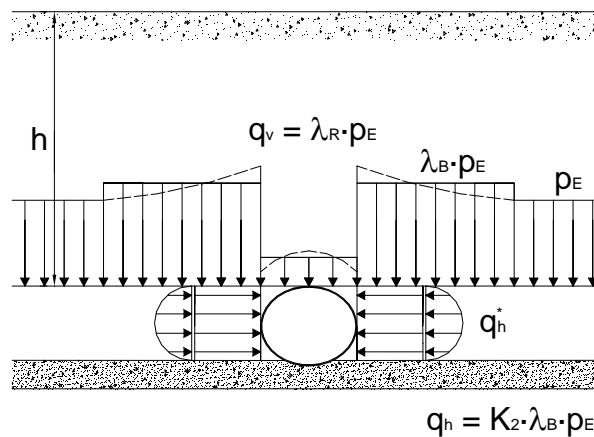


Bild G3 Umlagerung der Bodenspannung (biegeweiche Rohre)

In Gleichung (91) ist der maximale Konzentrationsfaktor $\max \lambda$ ($1 \leq \max \lambda \leq 4$):

$$\max \lambda = 1 + \frac{\frac{h}{d_a}}{\frac{3,5}{a'} + \frac{2,2}{\frac{E_4}{E_1} \cdot (a' - 0,25)} + \left(\frac{0,62}{a'} + \frac{1,6}{\frac{E_4}{E_1} \cdot (a' - 0,25)} \right) \cdot \frac{h}{d_a}} \quad (92)$$

Die wirksame relative Ausladung berechnet sich bei dem vereinfachten Nachweis zu:

$$a' = a \cdot \frac{E_1}{E_2} \geq 0,26 \quad (93)$$

Das Erddruckverhältnis K_2 im Boden neben dem Rohr wird unter Berücksichtigung der Systemsteifigkeit V_{RB} nach ATV-DVWK-A 127, Tab. 9 bestimmt.

Für den Beiwert der Verformungen K' gilt:

$$K' = - \frac{c_{v,qh} + \frac{c_{h,qh}}{c_{h,qv}} \cdot c_{v,qh^*} \cdot K^*}{c_{v,qv} + c_{v,qh^*} \cdot K^*} \quad (94)$$

Für den Konzentrationsfaktor λ_{RG} wird folgende Annahme getroffen:

$$1 \leq b/d_a \leq 4: \quad \lambda_{RG} = \frac{\lambda_R - 1}{3} \cdot \frac{b}{d_a} + \frac{4 - \lambda_R}{3} \quad (95)$$

$$4 \leq b/d_a \leq \infty: \quad \lambda_{RG} = \lambda_R = \text{const.}$$

Der Konzentrationsfaktor λ_{RG} wird durch die Scherfestigkeit des Bodens begrenzt:

$$\lambda_{fu} \leq \lambda_{RG} \leq \lambda_{fo} \quad (96)$$

Der Konzentrationsfaktor λ_B ergibt sich aus der idealisierten Form der Spannungumlagerung und aus Gleichgewichtsgründen zu:

$$\lambda_B = \frac{4 - \lambda_R}{3} \quad (97)$$

Falls jedoch λ_{RG} durch λ_{fo} oder λ_{fu} begrenzt wird, ergibt sich der Konzentrationsfaktor λ_B zu:

$$\lambda_B = \frac{\frac{b}{d_a} - \lambda_{fo,u}}{\frac{b}{d_a} - 1} \quad (98)$$

• Vertikale Gesamtlast

Die vertikale Gesamtlast des Rohres setzt sich aus den Verkehrslasten und begrenzte Flächenlasten sowie den Erdlasten und gleichmäßig verteilte Flächenlasten zusammen:

$$q_v = \lambda_{RG} \cdot p_E + p_V \quad (99)$$

• Seitendruck

Der Seitendruck q_h berechnet sich in Abhängigkeit vom vertikalen Druck im Boden neben der Rohrleitung zu:

$$q_h = K_2 \cdot \left(\lambda_B \cdot p_E + \gamma_B \cdot \frac{d_a}{2} \right) \quad (100)$$

Der aus der Rohrverformung resultierende Bettungsreaktionsdruck q_h^* wird in Form einer Parabel mit dem Öffnungswinkel von 120° angesetzt:

$$q_h^* = \frac{c_{h,qv} \cdot q_v + c_{h,qh} \cdot q_h}{V_{RB} - c_{h,qh^*}} \quad (101)$$

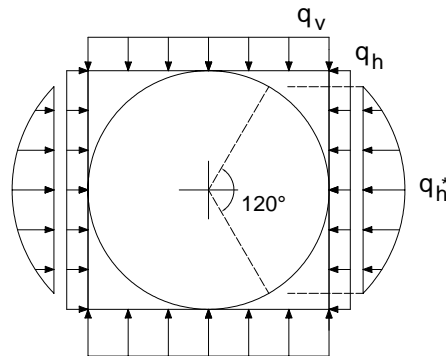


Bild G4 Druckverteilung am Rohrumfang (biegeweiche Rohre)

• Schnittkräfte und Spannungen in Umfangsrichtung

Zur Ermittlung der Biegemomente M und Normalkräfte N in Umfangsrichtung der Rohrleitung unter der Beanspruchung infolge Erddruck, Auflasten und äußerem Wasserdruck ist die ungünstigste Lastfallkombination maßgebend. Die Momentenbeiwerte m und Normalkraftbeiwerte n können für verschiedene Lagerungsfälle ATV-DVWK-A 127 Anhang 1, Tab. T3 entnommen werden:

vertikale Gesamtbelastung q_v :

$$M_{qv} = m_{qv} \cdot q_v \cdot r_{innen}^2 \quad (102)$$

$$N_{qv} = n_{qv} \cdot q_v \cdot r_{innen} \quad (103)$$

Seitendruck q_h :

$$M_{qh} = m_{qh} \cdot q_h \cdot r_{innen}^2 \quad (104)$$

$$N_{qh} = n_{qh} \cdot q_h \cdot r_{innen} \quad (105)$$

horizontaler Bettungsreaktionsdruck q_h^* infolge von Erdlasten:

$$M_{qh^*} = m_{qh^*} \cdot q_h^* \cdot r_{innen}^2 \quad (106)$$

$$N_{qh}^* = n_{qh}^* \cdot q_h^* \cdot r_{innen} \quad (107)$$

horizontaler Bettungsreaktionsdruck q_h^* infolge Wasserfüllung:

$$M_{qw}^* = m_{qh}^* \cdot q_{hw}^* \cdot r_{innen}^2 \quad (108)$$

$$N_{qw}^* = n_{qh}^* \cdot q_{hw}^* \cdot r_{innen} \quad (109)$$

Eigengewicht:

$$M_g = m_g \cdot \gamma_R \cdot d_D \cdot r_{innen}^2 \quad (110)$$

$$N_g = n_g \cdot \gamma_R \cdot d_D \cdot r_{innen} \quad (111)$$

Wasserfüllung:

$$M_w = m_w \cdot \gamma_w \cdot r_{innen}^3 \quad (112)$$

$$N_w = n_w \cdot \gamma_w \cdot r_{innen}^2 \quad (113)$$

Die Querdruckspannung der Holzdauben in Umfangsrichtung der Rohrleitung unter der Beanspruchung infolge Erddruck, Auflasten und äußerem Wasserdruck wird nach Gleichung (114) bestimmt. Dabei ist q für die ungünstigste Lastfallkombination zu ermitteln. Eine Momentenbeanspruchung des Rohrquerschnittes führt zu einer klaffenden Fuge zwischen den Holzdauben. Der Nachweis der Querdruckspannung der Holzdauben in Umfangsrichtung muss deshalb mit dem verbleibenden druckbeanspruchten Restquerschnitt der Holzdaube (Daubendicke $d_{D,ef}$) geführt werden. Das zulässige Maß der klaffenden Fuge wird auf maximal ein Drittel der Daubendicke d_D begrenzt.

$$\sigma_{c,90,U} = \frac{n \cdot q \cdot r_{innen}}{d_{D,ef}} + \frac{6 \cdot m \cdot q \cdot r_{innen}^2}{d_{D,ef}^2} \quad (114)$$

- **Stabilitätsnachweis mit Beul- bzw. Durchschlaglasten**

Die kritische Beullast q_v wird unter den Bedingungen konstanter radialer Bettung und einer Systemsteifigkeit $V_{RB} \leq 0,1$ nach folgender Gleichung berechnet:

$$\text{krit } q_v = 2 \cdot \kappa_{v2} \cdot \sqrt{8 \cdot S_0 \cdot S_{Bh}} \quad (115)$$

Der Sicherheitsbeiwert gegen Beulen unter vertikaler Last beträgt:

$$\gamma = \frac{\text{krit } q_v}{q_v} \quad (116)$$

Die kritische Durchschlaglast p_a unter äußerem Wasserdruck berechnet sich unter Berücksichtigung des Durchschlagbeiwertes α_D nach ATV-DVWK-A 127, Diagr. D10 zu:

$$\text{krit } p_a = \kappa_a \cdot \alpha_D \cdot 8 \cdot S_0 \quad (117)$$

Der für die Berechnung zugrunde liegende äußere Wasserdruck ist der auf die Rohrsohle bezogene hydrostatische Druck:

$$p_a = \gamma_W \cdot h_W \quad (118)$$

Der Sicherheitsbeiwert gegen Beulen unter äußerem Wasserdruck beträgt:

$$\gamma = \frac{\text{krit } p_a}{p_a} \quad (119)$$

Die Überlagerung der beiden Lastfälle bei gleichzeitig wirkender vertikaler Gesamtlast und äußerem Wasserdruck führt zu:

$$\gamma = \frac{1}{\frac{q_{v,A}}{\text{krit } q_v} + \frac{p_a}{\text{krit } p_a}} \quad (120)$$

Anhang H Anlagen zu Kapitel 11

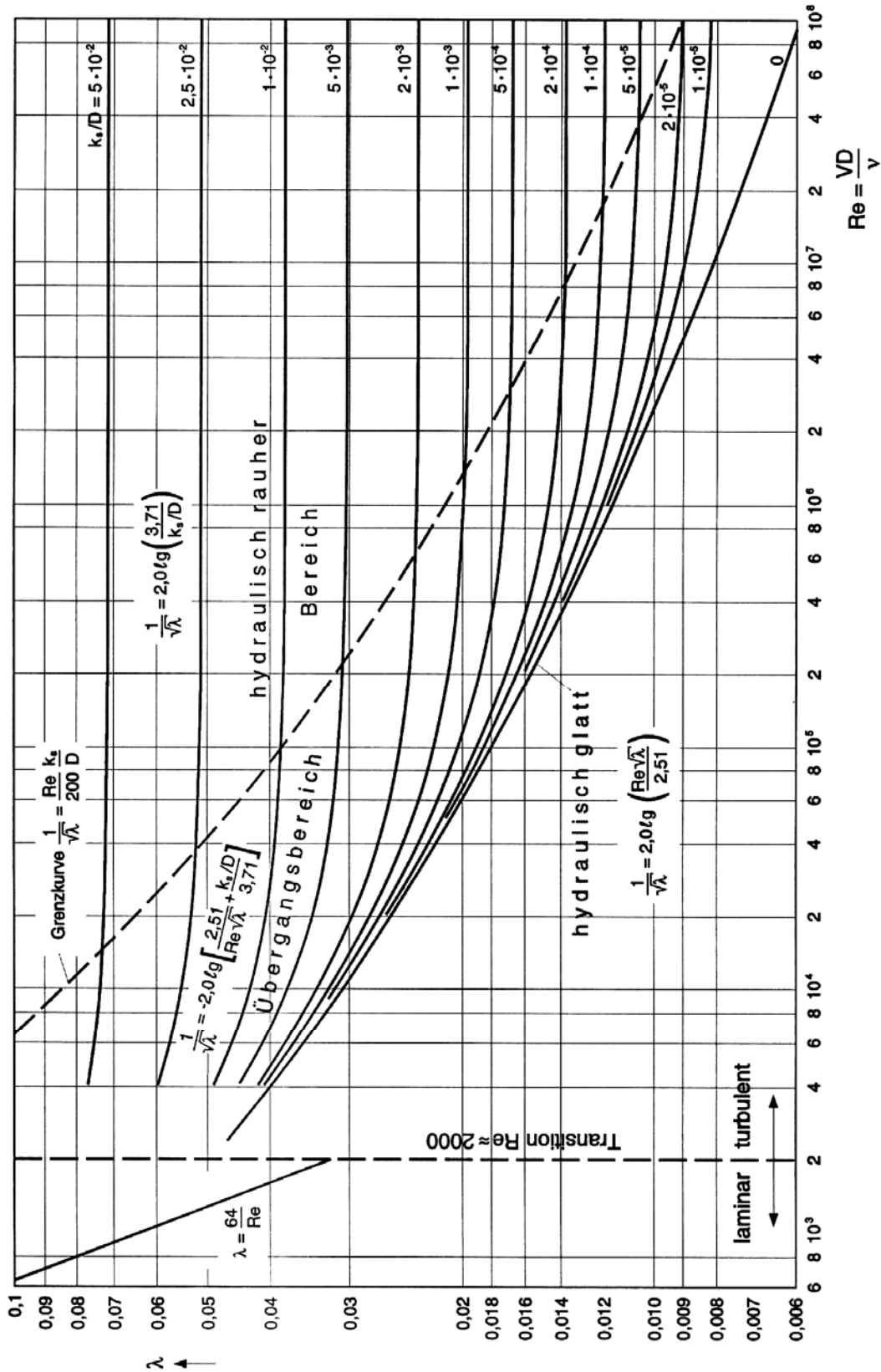


Bild H1 Moody-Diagramm

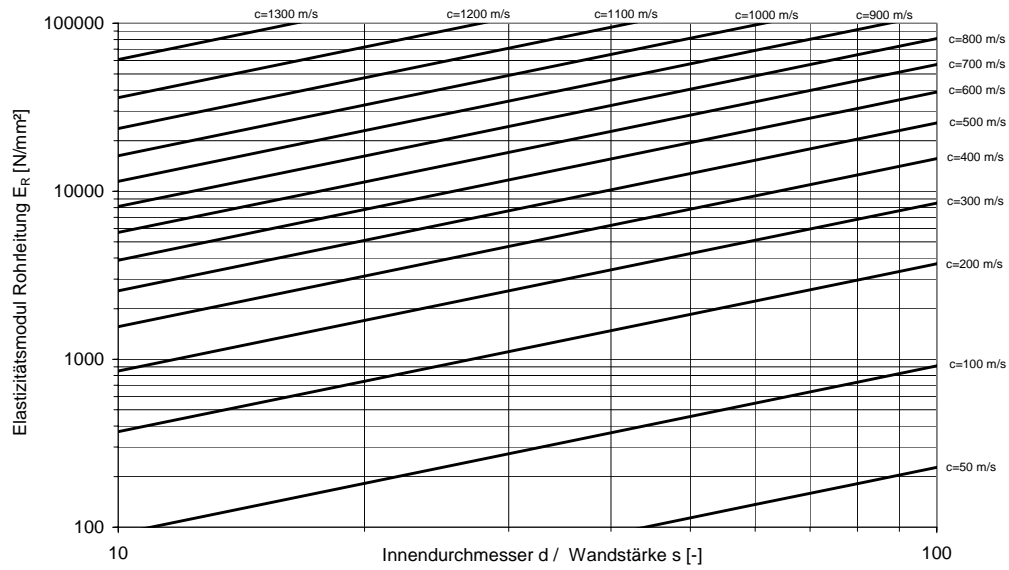


Bild H2 Druckwellengeschwindigkeit c in Abhängigkeit der Rohrleitungsparameter für dünnwandige Rohrleitungen

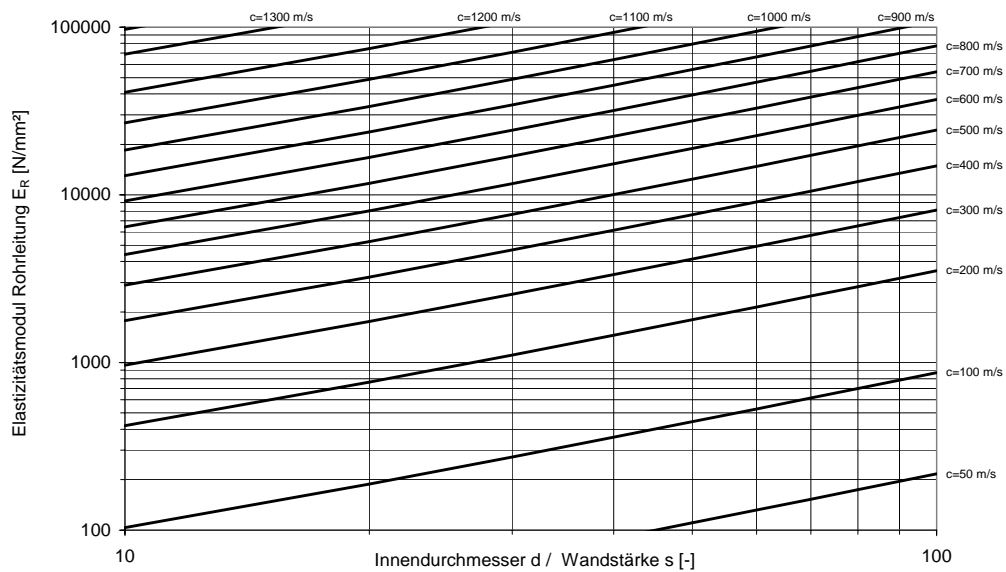


Bild H3 Druckwellengeschwindigkeit c in Abhängigkeit der Rohrleitungsparameter für dickwandige Rohrleitungen ($s = 5$ cm)

Lebenslauf

05.05.1974	geboren in Bühl
1980 - 1984	Grundschule Bühlertal
1984 - 1990	Realschule Bühlertal
1990 - 1993	Technisches Gymnasium Bühl
18.05.1993	Reifeprüfung
Okt. 1993 - Nov. 1999	Studium des Bauingenieurwesens an der Universität Karlsruhe (TH), Vertiefungsrichtung konstruktiver Ingenieurbau
01.01.2000 - 15.04.2001	Mitarbeiter der Schöck Bauteile GmbH, Baden-Baden, Abteilung Anwendungstechnik und Entwicklung
seit 01.05.2001	Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität Karlsruhe (TH), Abteilung Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen

Durch die zunehmende Bedeutung regenerativer Ressourcen erhielt der Einsatz von Druckrohrleitungen aus Holz als Zuleitung für Wasserkraftanlagen in den letzten Jahren neue Impulse. Die Herstellung von Druckrohrleitungen aus Holz kann in offener Bauweise entweder durch eine Verlegung im Graben auf kiesigem Untergrund mit anschließender Verfüllung oder auf Sätteln als Auflager erfolgen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zunächst der Einfluss der Holzfeuchte auf relevante Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften von ausgewählten Holzarten bestimmt.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden als Eingangsdaten für eine FE-Modellierung von aufgelagerten Druckrohrleitungen aus Holz eingesetzt. Das Rechenmodell wurde durch umfangreiche experimentelle Untersuchungen verifiziert. Bemessungstabellen ermöglichen eine genaue und wirtschaftliche Bemessung von aufgelagerten Druckrohrleitungen aus Nadelholz der Festigkeitsklasse C24.

Zusätzlich wird für die Bemessung von erdverlegten Druckrohrleitungen aus Holz ein praxisgerechtes, vereinfachtes Bemessungskonzept vorgestellt.