

Einsatz von Festigungsmitteln zur Konsolidierung der Tragfähigkeit von bestehendem Mauerwerk

Von dem Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Universität Hannover

zur Erlangung des Grades

DOKTOR-INGENIEUR

genehmigte
DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Sabine Iffert-Schier

geboren am 14.05.1963, in Göttingen

2000

Referent:	Apl. Professor Dr.-Ing. Jürgen Lierse
Korreferent:	Univ. Professor Dr.-Ing. Kurt Kirtschig
Gutachter:	Professor Dr.-Ing. Wolf-Rüdiger Metje
Tag der Promotion:	22.11.1999

Stichworte: Mauerwerk, Festigungsmittel, Tragfähigkeit

Kurzfassung

EINSATZ VON FESTIGUNGSMITTELN ZUR KONSOLIDIERUNG DER TRAGFÄHIGKEIT VON BESTEHENDEM MAUERWERK

Nach einem Überblick über den gegenwärtigen Stand der Forschung wurden Untersuchungen zum Einsatz von Festigungsmitteln zur Konsolidierung der Tragfähigkeit von bestehendem Mauerwerk durchgeführt.

Als Steinmaterial wurden drei unterschiedliche Sandsteine, historische Abbruchziegel und fabrikneue Ziegel verwandt. Aus den unterschiedlichen Steinmaterialien sind ca. 100 RILEM-Körper mit Mörtelgruppe MGI aufgemauert worden und sowohl mit Steinfestigungsmitteln behandelt als auch unbehandelt in der Druckprüfmaschine über den Bruch hinaus belastet worden. Dabei wurden die Rißlast, die maximale Last sowie die Verformung, ermittelt mit induktiven Wegaufnehmern, erfaßt. Der Vergleich der so ermittelten Spannungs-Dehnungs-Linien ungefestigter und gefestigter RILEM-Körper gibt Aufschluß über ein verändertes Tragverhalten nach einer Behandlung mit Steinfestigungsmitteln. Das Verformungsverhalten wird bereits bei einer geringen Eindringtiefe des Steinfestigers in Stein und Mörtel beeinflußt.

Parallel zu den Versuchen an RILEM-Körpern wurden Versuche an ungefestigten und gefestigten Einzelsteinen und Mörteln der Mörtelgruppe MGI hinsichtlich physikalisch-mechanischer Eigenschaften durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen war es, Korrelationen zwischen zerstörungsarmen bzw. -freien Untersuchungsmethoden, hier Ultraschalllaufzeit- und Resonanzfrequenzmessung, zu physikalisch-mechanischen Eigenschaften herzustellen, z.B. Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit, um so den Festigungserfolg möglichst substanzschonend ermitteln zu können. Da die Ultraschalllaufzeitmessung am bestehenden Bauwerk einfacher anzuwenden ist als die Resonanzfrequenzmessung, wurde sich bei der Ermittlung von Ausgleichsgeraden auf die Ultraschalllaufzeitmessungen beschränkt. Die ermittelten Ausgleichsgeraden wiesen unterschiedlich gute Zusammenhänge auf, ausgedrückt durch das Bestimmtheitsmaß r^2 .

Mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente wurden Parameterstudien durchgeführt. Der Einfluß der Eindringtiefen des Steinfestigungsmittels auf die Tragfähigkeit von bestehendem Mauerwerk sollte mittels der Methode der Finiten Element numerisch erfaßt werden. Unter der Annahme linear elastischen Materialverhaltens bis zum ersten Riß wurden Horizontal- und Vertikalspannungen ungefestigter und gefestigter Mauerwerkskörper miteinander verglichen. Bei gleichbleibender vertikaler Druckbelastung sind die Horizontalspannungen in Stein und Mörtel am geringsten, wenn ausschließlich die Mörtelfuge gefestigt wird.

Aufgrund der durchgeführten Versuche kann festgestellt werden, daß die untersuchten Steinfestigungsmittel zur Tragfähigkeitssteigerung bestehenden Mauerwerks eingesetzt werden können.

Key words: masonry, Strengthening agents, bearing capacity

Abstract

USE OF STRENGTHENING AGENTS FOR CONSOLIDATING THE BEARING CAPACITY OF EXISTING MASONRY

Following a survey of the current state of research, investigations were carried out into the use of strengthening agents for consolidating the bearing capacity of existing masonry.

Three different sandstones, historical demolished brick and brand-new brick were used as the stone material. Using the different stone materials, approx. 100 RILEM brickwork bodies were laid with mortar group MGI, both treated with stone strengthening agents and untreated, and tested to failure in the compression testing machine. The cracking load, the maximum load, and the deformation were determined using inductive displacement transducers and recorded. A comparison between the resulting stress-strain lines for unconsolidated and consolidated RILEM bodies provides information of the modified load bearing performance following treatment with stone strengthening agents. The deformation performance is influenced by even a very small depth of penetration of the stone strengthener into the stone and mortar.

Parallel to the tests on RILEM bodies, tests were also carried out on unconsolidated and consolidated individual stones, and mortars of the mortar group MGI with respect to their physical-mechanical properties. The aim of these tests was to determine correlations between low-destruction or non-destructive methods of testing, in this case between ultrasonic transition time and resonance frequency measurement and physical-mechanical properties, e.g. compressive strength, bending tensile strength, to be able to determine the success of strengthening while protecting the physical substance of the structure as far as possible. As the ultrasonic transition time measurement is easier to use on existing masonry than the resonance frequency measurement, the trend lines were limited to the ultrasonic transition time measurements. The trend lines determined show different quality of correlations expressed by the index of determination r^2 .

Parameter studies were carried out using the finite elements method. The intention is to express the influence of the penetration depth of the stone-strengthening agent on the load bearing capacity of existing masonry numerically by means of the finite elements method. Assuming a linearly elastic material up to the first crack, the horizontal and vertical stresses of unconsolidated and consolidated masonry structures were compared with each other. The horizontal stresses in stone and mortar are the lowest for a constant vertical compressive load, if only the mortar joints are strengthened.

Using the tests carried out, it can be determined that the investigated stone strengthening agents can be used to improve the load bearing capacity of existing brickwork.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Zielsetzung	1
2	Stand der Forschung.....	2
2.1	Literatursichtung und -auswertung	2
2.1.1	Bruchmechanismus und Tragverhalten von Mauerwerk.....	2
2.1.1.1	<i>Allgemeines</i>	<i>2</i>
2.1.1.2	<i>Mauerwerk aus historischen Ziegeln.....</i>	<i>4</i>
2.1.1.3	<i>Mauerwerk aus Natursteinen.....</i>	<i>6</i>
2.1.2	Verstärkung und Sicherung von ausgeführtem Mauerwerk.....	9
2.1.3	Mechanische Eigenschaften von Sandsteinen.....	11
2.1.4	Einsatz und Wirkung von Steinfestigungsmitteln.....	13
2.1.5	Zerstörungsarme/-freie Untersuchungsmethoden an Mauerwerk.....	17
2.1.5.1	<i>Allgemeiner Überblick.....</i>	<i>17</i>
2.1.5.2	<i>Bohrwiderstandsmessung</i>	<i>19</i>
2.1.5.3	<i>Ultraschallaufzeitmessung.....</i>	<i>20</i>
2.1.5.4	<i>Resonanzfrequenzmessung</i>	<i>24</i>
2.1.5.5	<i>Vergleich Ultraschallaufzeitmessung - Resonanzfrequenzmessung</i>	<i>25</i>
2.1.6	Korrelationen der Messergebnisse aus Ultraschallaufzeit- und Resonanzfrequenzmessung mit physikalisch-mechanischen Gesteinseigenschaften	26
2.2	Folgerungen für das Versuchsprogramm	28
3	Versuchsprogramm.....	30
3.1	Untersuchungsmaterial.....	30
3.1.1	Steine	30
3.1.1.1	<i>Ziegel.....</i>	<i>30</i>
3.1.1.2	<i>Natursteine</i>	<i>30</i>
3.1.2	Mörtel.....	32
3.1.3	Steinfestiger	33
3.2	Mauerwerkskörper (“RILEM“-Körper).....	34
3.3	Messgeräte zur zerstörungsfreien Materialprüfung	35
3.3.1	Ultraschall-Meßgerät	35
3.3.2	Resonanzfrequenz-Meßgerät.....	35
3.4	Durchgeführte Laborversuche	36
3.4.1	Festigung der Steine, des Mörtels und der Mauerwerkskörper.....	36
3.4.2	Versuche an Einzelprüfkörpern	36
3.4.3	Versuche an RILEM-Körpern.....	38

4	Versuchsdurchführung und Prüfergebnisse	40
4.1	Vorversuche	40
4.1.1	Bohrwiderstandsmessung	40
4.1.2	Einflüsse auf die Ultraschall- und Resonanzfrequenzmessung.....	40
4.1.2.1	<i>Stofffeuchte.....</i>	<i>40</i>
4.1.2.2	<i>Anisotropie.....</i>	<i>41</i>
4.1.2.3	<i>Auflagerung.....</i>	<i>42</i>
4.1.2.4	<i>Einfluß von feinen Rissen oder Brüchen.....</i>	<i>43</i>
4.2	Ziegel.....	43
4.2.1	Festigung der Ziegel.....	43
4.2.2	Rohdichte und Druckfestigkeit.....	45
4.2.3	Schallgeschwindigkeit und dynamischer E-Modul	46
4.2.4	Dichte, Trockenrohddichte, Gesamtporosität und Wasseraufnahme	47
4.2.5	Frost-Tau-Wechsel.....	48
4.3	Sandsteine	50
4.3.1	Festigung der Sandsteine.....	50
4.3.2	Rohdichte, Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit.....	53
4.3.3	Schallgeschwindigkeit und dynamischer E-Modul	56
4.3.4	Statischer E-Modul	58
4.3.5	Dichte, Trockenrohddichte, Gesamtporosität und Wasseraufnahme	58
4.3.6	Frost-Tau-Wechsel.....	59
4.4	Mörtel.....	62
4.4.1	Festigung der Mörtel.....	62
4.4.2	Rohdichte, Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit.....	62
4.4.3	Schallgeschwindigkeit und dynamischer E-Modul	63
4.4.4	Trockenrohddichte, Wasseraufnahme.....	64
4.4.5	Frost-Tau-Wechsel.....	65
4.5	RILEM-Körper	65
4.5.1	RILEM-Körper aus fabrikneuen und historischen Ziegeln.....	65
4.5.2	RILEM-Körper aus Sandsteinen	66
5	Auswertung und Diskussion der Versuchsergebnisse.....	68
5.1	Aufnahme der Festigungsmittel.....	68
5.2	Biegezugfestigkeit der Mörtel und Sandsteine.....	69
5.3	Rohdichte und Druckfestigkeit der Ziegel, Mörtel und Sandsteine	71
5.4	Schallgeschwindigkeit und dynamischer E-Modul der Ziegel, Mörtel und Sandsteine.....	73
5.5	Statischer E-Modul der Sandsteine	74

5.6	Gesamtporosität sowie Wasseraufnahme der Ziegel, Mörtel und Sandsteine	75
5.7	Frost-Tau-Wechsel der Ziegel, Mörtel und Sandsteine.....	77
5.8	Versuche an ungefestigten und gefestigten RILEM-Körpern.....	77
5.8.1	Bruchspannungen der RILEM-Körper.....	77
5.8.2	Auftreten des 1. Risses an den RILEM-Körpern.....	79
5.8.3	Einfluß der Mörtel- und Steindruckfestigkeit	80
5.8.4	Verformungsverhalten der RILEM-Körper	81
5.8.5	Verformungsmodul der RILEM-Körper	85
5.9	Korrelationen	88
5.9.1	Dynamischer E-Modul ermittelt aus der Ultraschallgeschwindigkeit und der Resonanzfrequenz.....	88
5.9.2	Korrelationen zwischen Ultraschallgeschwindigkeit und Druckfestigkeit	89
5.9.3	Korrelationen zwischen Schallgeschwindigkeit und Biegezugfestigkeit.....	93
5.9.4	Korrelationen zwischen Druckfestigkeit und dynamischem E-Modul	98
5.9.5	Korrelationen zwischen dynamischem und statischem Elastizitätsmodul..	101
5.9.6	Korrelationen zwischen Schallgeschwindigkeit und Rohdichte.....	104
5.9.7	Zusammenfassung der untersuchten Korrelationen.....	107
5.10	Beurteilung der statistischen Auswertungen der Versuchsergebnisse	109
6	Parameterstudie mit der Methode der Finiten Elemente	110
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	120
8	Literaturverzeichnis.....	124
9	Anhänge.....	132

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Stein- und Mörtelspannungen infolge einachsiger Druckbelastung	2
Abbildung 2.2:	„Moderne“ und „historische“ Dichtefunktionen der Steindruckfestigkeiten bei gleicher Steinnennfestigkeit [46]	5
Abbildung 2.3:	Modell der Kraftübertragung in Bruchsteinmauerwerk [78]	7
Abbildung 2.4:	Formfaktor f der Mörtelfugen in Abhängigkeit von der Fugenneigung α und dem Verhältnis Höhe/Länge (h/d) der wirksamen Fuge [78]	7
Abbildung 2.5:	Haupt- und Nebeneinflüsse auf die Festigkeitsbildung von Sandsteinen [3]	12
Abbildung 2.6:	Vereinfachte Darstellung des mikrostrukturellen Aufbaus von Sandstein [4]	12
Abbildung 2.7:	Rißverlauf bei mechanischer Belastung quer und längs zur Schichtung [5]	13
Abbildung 2.8:	Gesamtreaktion der Kieselsäureesterfestigung [117]	14
Abbildung 2.9:	Einfaches Porenmodell [102]	15
Abbildung 2.10:	Festigkeitsprofil eines verwitterten Steins [118]	16
Abbildung 2.11:	Durchschallung eines Probekörpers	21
Abbildung 2.12:	Elastische Wellen in festen Baustoffen [72]	22
Abbildung 2.13:	Ermittlung der Eigenfrequenz eines Prüfkörpers	24
Abbildung 3.1:	Probengewinnung aus den Blöcken und Orientierung zur Schichtung	32
Abbildung 3.2:	Sieblinie des Mauersandes aus der Grube Bolsehle	33
Abbildung 3.3:	RILEM-Prüfkörper mit Meßstellenanordnung	35
Abbildung 4.1:	Aufnahme Festiger und Gelabscheidung, fabrikneue Ziegel mehrfach mit "S" bzw. "T" behandelt	44
Abbildung 4.2:	Aufnahme Festiger und Gelabscheidung, historische Ziegel mehrfach mit "S" bzw. "T" behandelt	45
Abbildung 4.3:	Aufnahme Festiger und Gelabscheidung, Obernkirchener Sandstein mehrfach mit "S" bzw. "T" behandelt	52
Abbildung 4.4:	Aufnahme Festiger und Gelabscheidung, Roter Wesersandstein mehrfach mit "S" bzw. "T" behandelt	52
Abbildung 4.5:	Aufnahme Festiger und Gelabscheidung, Rüthener Grünsandstein mehrfach mit "S" bzw. "T" behandelt	53
Abbildung 4.6:	Festigeraufnahme und Gelabscheidung des Mörtels	62
Abbildung 5.1:	Biegezugfestigkeiten ungefestigter und gefestigter Mörtel und Sandsteine, Mittelwerte aus Tabelle 4.14 und 4.24	70
Abbildung 5.2:	Rohdichten ungefestigter und gefestigter Ziegel, Mörtel und Sandsteine, Mittelwerte aus Tabelle 4.5, 4.12 und 4.23	71
Abbildung 5.3:	Druckfestigkeiten ungefestigter und gefestigter Ziegel, Mörtel und Sandsteine, Mittelwerte aus Tabelle 4.5, 4.13 und 4.24	72
Abbildung 5.4:	Ultraschallgeschwindigkeiten ungefestigter und gefestigter Ziegel, Mörtel und Sandsteine, Mittelwerte aus Tabelle 4.6, 4.15 und 4.25 ..	73
Abbildung 5.5:	Dynamischer E-Modul bestimmt über die Schalllaufzeit ungefestigter und gefestigter Ziegel, Mörtel und Sandsteine, Mittelwerte aus Tabelle 4.6, 4.16 und 4.25	74

Abbildung 5.6:	Statischer E-Modul E_{stat} ungefestigter und gefestigter Sandsteine, Mittelwerte aus Tabelle 4.17	75
Abbildung 5.7:	Gesamtporosität ungefestigter Ziegel und Sandsteine, Mittelwerte aus Tabell 4.7 und 4.18	76
Abbildung 5.8:	Wasseraufnahme ungefestigter und gefestigter Ziegel, Mörtel und Sandsteine, Mittelwerte aus Tabelle 4.9, 4.18 und 4.26	76
Abbildung 5.9:	Bruchspannung der RILEM-Körper ungefestigt und 2-fach im Streichverfahren mit "S" bzw. "T" gefestigt, Mittelwerte aus Anhang 4.4-1 bis 4.4-7	78
Abbildung 5.10:	Prozentuale Zu-(Ab)nahme der Bruchspannung der RILEM-Körper nach Festigung mit "S" bzw. "T"	78
Abbildung 5.11:	Versuchstechnisch und rechnerisch nach Gleichung (5.2) ermittelte Spannungs-Dehnungs-Linie	82
Abbildung 5.12:	Versuchstechnisch und rechnerisch nach Gleichung (5.2) ermittelte Spannungs-Dehnungs-Linie	83
Abbildung 5.13:	Versuchstechnisch und rechnerisch nach Gleichung (5.4) ermittelte Spannungs-Dehnungs-Linie	84
Abbildung 5.14:	Zusammenhang zwischen dem dynamischen E-Modul aufgrund der Ultraschallaufzeit- ($\text{dyn } E_s$) bzw. Resonanzfrequenzmessung ($\text{dyn } E_r$) bei Sandsteinen.....	88
Abbildung 5.15:	Zusammenhang zwischen dem dynamischen E-Modul aufgrund der Ultraschallaufzeit- ($\text{dyn } E_s$) bzw. Resonanzfrequenzmessung ($\text{dyn } E_r$) bei Mörtelprismen	89
Abbildung 5.16:	Korrelation zwischen Druckfestigkeit und Schallgeschwindigkeit bei fabrikneuen Ziegeln	90
Abbildung 5.17:	Korrelation zwischen Druckfestigkeit und Schallgeschwindigkeit bei historischen Ziegeln	91
Abbildung 5.18:	Korrelation zwischen Druckfestigkeit und Schallgeschwindigkeit bei Mörteln	92
Abbildung 5.19:	Korrelation zwischen Druckfestigkeit und Schallgeschwindigkeit im ungefestigten und gefestigten Zustand beim Rühthener Grünsandstein	93
Abbildung 5.20:	Korrelation zwischen Biegezugfestigkeit und Schallgeschwindigkeit bei Mörteln	94
Abbildung 5.21:	Korrelation zwischen Biegezugfestigkeit und Schallgeschwindigkeit beim Obernkirchener Sandstein.....	95
Abbildung 5.22:	Korrelation zwischen Biegezugfestigkeit und Schallgeschwindigkeit beim roten Wesersandstein	96
Abbildung 5.23:	Korrelation zwischen Biegezugfestigkeit und Schallgeschwindigkeit beim Rühthener Grünsandstein	97
Abbildung 5.24:	Korrelation zwischen Druckfestigkeit und dynamischem E-Modul bei fabrikneuen Ziegeln	98
Abbildung 5.25:	Korrelation zwischen Druckfestigkeit und dynamischem E-Modul bei historischen Ziegeln	99
Abbildung 5.26:	Korrelation zwischen Druckfestigkeit und dynamischem E-Modul bei Mörtelprismen.....	100
Abbildung 5.27:	Korrelation zwischen Druckfestigkeit und dynamischem E-Modul beim Rühthener Grünsandstein	100

Abbildung 5.28: Korrelation zwischen statischem und dynamischem E-Modul beim Obernkirchener Sandstein	102
Abbildung 5.29: Korrelation zwischen statischem und dynamischem E-Modul beim roten Wesersandstein.....	103
Abbildung 5.30: Korrelation zwischen statischem und dynamischem E-Modul beim Rühthener Grünsandstein.....	104
Abbildung 5.31: Korrelation zwischen Schallgeschwindigkeit und Rohdichte bei fabrikneuen Ziegeln	105
Abbildung 5.32: Korrelation zwischen Schallgeschwindigkeit und Rohdichte bei historischen Ziegeln.....	105
Abbildung 5.33: Korrelation zwischen Schallgeschwindigkeit und Rohdichte bei Mörteln.....	106
Abbildung 5.34: Korrelation zwischen Schallgeschwindigkeit und Rohdichte beim Obernkirchener Sandstein	106
Abbildung 5.35: Korrelation zwischen Schallgeschwindigkeit und Rohdichte beim roten Wesersandstein.....	107
Abbildung 5.36: Korrelation zwischen Schallgeschwindigkeit und Rohdichte beim Rühthener Grünsandstein.....	107
Abbildung 6.1: Querschnitt des numerisch untersuchten fünf-schichtigen Mauerwerkskörpers mit dargestellter Elementstruktur	110
Abbildung 6.2: Horizontalspannungen σ_y im mittleren Bereich eines fünf-schichtigen RILEM-Körpers aus Obernkirchener Sandstein	115
Abbildung 6.3: Horizontalspannungen σ_y im mittleren Bereich eines fünf-schichtigen RILEM-Körpers aus rotem Wesersandstein.....	115
Abbildung 6.4: Horizontalspannungen σ_y im mittleren Bereich eines fünf-schichtigen RILEM-Körpers aus Rühthener Grünsandstein.....	116
Abbildung 6.5: Horizontalspannungen σ_y im mittleren Bereich eines fünf-schichtigen RILEM-Körpers aus fabrikneuen Ziegeln	116
Abbildung 6.6: Horizontalspannungen σ_y im mittleren Bereich eines fünf-schichtigen RILEM-Körpers aus fabrikneuen Ziegeln	117
Abbildung 6.7: Schnitte der numerisch untersuchten fünf-schichtigen Mauerwerkskörper	117
Abbildung 6.8: Horizontalspannungen σ_y in den Achsen A – A (Stein) und B – B (Mörtel) an Mauerwerkskörpern aus Obernkirchener Sandstein	118
Abbildung 6.9: Horizontalspannungen σ_y in den Achsen A – A (Stein) und B - B (Mörtel) an Mauerwerkskörpern aus fabrikneuen Ziegeln.....	118

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Überblick und Bewertung von Sicherungsmethoden [42].....	10
Tabelle 2.2:	Übersicht über mögliche Verfahren zur Erkundung von Mauergefüge und Festigkeit.....	17
Tabelle 3.1:	Überblick über die untersuchten Sandsteinarten.....	31
Tabelle 3.2:	Überblick durchgeführter Versuche an Einzelprüfkörpern.....	37
Tabelle 3.3:	Anzahl der RILEM-Körper für die Druckfestigkeitsprüfung sowie E-Modul Bestimmung.....	39
Tabelle 4.1:	Ultraschalllaufzeit bei lufttrockenen und wassergesättigten Proben (Mittelwerte aus 3 Einzelmessungen).....	41
Tabelle 4.2:	Ultraschalllaufzeit und Resonanzfrequenz in Abhängigkeit der Schichtungsrichtung (Mittelwerte aus 3 Einzelmessungen).....	42
Tabelle 4.3:	Einfluß von Rissen auf die Ultraschalllaufzeit (Mittelwerte aus 3 Einzelmessungen).....	43
Tabelle 4.4:	Aufnahme Festiger und Gelabscheidung, fabrikneue und historische Ziegel mehrfach mit "S" bzw. "T" behandelt.....	44
Tabelle 4.5:	Rohdichten und Druckfestigkeiten, fabrikneue und historische Ziegel mehrfach mit "S" bzw. "T" behandelt.....	45
Tabelle 4.6:	Ultraschallgeschwindigkeit und dynamischer E-Modul, fabrikneue und historische Ziegel, mehrfach mit "S" bzw. "T" behandelt.....	47
Tabelle 4.7:	Dichte, Gesamtporosität, Trockenrohddichte und Wasseraufnahme, fabrikneue und historische Ziegel.....	48
Tabelle 4.8:	Verhalten der Ziegel beim Frost-Tau-Wechsel Versuch (maximal 70 Zyklen).....	49
Tabelle 4.9:	Wasseraufnahme und Ultraschallgeschwindigkeit bei Ziegeln vor und nach 70 Frost-Tau-Wechseln.....	50
Tabelle 4.10:	Masseverlust nach 70 Frost-Tau-Wechseln bei Ziegeln.....	50
Tabelle 4.11:	Aufnahme Festiger und Gelabscheidung, Sandsteine mehrfach mit "S" bzw. "T" behandelt.....	51
Tabelle 4.12:	Rohddichte der Sandsteine mehrfach mit "S" bzw. "T" behandelt.....	54
Tabelle 4.13:	Druckfestigkeit längs und quer zur Schichtung, Sandsteine mehrfach mit "S" bzw. "T" behandelt.....	55
Tabelle 4.14:	Biegezugfestigkeit längs und quer zur Schichtung, Sandsteine mehrfach mit "S" bzw. "T" behandelt.....	55
Tabelle 4.15:	Ultraschallgeschwindigkeit bei Sandsteinen längs und quer zur Schichtung.....	56
Tabelle 4.16:	Dynamischer E-Modul ermittelt bei Sandsteinen mittels Ultraschalllaufzeit längs und quer zur Schichtung – Mittelwerte-.....	57
Tabelle 4.17:	Statischer E-Modul längs und quer zur Schichtung dreier Sandsteine...58	58
Tabelle 4.18:	Dichte, Gesamtporosität, Trockenrohddichte, Wasseraufnahme dreier Sandsteine.....	59
Tabelle 4.19:	Verwitterungsverhalten der Sandsteine beim Frost-Tau-Wechsel Versuch (maximal 70 Zyklen).....	60
Tabelle 4.20:	Wasseraufnahme und Ultraschallgeschwindigkeit bei drei Sandsteinen vor und nach 70 Frost-Tau-Wechseln.....	61
Tabelle 4.21:	Masseverlust nach 70 Frost-Tau-Wechseln bei drei Sandsteinen.....	61
Tabelle 4.22:	Festigeraufnahme und Gelabscheidung des Mörtels.....	62

Tabelle 4.23: Rohdichte (lufttrocken) des Mörtels, mehrfach mit "S" bzw. "T" behandelt	63
Tabelle 4.24: Biegezug- und Druckfestigkeit des Mörtels, mehrfach mit "S" bzw. "T" behandelt	63
Tabelle 4.25: Ultraschallgeschwindigkeit und dynamischer E-Modul des Mörtels, ermittelt aus der Schalllaufzeit (Mittelwerte)	64
Tabelle 4.26: Trockenrohichte und Wasseraufnahme des Mörtels	64
Tabelle 4.27: Verhalten des Mörtels beim Frost-Tau-Wechsel Versuch (maximal 70 Zyklen).....	65
Tabelle 5.1: Aufnahme Festiger "S" bzw. "T" bei Mehrfachtränkung (Mittelwerte).....	69
Tabelle 5.2: Koeffizienten zur Bestimmung der Festigkeit der RILEM-Körper gemäß Gleichung (2.1).....	80
Tabelle 5.3: Einfluß der Festigung auf die Verformungsmoduli E_{stat}	86
Tabelle 6.1: Zusammenstellung der mit FEM ermittelten bezogenen maximalen Horizontalspannung im Stein bei Variation der Verformungskennwerte von Mörtel und Stein.....	113

Verzeichnis der Anhänge

Anhang 3.1:	Biegezug- und Druckfestigkeiten bei unterschiedlichen Mischungsverhältnissen bei Mörteln	133
Anhang 3.2:	Versuchsergebnisse zum Mischungsverhältnis Wasser : Steinfestiger "T"	134 - 136
Anhang 4.1:	Druckfestigkeiten an Würfeln bei Sandsteinen	137
Anhang 4.2:	Dynamischer E-Modul ermittelt aus Resonanzfrequenz bei Sandsteinen und Mörteln	138 - 139
Anhang 4.3:	Elastische Querdehnzahl μ ermittelt aus Resonanzfrequenz bei Sandsteinen bzw. Mörteln	140 - 141
Anhang 4.4:	Versuchsergebnisse der Druckfestigkeits- und Verformungsprüfungen bei RILEM-Körpern aus Ziegeln bzw. Sandsteinen	142 - 148
Anhang 4.5:	Spannungs-Dehnungs-Linien der RILEM-Körper aus Ziegeln bzw. Sandsteinen	149 - 161
Anhang 5.1:	Ermittlung der Regressionskoeffizienten der im Versuch ermittelten Spannungs-Dehnungs-Linien der RILEM-Körper aus Ziegeln bzw. Sandsteinen	162 - 168

Verzeichnis der Abkürzungen

Kurzzeichen	Einheit	Bedeutung
Allgemein		
F	kN	Kraft
E	N/mm ²	Sekantenmodul bei einem Drittel der maximalen Druckspannung des σ - ε -Diagrammes
E _{dyn}	N/mm ²	Dynamischer Elastizitätsmodul
E _s	N/mm ²	Dynamischer Elastizitätsmodul ermittelt aus Ultraschalllaufzeit
E _r	N/mm ²	Dynamischer Elastizitätsmodul ermittelt aus Resonanzfrequenz
E _{stat}	N/mm ²	Statischer Elastizitätsmodul ermittelt an Prismen
G	N/mm ²	Schubmodul
m	g, kg	Masse
MG	-	Mörtelgruppe
S	-	Steinfestiger S
T	-	Steinfestiger T
max		Größtwert
min		Kleinstwert
t		Zeit
β_D	N/mm ²	Druckfestigkeit
β_{bz}	N/mm ²	Biegezugfestigkeit
β_{mw}	N/mm ²	Druckfestigkeit des Mauerwerks
$\beta_{Ri\beta}$	N/mm ²	Druckfestigkeit des RILEM-Körpers beim ersten Riß
ε	mm/m, ‰	Dehnung
ε_l	mm/m, ‰	Längsdehnung
ε_q	mm/m, ‰	Querdehnung
μ	-	Querdehnzahl
ρ	kg/dm ³	Rohdichte
σ	N/mm ²	Spannung
F _c	N, kN	Höchstlast im Bruchzustand
F _f	N, kN	auf die Mitte des Prismas aufgebrachte Bruchlast
γ	kN/m ³	spezifisches Gewicht

Kurzzeichen	Einheit	Bedeutung
Allgemein		
v	km/s	Ultraschallaufzeitgeschwindigkeit
v _L	km/s	Longitudinalwellengeschwindigkeit
v _D	km/s	Dehnwellengeschwindigkeit
f	KHz, MHz	Frequenz
λ	m	Wellenlänge
VMz	-	Vormauer-Vollziegel nach DIN 105
Statistik		
n	-	Anzahl der Werte; Stichprobenumfang
x	(wie Einzelwert)	Mittelwert
s	(wie Einzelwert)	Standardabweichung einer Stichprobe
V	%	(s/x) · 100; Variationskoeffizient
r	-	Korrelationskoeffizient
r ²	-	Bestimmtheitsmaß
a,b,c	-	Koeffizienten bei Ausgleichsrechnungen
Indizes		
Index		Bedeutung
dyn		dynamisch
l		längs
mö		Mörtel
mw		Mauerwerk
q		quer
st		Stein
stat		statisch
w		Wand

1 Einführung und Zielsetzung

Der Mauerwerksbau hat eine jahrhundertealte Tradition. In früheren Zeiten wurde Mauerwerk nach handwerklichen Regeln ausgeführt, Steinformat und Wanddicke richteten sich nach der geschätzten Beanspruchung [113].

Erste analytische Betrachtungen zum Bruchmechanismus von Mauerwerk wurden 1965 von *Hilsdorf* [56] ausgearbeitet. Durch zahlreiche Forschungsarbeiten in den vergangenen Jahrzehnten wurden die Kenntnisse über das Tragverhalten von Mauerwerk ständig erweitert.

Die Sicherung und der Erhalt von historischen Bauwerken ist aufgrund fortschreitenden Verfalls von besonderer Bedeutung. Tragende Bauteile historischer Bauten wie z.B. Wände oder Pfeiler bestehen zum überwiegenden Teil aus Naturstein- oder Ziegelmauerwerk. Die Kenntnis über die Tragfähigkeit des bestehenden Mauerwerks, insbesondere die einachsige Druckfestigkeit, ist für die Sicherung und den Umbau alter Bausubstanz unerlässlich.

Anlaß für Sanierungen oder Sicherungsarbeiten an Mauerwerksbauten geben z.B. auftretende Schäden und/oder Nutzungsänderungen mit Lastumlagerungen bzw. -erhöhungen. Vor jeder Sanierungsmaßnahme ist die Feststellung des Ist-Zustandes von großer Bedeutung. *Nodoushani* [91] weist eindringlich darauf hin, daß die qualifizierte Planung eines Sanierungskonzeptes nur möglich ist, wenn eine sorgfältige Bestandsaufnahme und Schadensanalyse durchgeführt wurde. *Pieper* [93] hat die Grundzüge der Arbeitsabschnitte der Bauwerkssanierung anschaulich in 3 Gebiete unterteilt:

- Anamnese
- Diagnose
- Therapie.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die „Therapie“ bestehender Mauerwerkskonstruktionen hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit. Über die Wirkung von 2 unterschiedlichen Steinfestigungsmitteln auf die nachträgliche Erhöhung der Tragfähigkeit von zentrisch gedrückten Mauerwerksbauten soll im folgenden berichtet werden. Die beiden Steinfestigungsmittel unterscheiden sich hinsichtlich ihrer stofflichen Zusammensetzung. Als Steinmaterial wurden unterschiedliche Sorten von Sandsteinen sowie Mauerziegel aus Abbruchobjekten und fabrikneue Ziegel verwendet.

Die Wirkungsweise von Steinfestigungsmitteln ist schon in mehreren Forschungsvorhaben z.B. [7], [47], [48], [49], [59], [102] untersucht worden. Die bisher bekannten Untersuchungen beziehen sich jedoch in erster Linie auf die Wirkung und Dauerhaftigkeit von Steinfestigungsmitteln in Hinblick auf die Verwitterungsbeständigkeit. Zur Erhaltung historisch wertvoller Bausubstanz (z.B. Konservierung von Steindenkmälern, Fassaden) werden Steinfestigungsmittel schon seit Jahren erfolgreich eingesetzt.

Für den Bauingenieur steht die Tragfähigkeit lastableitender Bauteile, sowie deren innerer Spannungszustand im Vordergrund. Die festigende Wirkung der Steinfestiger in Bezug auf die Standsicherheit eines Bauteiles soll deswegen im folgenden untersucht werden.

Bei der Erforschung der Wirkungsweise beider Steinfestiger auf die Tragfähigkeit von Mauerwerkskonstruktionen sollen zerstörungsfreie bzw. -arme Prüfungsmethoden im Vordergrund stehen. Insbesondere werden hier die Ultraschallmessung und die Messung der Resonanzfrequenz zur Bestimmung unterschiedlicher Eigenschaftswerte untersucht.

2 Stand der Forschung

2.1 Literatursichtung und -auswertung

2.1.1 Bruchmechanismus und Tragverhalten von Mauerwerk

2.1.1.1 Allgemeines

Von *Hilsdorf* 1965 [56] erstmalig zur Diskussion gestellte Betrachtungen zum Bruchmechanismus von Mauerwerk wurden in zahlreichen Untersuchungen z.B. von *Probst* [96], *Kirtschig* [69], *Khoo, C. L.*, *Hendry, A. W.* [63], *Mann* [76], *Alfes* [4], im Laufe der Jahre erweitert.

Mauerwerk ist ein Verbundwerkstoff bestehend aus den Einzelkomponenten Stein und Mörtel. Stein und Mörtel unterscheiden sich nicht nur hinsichtlich ihrer Festigkeitseigenschaften, sondern auch hinsichtlich ihres Verformungsverhaltens.

Infolge einer vertikalen Belastung stellen sich im Mauerwerkskörper Verformungen *in* Lastrichtung und *senkrecht* dazu ein. Die Querdehnfähigkeit des Mörtels ist im allgemeinen größer als jene des Steines. Eine unbehinderte Mörtelverformung wird durch den Haftverbund zwischen Stein und Mörtel beeinträchtigt. Infolge der Querdehnungsbehinderung des Mörtels wird dieser einer Druckspannung, der Stein einer Zugspannung senkrecht zur Belastung ausgesetzt. Der so entstehende innere Spannungszustand führt zu einer dreiachsigen Druckspannung im Mörtel, sowie einachsigen Druck und zweiachsigen Querzug im Stein (Abbildung 2.1).

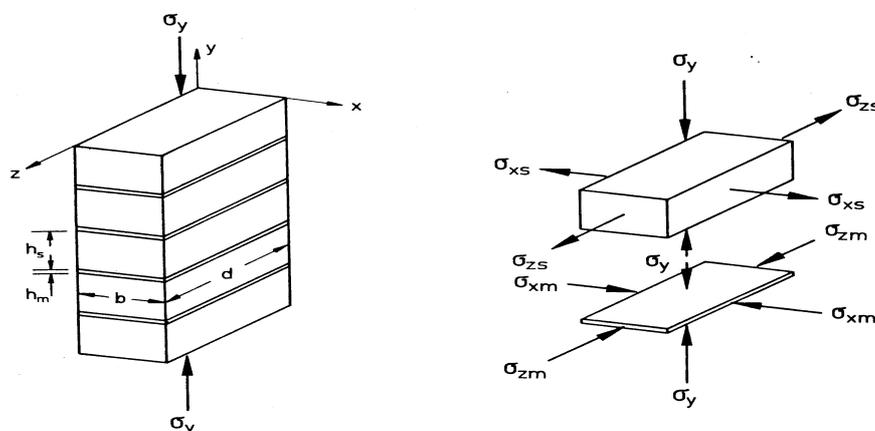


Abbildung 2.1: Stein- und Mörtelspannungen infolge einachsiger Druckbelastung

Beim Überschreiten der Zugfestigkeit der Steine, die nur etwa 2% - 8% der Steindruckfestigkeit beträgt, wird das Versagen des Mauerwerks durch Reißen der Steine in Richtung der aufgebrachten Normalkraft eingeleitet. Die logische Folgerung ist, daß nicht die Druckfestigkeit sondern die Zugfestigkeit die charakterisierende Größe der Steine im Mauerwerk darstellt.

Kasten [62] stellte Überlegungen an, nicht die Druckfestigkeit der Steine zur Bestimmung der Mauerwerksdruckfestigkeit anzusetzen, sondern deren Spaltzugfestigkeit. Der empirisch ermittelte Zusammenhang zwischen der Spaltzugfestigkeit der Steine und der Mauerwerksfestigkeit führten jedoch zu keinem befriedigenden Ergebnis.

Die Kombinationsmöglichkeit 'weicher' Stein, 'harter' Mörtel (z.B. Porenbetonstein/Mörtelgruppe III) führt zum Aufreißen des Lagerfugenmörtels und zur dreiachsigen Druckbeanspruchung der Steine.

Nach heutigem Kenntnisstand ist die charakterisierende Größe für das Tragverhalten von Mauerwerk das Querverformungsverhalten von Stein und Mörtel [10], [11], [13], [68], [69]. Bei Steinen mit hoher Festigkeit und „weicher“ werdenden Mörteln (kleiner Querdehnungsmodul) wurden in Versuchen von *Kirtschig* [69] erhebliche Abfälle der Mauerwerksfestigkeit erkennbar.

In DIN 18555 Teil 4 [24] ist ein Prüfverfahren zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Mörteln angegeben. Ein entsprechendes Prüfverfahren für Steine gibt es bis heute nicht. *Kirtschig* [69] stellte anhand zahlreicher Untersuchungen fest, daß eine Korrelation zwischen Querdehnungsmodul (definiert als Elastizitätsmodul quer zur Belastungsrichtung gemessen über die Wanddicke) der Steine und deren Festigkeit besteht, weist aber darauf hin, daß der Querdehnungsmodul der Steine experimentell eine nicht leicht zu bestimmende Größe ist, die darüber hinaus großen Schwankungen unterliegt.

Wenn auch die unterschiedlichen Verformungseigenschaften von Stein und Mörtel das Tragverhalten von Mauerwerk unter vertikaler Auflast prägen, so sind diese bisher nur indirekt in die Norm [21] eingeflossen.

Die Mauerwerksdruckfestigkeit wird über die Druckfestigkeit der Ausgangsstoffe Stein und Mörtel bestimmt, da die Bestimmung dieser Kenngrößen weit weniger aufwendig ist, als die Bestimmung des Querverformungsverhaltens. In DIN 1053 - 1 [21], Tabellen 4a-c, sind die Grundwerte der zulässigen Druckspannungen für Mauerwerk in Abhängigkeit von der Steinfestigkeitsklasse und der Mörtelgruppe angegeben.

Sind Stein und Mörtelfestigkeiten bekannt, so kann die Mauerwerksfestigkeit auch nach folgender empirischer Formel abgeschätzt werden:

$$\beta_{D,mw} [\text{N/mm}^2] = a \cdot \beta_{D,st}^b \cdot \beta_{D,m\ddot{o}}^c \quad (2.1)$$

mit

$\beta_{D,st}$ [N/mm²] mittlere Steinfestigkeit nach Normprüfung

$\beta_{D,m\ddot{o}}$ [N/mm²] mittlere Mörtelfestigkeit nach Normprüfung

a,b,c [-] Regressionskoeffizienten

Der Faktor a und die Exponenten b und c unterscheiden sich je nach Steinart und verwendetem Mörtel. Der häufig angewendete Ansatz von *Mann* [77] bezieht sich im wesentlichen auf Auswertergebnisse von *Kirtschig* und *Kasten* [65]. Auch *Metje* [86] ermittelte die Regressionskoeffizienten a, b und c in zahlreichen Versuchen. Für Mauerwerksprüfkörper aus künstlichen Steinen und Normalmauermörtel der Schlankheit h/d=5 ermittelten *Mann* [77] und *Metje* [86] die Variablen a, b und c für

alle Steinarten zu:

$$\beta_{D,mw} = 0,83 \cdot \beta_{D,st}^{0,66} \cdot \beta_{D,m\ddot{o}}^{0,18} \quad (\text{Mann [77]}) \quad (2.1a)$$

und

$$\beta_{D,mw} = 0,77 \cdot \beta_{D,st}^{0,69} \cdot \beta_{D,m\ddot{o}}^{0,19} \quad (\text{Metje [86]}) \quad (2.1b)$$

Vollziegel

$$\beta_{D,mw} = 0,75 \cdot \beta_{D,st}^{0,55} \cdot \beta_{D,m\ddot{o}}^{0,26} \quad (\text{Metje [86]}) \quad (2.1c)$$

Der Grundwert der zulässigen Druckspannung errechnet sich dann bei einem Sicherheitsbeiwert von $\gamma = 3,0$ zu: $\text{zul } \sigma = \beta_{D,mw} / 3$.

Zur Erhöhung der Aussagegenauigkeit empfiehlt es sich, die für die jeweilige Stein-Mörtel-Kombination angegebenen Regressionskoeffizienten in z.B. [77] bzw. [86] anzusetzen (Regressionskoeffizienten in Abhängigkeit der Steinart).

Gleichung (2.1) ist auch die Grundgleichung zur Bestimmung der charakteristischen Druckfestigkeit von Mauerwerk nach EC 6 [35].

$$F_k = k \cdot f_b^{0,65} \cdot f_m^{0,25} \quad (2.2)$$

mit

f_k [N/mm²] charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeit

f_b [N/mm²] normierte Mauersteinfestigkeit

f_m [N/mm²] Mörteldruckfestigkeit

k [-] Festwert (für Einsteinmauerwerk und Vollziegel = 0,6)

Bemessungsdruckfestigkeit $f_d = f_k / \gamma_m$, mit Teilsicherheitsbeiwert γ_m zwischen 1,7 und 3,0 je nach Kategorie der Ausführung (EC 6, Tab.2.3)

Gleichungen (2.1a - c) und (2.2) zeigen, daß die Mauerwerksfestigkeit rechnerisch durch die Druckfestigkeit von Stein und Mörtel bestimmt wird.

Das Tragverhalten von Mauerwerk wird über die Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Stein und Mörtel hinaus noch von weiteren wichtigen Parametern beeinflusst:

- Schlankheit der Wand [53]
- Halterung (Aussteifung) der Wand [6]
- Art des Verbandes [67]
- Güte der Ausführung [88]
- Streubreite von Stein- und Mörtelqualität [46]
- Steinformat [104]
- Steinfeuchte [64], [86]
- Verhältnis von Fugendicke zu Steinhöhe [95], [96].

Im Rahmen dieser Arbeit werden Untersuchungen an Mauerwerk aus historischen Abbruchziegeln, fabrikneuen Ziegeln und Natursteinmauerwerk durchgeführt. Auf die Besonderheiten des Tragverhaltens von Mauerwerk aus historischen Ziegeln und Mauerwerk aus Sandsteinen wird im folgenden genauer eingegangen.

2.1.1.2 Mauerwerk aus historischen Ziegeln

Bei der Planung von Sanierungen und Umnutzungen historischer Bauten stellt sich häufig die Frage nach der Tragfähigkeit vorhandenen Mauerwerks. Dem Kennwert der Mauerwerksdruckfestigkeit kommt hierbei eine zentrale Bedeutung zu. Bei der Untersuchung der Tragfähigkeit sind bei historischem Mauerwerk gegenüber „modernem“ Mauerwerk einige Besonderheiten zu berücksichtigen.

Die Streuung der mechanischen Eigenschaften der Einzelkomponenten Stein und Mörtel ist bei historischem Mauerwerk häufig groß. Von *Franke* und *Herrmann* wurden Verformungs- und Festigkeitskennwerte an historischen Ziegeln untersucht [45]. Die untersuchten historischen Ziegel wiesen Streubreiten ausgedrückt als Abstand der 5% Fraktile zum Mittelwert, bezogen auf den Mittelwert, $[\beta_{D,st} - \beta_{D,st(5\%)}] / \beta_{D,st}$ - von zum Teil über 70% auf; „moderne“ Steine waren durch Streubreiten bis etwa 20% gekennzeichnet.

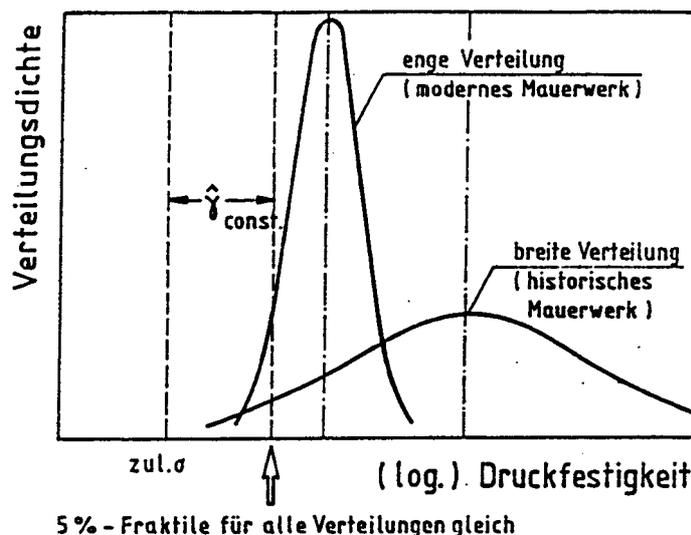


Abbildung 2.2: „Moderne“ und „historische“ Dichtefunktionen der Steindruckfestigkeiten bei gleicher Steinnennfestigkeit [46]

Franke, Deckelmann und Goretzky [46] sind der Frage des Einflusses der Streubreiten von Stein- und Mörtelqualität bei der Festigkeitsbestimmung, insbesondere von historischen Mauerwerksbauten, nachgegangen. Im Rahmen eines Forschungsprojektes [46] wurden insgesamt 45 RILEM-Körper auf ihre Tragfähigkeit geprüft. Die Streuung der Festigkeiten der Einzelsteine der RILEM-Körper wurde möglichst groß gehalten, um ein auf die Streuung zurückführbares unterschiedliches Tragverhalten deutlich zeigen zu können. Zum Vergleich wurden auch RILEM-Körper mit enger bzw. mittlerer Streuung der Steine hergestellt.

Zusammenfassend wurde festgestellt, daß die empirische Formel nach Mann (hier Gl. 2.1a) in vielen Fällen eine ausreichende Genauigkeit für die Bestimmung der Mauerwerkstragfähigkeit bietet. Lediglich für große Streuungen (>40%) der Steinfestigkeiten werden mittels der Formel nach Mann auf der unsicheren Seite liegende Tragfähigkeiten vorhergesagt.

Die Verfasser [46] weisen abschließend darauf hin, daß die Fragestellung offen bleibt, welche Grenzen sich für den Rückschluß von einem Kleinkörper auf große Wandabschnitte auf tun.

Die mechanischen Eigenschaften der Mauerziegel werden von deren Herstellung stark beeinflusst. Egermann und Mayer [37] führten zahlreiche Versuche durch, um die Auswirkung des Einflusses der Produktionstechnik von Mauerziegeln im Hinblick auf Festigkeits- und Verformungseigenschaften, deren Richtungsunterschiede und Streuungen, festzustellen. Dabei wird insbesondere auf die Entwicklung der Formgebungsmethoden und Brenntechniken eingegangen.

Die Untersuchungen [37] ergaben, daß der Wandel in der Brenntechnik (zwischen 1820 und 1840) die Streuungen der mechanischen Eigenschaften reduzierte, während sich durch eine neue Formgebungstechnik (Übergang vom Streichverfahren zur Preßtechnik ab 1854) wichtige Kenngrößen grundlegend veränderten. Die Druckfestigkeit des Mauerziegels, die Spaltzugfestigkeit und der E-Modul verdoppelten sich durch das Strangpressverfahren (Druckfestigkeit stranggepresste Ziegel i. M.: 32 N/mm², handgestrichene Ziegel i.M. 16 N/mm²). Darüber hinaus reduzierten sich die Streuungen der Werte für die Druckfestigkeit um ein Drittel.

Die Kenntnis des Baujahres ist also ein wichtiger Anhaltspunkt bei der Beurteilung der Tragfähigkeit von historischem Ziegelmauerwerk.

Für Mauerwerk aus Vollziegeln und Normalmauermörtel, ermittelt an Prüfkörpern der Schlankheit $h/d = 5$, kann zur Abschätzung der Mauerwerkstragfähigkeit nach Gleichung (2.1c) von *Metje* [86], folgende Formel angenommen werden:

$$\beta_{D,mw} = 0,75 \cdot \beta_{D,st}^{0,55} \cdot \beta_{D,mö}^{0,26} \quad (2.3)$$

Schubert gibt in [109] folgenden Rechenansatz für Mauerwerk aus Vollziegeln und Normalmauermörtel an, jedoch ermittelt an Prüfkörpern der Schlankheit $h/d = 10$:

$$\beta_{D,mw} = 0,73 \cdot \beta_{D,st}^{0,73} \cdot \beta_{D,mö}^{0,16} \quad (2.4)$$

mit

$\beta_{D,mw}$	[N/mm ²]	Mauerwerksdruckfestigkeit
$\beta_{D,st}$	[N/mm ²]	mittlere Steinfestigkeit nach Normprüfung
$\beta_{D,mö}$	[N/mm ²]	mittlere Mörtelfestigkeit nach Normprüfung

2.1.1.3 Mauerwerk aus Natursteinen

Die Zahl der Veröffentlichungen über die Tragfähigkeit von Natursteinmauerwerk ist im Gegensatz zu Veröffentlichungen über die Tragfähigkeit von Mauerwerk aus künstlichen Steinen vergleichsweise gering. Tragendes Natursteinmauerwerk ist heute für Neubauten nur noch von untergeordneter Bedeutung. Bei der Sanierung und beim Umbau von alten Bauwerken trifft man jedoch häufig auf Natursteinmauerwerk. Dabei gehören die Sandsteine zu den wichtigsten Natursteinen, die als tragende Natursteine verbaut sind [3].

Im Gegensatz zu Mauerwerk aus künstlichen Steinen treten bei Natursteinmauerwerk folgende Besonderheiten auf [87], [100], [116]:

- mittlere Lagerfugendicke schwankt zwischen 1,0 und 3,5 cm
- Fugenneigung von 0 - 9°, in Ausnahmefällen bis 20°
- geringe Mörtelfestigkeiten
- größere Streuungen der Steinfestigkeiten
- unterschiedliche Steinformen.

Erste theoretische Ansätze zum Tragverhalten von Natursteinmauerwerk von *Mann* [78], *Rustmeier* [99], *Stiglat* [112] entstanden aus der Fragestellung nach der Beurteilung der Tragfähigkeit alten Mauerwerks. Die Untersuchungen von einschaligem Bruchsteinmauerwerk ergaben, daß in Abhängigkeit von Stein und Mörtel, der Fugenform- und dicke in den meisten Fällen die Mörtelfestigkeit für die Druckfestigkeit des Mauerwerks maßgebend wird. Die Zugfestigkeit natürlicher Steine im Mauerwerk wird nur im Ausnahmefall überschritten. In der Regel verliert Mauerwerk aus natürlichen Steinen seine Festigkeit durch Versagen der Mörtelfugen und damit durch Verlust des Verbandes [78].

Von *Mann* [78] und *Rustmeier* [99] wurde eine rechnerische Versagenstheorie für Bruchsteinmauerwerk entwickelt, die darauf beruht, daß nur derjenige Teil einer Mörtelfuge, der oben und unten durch Steine begrenzt ist, die aus der Auflast entstehenden Kräfte überträgt. Dieser Teil wird als Übertragungsfläche F^{\cdot} bezeichnet. Das Verhältnis der Summe aller Übertragungsflächen F^{\cdot} zur Fläche des Wandquerschnittes F wird der Übertragungsfaktor $\ddot{u} = F^{\cdot}/F$ genannt.

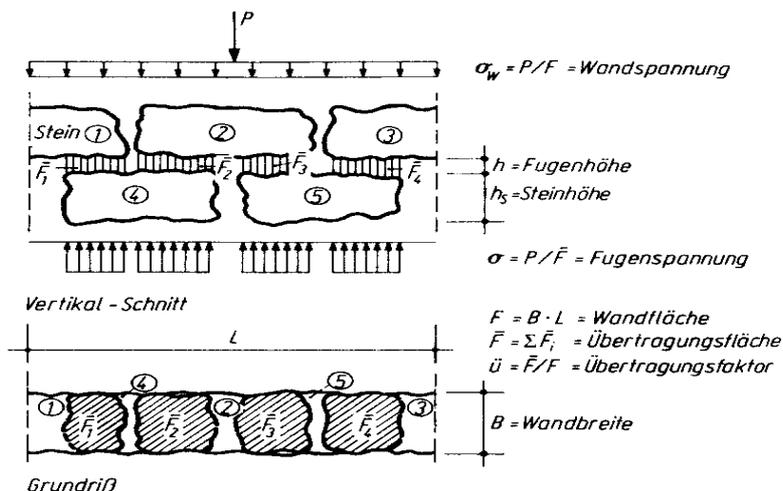


Abbildung 2.3: Modell der Kraftübertragung in Bruchsteinmauerwerk [78]

Unter Berücksichtigung unterschiedlich dicker und geneigter Fugen gibt Mann [78] die Wandfestigkeit von Bruchsteinmauerwerk wie folgt an:

$$\beta_{D,mw} = \beta_{D,m\ddot{o}} \cdot \bar{u} \cdot \beta_x / \beta_{D,m\ddot{o}} \quad (2.5)$$

mit

- $\beta_{D,mw}$ [N/mm²] Wandfestigkeit von Bruchsteinmauerwerk
- $\beta_{D,m\ddot{o}}$ [N/mm²] Mörtelfestigkeit bei Prüfkörpern h/d = 1
- \bar{u} [-] Übertragungsfaktor \bar{F}/F
- $\beta_x / \beta_{D,m\ddot{o}}$ [-] Formfaktor f der Mörtelfugen

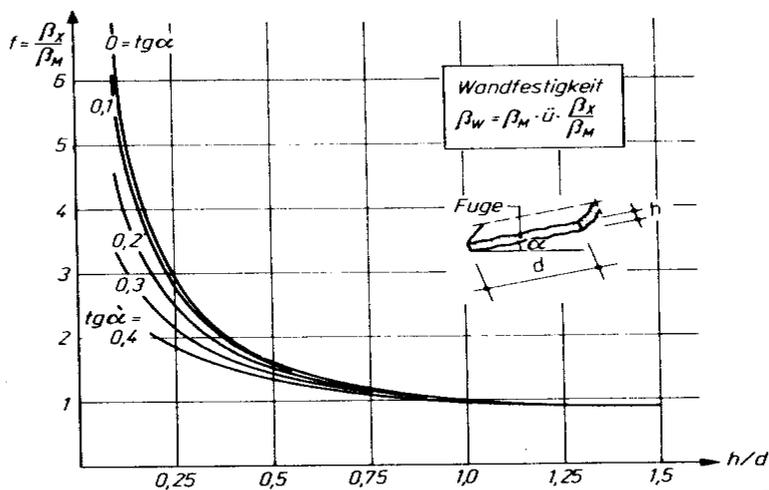


Abbildung 2.4: Formfaktor f der Mörtelfugen in Abhängigkeit von der Fugeneigung α und dem Verhältnis Höhe/Länge (h/d) der wirksamen Fuge [78]

Die vorstehenden Untersuchungsergebnisse sind in der DIN 1053 – 1 [21], Abschnitt 12 Natursteinmauerwerk, berücksichtigt worden.

Einen wesentlich einfacheren Ansatz zur Bestimmung der Tragfähigkeit von bestehendem einschaligen Bruchsteinmauerwerk gibt Stiglat [112] an:

- für Mörtelgruppe III:

$$\beta_{D,mw} [\text{N/mm}^2] \approx 0,12 \beta_{DS10} \quad (2.6)$$

- für Mörtelgruppe II:

$$\beta_{D,mw} [\text{N/mm}^2] \approx 0,7 \cdot 0,12 \beta_{DS10} \quad (2.7)$$

- für Mörtelgruppe I:

$$\beta_{D,mw} [\text{N/mm}^2] \approx 0,3 \cdot 0,12 \beta_{DS10} \quad (2.8)$$

mit

$$\beta_{DS10} [\text{N/mm}^2] = 18,7 \cdot \gamma - 355,2$$

γ [kN/m³] spezifisches Gewicht

β_{DS10} [N/mm²] Druckfestigkeit an Würfeln oder Zylindern mit $h/d \approx 1,0$, bestimmt aus der Korrelation zum spezifischen Gewicht, die von 90% der Steine erreicht bzw. überschritten wurde.

In neueren Forschungsarbeiten sind von *Berndt* und *Schöne* [11], [13], [14] auf der Grundlage von experimentellen Untersuchungen Bemessungsansätze für einschaliges Quader- oder Schichtenmauerwerk aus Naturstein sowie für übliches einschaliges Mauerwerk aus künstlichen Steinen entwickelt worden.

Aus zahlreichen Versuchen zur Bestimmung der Druckfestigkeit von Mauerwerk aus Elbesandstein ermittelte *Berndt* [13] den folgenden rechnerischen Ansatz :

$$\beta_{D,mw} = \beta_{D,st} / (k_{\sigma} \cdot \beta_{D,st} / \beta_{Z,st} + 0,7) \approx \beta_{Z,st} / k_{\sigma} \quad (2.9)$$

mit

$$k_{\sigma} [-] \quad t/h \cdot \bar{m}_{m\ddot{o}} / (1 - \bar{m}_{m\ddot{o}}) + k_1 \cdot d^{\prime} / d \cdot d/h$$

$$k_1 [-] \quad 0,3$$

$\beta_{D,mw}$ [N/mm²] Mauerwerksdruckfestigkeit

$\beta_{D,st}$ [N/mm²] Steindruckfestigkeit ermittelt an Würfeln mit Kantenlängen von 6 oder 10 cm oder an Bohrkernen \varnothing 6 bis 10 cm mit $h/d = 1$

$\beta_{Z,st}$ [N/mm²] Querkzugfestigkeit des Steins bestimmt durch die Spaltzugfestigkeit an Prismen 6x6x10 oder Bohrkernen \varnothing 6 bis 10 cm in Analogie zur DIN 1048, Teil 5

t [mm] Fugendicke

d [mm] Steinlänge

d^{\prime} [mm] Summe der beidseitig ausgebröckelten Fugenbereiche

h [mm] Steinhöhe

h^{\prime} [mm] rechnerisch mitwirkende Steinhöhe,

h^{\prime} [mm] 10 cm bzw. h_{Stein} , der kleinere Wert ist maßgebend

$\bar{m}_{m\ddot{o}}$ [-] der Übergang der Querdehnzahl $\mu_{m\ddot{o}}$ in den Wert $\bar{m}_{m\ddot{o}}$ beschreibt das Fließverhalten des Mörtels unter zunehmender mehrachsiger Druckbeanspruchung

$\bar{m}_{m\ddot{o}}$ [-] 0,5 für MG I

0,4 für MG II

0,3 für MG III

Die von *Berndt* [13] in Einzelfällen genutzte Anwendung der Gleichung (2.9) für einschaliges Naturstein- und Ziegelmauerwerk ergab eine gute Übereinstimmung mit den Experimenten, wenn für $h = h = 6,5$ bis $7,5$ cm eingesetzt wurde. *Berndt* [13] begründet den Ansatz einer rechnerisch mitwirkenden Steinhöhe damit, daß sich die Querspannungen im Stein bei plastischer Berechnung nur in geringer Höhe des Steins, in Nachbarschaft der Lagerfuge, erstreckt.

Gleichung (2.9) ist nur dann anwendbar, wenn die Verformungseigenschaften des Mörtels unter Druck deutlich größer sind als die des Steins, was in der Regel bei historischen Konstruktionen vorausgesetzt werden kann [13]. Entsprechend den RILEM - Empfehlungen [98] wurden Mauerwerksprüfkörper mit $h/d = 3$ bis 5 verwendet.

Neben einem Bemessungsansatz zur Bestimmung der Mauerwerksdruckfestigkeit werden von *Berndt* [13] auch Bemessungsansätze für die Schubtragfähigkeit angegeben. Darauf soll hier jedoch nicht näher eingegangen werden.

Pöschel und *Sabha* [95] haben aufgrund von Versuchen an Elbesandsteinmauerwerk folgende Beziehung zur Berechnung der Mauerwerksfestigkeit aufgestellt:

$$\beta_{D,mw} = \frac{2 \cdot t/b \cdot b_{D,m\ddot{o}} \cdot (2,32 \cdot b_{Z,st} / b_{D,st} + 1,6) + b_{Z,st}}{t/b \cdot (2,32 \cdot b_{Z,st} / b_{D,st} + 1,6) + b_{Z,st} / b_{D,st}} \quad (2.10)$$

mit

$\beta_{D,mw}$ [N/mm ²]	Mauerwerksdruckfestigkeit
$\beta_{D,m\ddot{o}}$ [N/mm ²]	Mörteldruckfestigkeit
$\beta_{D,st}$ [N/mm ²]	Steindruckfestigkeit
$\beta_{Z,st}$ [N/mm ²]	Steinzugfestigkeit
t [mm]	Fugenhöhe
b [mm]	Steinbreite

Untersuchungen von *Berndt* [13] an verschiedenen historischen Natursteinbauwerken zur Feststellung der Resttragfähigkeit ergaben, daß die zulässigen Mauerwerksspannungen nach DIN 1053 - 1 [21] sehr oft deutlich überschritten wurden. Die strikte Einhaltung der in [21] als zulässig definierten, aus Sicherheitsgründen niedrig gehaltenen Spannungswerte für Natursteinmauerwerk, würden häufig aufwendige Baumaßnahmen und Verstärkungen historischer Bausubstanz erforderlich machen. Im Gegensatz zur Kenntnis der Tragfähigkeit von Ziegelmauerwerk ist die Kenntnis über die Tragfähigkeit von Natursteinmauerwerk noch relativ gering.

2.1.2 Verstärkung und Sicherung von ausgeführtem Mauerwerk

Unter dem Begriff der Verstärkung ist die Erhöhung der Tragfähigkeit eines Objektes zu verstehen [91]. Verstärkungs- bzw. Sicherungsmaßnahmen an historischem Mauerwerk können z. B. erforderlich werden, wenn:

- die Tragfähigkeit des vorhandenen Mauerwerks durch langjährige Nutzung und Belastung sowie Witterungseinflüsse vermindert ist
- durch Umbaumaßnahmen höhere Lasten bzw. Lastumlagerungen aufzunehmen sind.

Bei Verstärkungsmaßnahmen ist aus denkmalschützerischen Gründen insbesondere bei historischen Bauten darauf zu achten, daß das äußere Erscheinungsbild des Bauwerkes nicht verändert wird. *Fichtner* und *Cook* weisen in [42] auf die Gegensätzlichkeit der Bedürfnisse - Erhalt historisch bedeutsamer Bausubstanz einerseits und Anpassung an eine neue Nutzung und/oder Sicherstellung der Tragfähigkeit der Konstruktion

andererseits - hin. In [42] heißt es dazu sehr anschaulich „.....,daß „denkmalfreundliche“ Sicherungsmethoden nicht freundlicher zum Denkmal sein können, als das umweltfreundliche Auto zur Umwelt“. Ein Überblick über unterschiedliche Verfahren zur Sicherung historischen Mauerwerks ist in folgender Tabelle 2.1 gegeben.

Tabelle 2.1: Überblick und Bewertung von Sicherungsmethoden [42]

	Einsatzbereich	Nachteile für das historische Mauerwerk
Verfugung	Abdichtung gegen Schlagregen, einheitliches Fugenbild, ("Verfugmörtel")	Entfernen von Originalsubstanz (Fugen auskratzen), Eintrag von Fremdmaterial, möglicherweise Lastkonzentration im Verfugbereich bei zu festem Mörtel (Steinabplatzungen)
Schließen von Rissen (Ausfugen)	Wiederherstellen einer geschlossenen Mauerwerkscheibe, Abdichtung nach außen, (Fugenmörtel")	Je nach gewähltem Verfahren unkontrollierter Eintrag von Fremdmaterial
Ergänzung, Hilfskonstruktionen aus Stahl oder Stahlbeton	Stabilisierung der vorhandenen Konstruktion, kontrollierter Lastfluß bei Umbauten	Verändertes Erscheinungsbild
Auswechslung	Ersatz von nicht mehr standsicherem oder tragfähigem Mauerwerk	Totalverlust der Substanz, verändertes Erscheinungsbild
Injektion	Ausfüllen von Hohlräumen im Mauerwerk, Schließen von Rissen	Unkontrollierter Eintrag von Fremdmaterial, Schäden durch austretendes Verpreßgut, veränderter Kraftfluß
Vernadelung	Zugfeste Verbindung von Mauerwerksteilen, Querzugsicherung, konstruktive Rissesicherung	Substanzverlust durch Kernbohrung, Injektion (s.o.).
Vorspannen mit Verbund	Kontrollierter Kraftfluß im Mauerwerk, planmäßige Aufnahme von Zugkräften, Herstellen einer Quasi-Scheibe	Substanzverlust durch Kernbohrung, Injektion (s.o.).
Vorspannen ohne Verbund	Planmäßige Aufnahme von Zugkräften, Rissesicherung	Substanzverlust durch Kernbohrung, Injektion nur im Krafteinleitungsbereich

Über eine deutliche Erhöhung der Tragfähigkeit von mehrschaligem Natursteinmauerwerk durch Injektionen mit Wasser-Zementsuspensionen wird von *Berndt* in [12] berichtet. Die nachträgliche Erhöhung der Biegetragfähigkeit von Mauerwerkswänden wurde von *Gunkler* [52] und *Kordina* [71] untersucht.

Im Rahmen von Arbeiten des Sonderforschungsbereiches 315 „Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke“ wurden Nachuntersuchungen an ingenieurmäßig sanierten Mauerwerksbauten durchgeführt [122], [41]. *Wenzel* und *Maus* fassen in [122] die wesentlichen Untersuchungsergebnisse zusammen.

Bei etwa 30 sanierten Kirchen in Niedersachsen kam es durch Verpressen des Mauerwerks zu Spätschäden. Die Treibmineralbildung (Ettringit, Thaumasit) im gipshaltigen Mauermörtel führte zu Gefügesprengungen [122]. Injektionen sollten auf ein notwendiges Maß beschränkt werden, damit Schäden durch zu hohen Verpressdruck und unkontrolliert austretendes Verpressgut weitgehend vermieden werden. Zu fester Mörtel kann zu unerwünschten Lastumlagerungen innerhalb der Wand führen. Der durch das Injizieren hervorgerufene hohe Feuchtigkeitseintrag in die Wand ist auch nicht immer erwünscht.

Das Vernadeln geschieht dort, wo Zug- oder Schubkräfte auftreten, die vom Mauerwerk nicht aufgenommen werden können. Bei nachträglich vernadeltem alten Mauerwerk wurde festgestellt, daß es zu Stahlkorrosion infolge zu geringer Zementsteinüberdeckung (üblicherweise 2 cm) kommen kann. Bei den Stirnverschlüssen der Nadelanker führt eine zu geringe Überdeckung zum Feuchtigkeitseintritt und Absprengen des Pfropfens [122]. Da eine Vernadelung immer auch mit einer Injektion einhergeht, gelten die im vorherigen Absatz genannten Bedenken. Durch das Einbringen von zahlreichen Kernbohrungen für die Vernadelung geht ein nicht unerheblicher Teil an historischer Substanz verloren.

Bei vorgespanntem alten Mauerwerk wurde durch Nachuntersuchungen festgestellt, daß sich wesentliche Teile der Vorspannkraft über Jahre aufrechterhalten lassen (max. festgestellte Abrostung eines Spannstahls nach ca. 12 Jahren betrug 8% des ursprünglichen Durchmessers) [122]. Die Sanierung alten Mauerwerks durch Vorspannung kommt in der Regel nur bei sehr schwerer Beschädigung des Mauerwerks zum Einsatz, z.B. wenn stark gerissene Wände oder Pfeiler wieder druck- und schubfest zusammengefügt und zusätzlich zugfest gemacht werden sollen [42]. Die Einschränkungen aus denkmalpflegerischer Sicht sind hier ähnlich wie beim Vernadeln.

Einen umfassenden Überblick über Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit von injiziertem bzw. bewehrtem alten Mauerwerk findet sich in der Dissertation von *Maus* [79].

2.1.3 Mechanische Eigenschaften von Sandsteinen

Sandsteine gehören zu den wichtigsten Natursteinen, die als tragende Natursteine verbaut sind. Dies ist dadurch begründet, daß sie leicht abbaubar und bearbeitbar sind und eine ausreichende Festigkeit aufweisen.

Bei der Betrachtung der physikalisch-mechanischen Eigenschaften von Sandsteinen ist stets zu berücksichtigen, daß Steine singuläre, natürliche, heterogene Gemenge sind und damit von den künstlichen, zumeist normierbaren Werk- und Baustoffen grundsätzlich zu unterscheiden [92], [111]. Auch die Spezifizierung von Sandsteinen nach dem Herkunftsort, z.B. "Rüthener Grünsandstein", garantiert keineswegs gleiche Eigenschaften bei gleichem Namen.

Unter diesem Aspekt sollten auch die Ergebnisse von Prüfungsreihen (z.B. Druckfestigkeit an 5 - 10 Standardwürfeln) betrachtet werden. Die untereinander abweichenden Werte der Einzelprüfungen stellen nicht unbedingt einen methodischen Fehler dar, sondern dokumentieren die absolute Ungleichheit der ansonsten ähnlichen Prüfkörper [46].

Bei vielen Natursteinen und insbesondere bei Sandsteinen gibt es drei Haupteinflüsse auf die Festigkeit: Körner, Bindung und Poren (Abbildung 2.5).

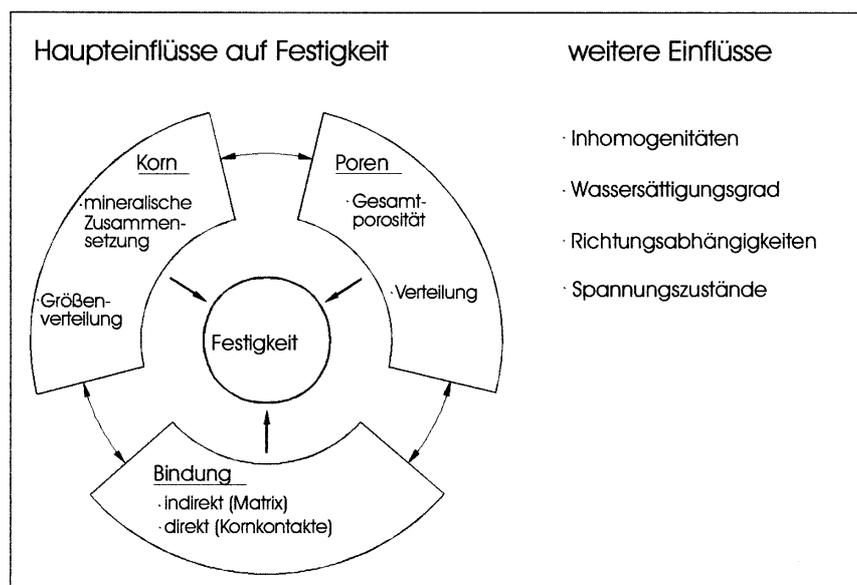


Abbildung 2.5: Haupt- und Nebeneinflüsse auf die Festigkeitsbildung von Sandsteinen [3]

Kleine Korngrößen führen zu höheren Festigkeiten, da die Mikrostruktur homogener ist und die Zahl der Bindungen pro Volumeneinheit zunimmt [4]. Ein zweiter Haupteinfluss ist die Bindungsart. Sandsteine können direkt oder indirekt gebunden sein (Abbildung 2.6).



Abbildung 2.6: Vereinfachte Darstellung des mikrostrukturellen Aufbaus von Sandstein [4]

Die reale Struktur der Sandsteine liegt meist zwischen den Extremen direkte - indirekte Kornbindung (Abbildung 2.6 Mitte).

Bei der indirekten Bindung werden die einzelnen Körner durch eine Matrix verbunden. Die Art des Bindemittels - ob kieselig, tonig oder kalkig - hat dabei eine entscheidende Bedeutung für die Festigkeit [97]. Den Einfluß der Bindemittelart auf die zentrische Zugfestigkeit von Sandstein hat *Schuh* [111] durch Versuche qualitativ nachgewiesen.

Durch die naturgegebene Schichtung sind die Mikro-Struktur und infolgedessen viele Eigenschaften von Sandstein anisotrop.

Die Anisotropie der Mikrostruktur und ihre Bedeutung für feuchtetechnische und mechanische Eigenschaften ist von *Meng*, *Alfes* und *Schiessl* untersucht worden [83]. Die Anisotropieeffekte der untersuchten Sandsteine sind je nach Ausprägung der Hauptschichtungsrichtung unterschiedlich groß.

Alfes [5] faßt Untersuchungsergebnisse der physikalisch-mechanischen Eigenschaften von acht bruchfrischen Sandsteinen zusammen. Hinsichtlich der Schichtungseinflüsse sind beispielsweise die Zugfestigkeiten längs zur Schichtung höher als quer zur Schichtung. Die Ursache hierfür sieht *Alfes* in dem während der Materialtrennung stärker gewundenen Reißverlauf längs zur Schichtung bei Zug (Abbildung 2.7).

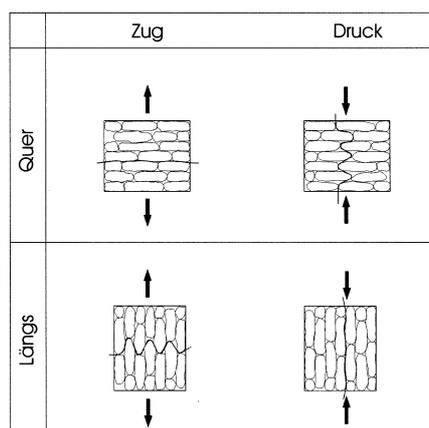


Abbildung 2.7: Rißverlauf bei mechanischer Belastung quer und längs zur Schichtung [5]

Analog zur Zugfestigkeit waren die Druckfestigkeiten bei Belastung quer zur Schichtung tendenziell höher als bei Belastung längs zur Schichtung.

Bei Druckbeanspruchung versagen die Sandsteine durch Überschreiten der Querkzugfestigkeit bzw. –dehnung. Bei Belastung quer zur Schichtung ist der gewundene Rißverlauf stärker [5] (Abbildung 2.7).

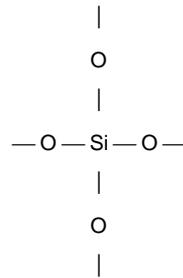
Als dritter Haupteinfluß auf die Festigkeit sind die Poren zu nennen [3]. Eine hohe Porosität bedeutet ein geringe Zahl von Kornkontakten und Brückenbildungen. Die Festigkeit wird somit geringer sein. Eine hohe Porosität begünstigt schnellere Transportvorgänge in den Stein hinein und ist mithin im Hinblick auf Verwitterungsvorgänge von Bedeutung. Diesbezüglich sind von *Meng* [85] die direkten Beziehungen zwischen Parametern des Porenraumes und des Feuchttransportes untersucht worden. Sowohl Gesamtporosität als auch Porenverteilung sind im Hinblick auf Festigkeit und Verwitterungsbeständigkeit von Bedeutung. So wird z.B. der Einfluß der Porengrößenverteilung auf die zweiaxiale Biegezugfestigkeit von Sandstein von *Wittmann* [125] hervorgehoben. Trotz größerer Gesamtporosität, hatte diejenige Sandsteinvarietät die größere Festigkeit, die den größeren Feinporenanteil besitzt.

2.1.4 Einsatz und Wirkung von Steinfestigungsmitteln

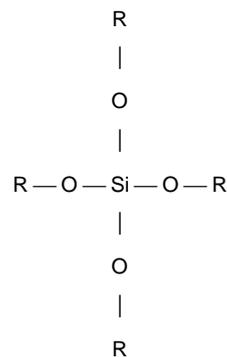
Seit über 20 Jahren wird der Einsatz von Steinfestigungsmitteln erfolgreich praktiziert. Als Steinfestigungsmittel werden überwiegend Steinfestiger auf der Basis von Kieselsäureester-Verbindungen (KSE) verwendet.

Der Schwerpunkt der Anwendung von Kieselsäureestern liegt seit jeher bei Sandsteinen, die aufgrund ihrer geeigneten Porosität im Normalfall genügend kapillares Saugvermögen besitzen, um eine ausreichende Aufnahme zu garantieren [102]. Steinfestiger können aber grundsätzlich auch bei allen porösen mineralischen Baustoffen zur Festigung und Stabilisierung des Gefüges eingesetzt werden wie z.B. Tuffsteine, keramische Baustoffe (z.B. Ziegel), mineralische Putze [48].

Hauptbestandteil der Kieselsäureester ist das Silicium (Si), das überall in der Natur als mehr oder weniger reiner Quarzsand (Siliciumdioxid, SiO_2) vorkommt [124]. Silicium ist vierwertig, der Sauerstoff zweiwertig, das heißt jedes Sauerstoff-Atom hat noch eine Valenz zur Bindung eines anderen Atoms oder einer anderen Atomgruppe (Molekül) frei. Bildlich dargestellt:



An jedes O-Atom lagert sich ein Alkoholmolekül (Methyl- oder Äthylalkohol), d.h. es liegt dann eine Verbindung von Kieselsäure mit Alkohol vor, der sogenannte Kieselsäureester, kurz geschrieben: Si(OR)_4 . R steht für den organischen Rest, in diesem Falle Alkohol:



Zur Anwendung bringt man den flüssigen Steinfestiger auf die trockene Oberfläche des zu behandelnden Steins auf. Durch die kapillare Saugwirkung reichert sich der Steinfestiger dann im Porensystem des Steins an. Dort entstehen durch die Einwirkung des an den Porenwänden haftenden Wassers und durch die in den Poren befindliche Feuchtigkeit der Luft aus dem Kieselsäureester unter Abspaltung von Alkohol (ROH) und Wasser (aq) das sogenannte Kieselgel (siehe Abbildung 2.8). Die Umwandlung der Kieselsäure in Kieselgel ist nach ca. 2-3 Wochen abgeschlossen [124].

Die Kieselsäureesterfestigung beruht also auf dem Prinzip der Bindemittelzuführung [48], wobei das Kieselgel das neue Bindemittel darstellt. Durch die Abscheidung des Kieselgels in offenen Porenbereichen und in den Kornzwickeln (siehe Abbildung 2.9) werden neue Korn-Korn Brücken gebildet, die den Verbund festigen [124]. Durch mehrere Festigungen mit Kieselsäureester wird der Verbund der Körner untereinander aufgrund der größeren abgelagerten Menge von Kieselgel in den Porenzwischenräumen größer. In Grobporen tritt durch das Gel nur eine Beschichtung der Porenwände ein und keine Verfüllung, so daß durch die Verfestigung die Durchlässigkeit des Steins für Gase und Dämpfe erhalten bleibt [47].

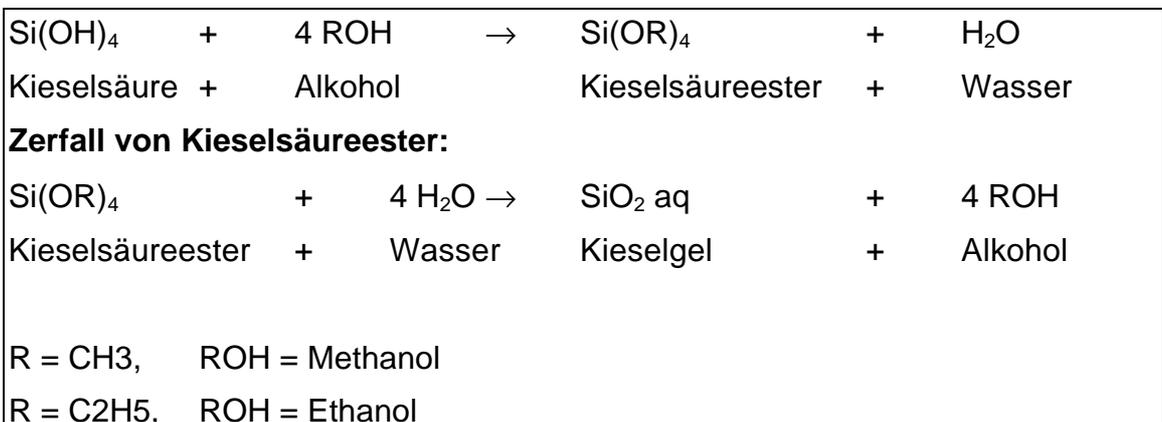


Abbildung 2.8: Gesamtreaktion der Kieselsäureesterfestigung [117]

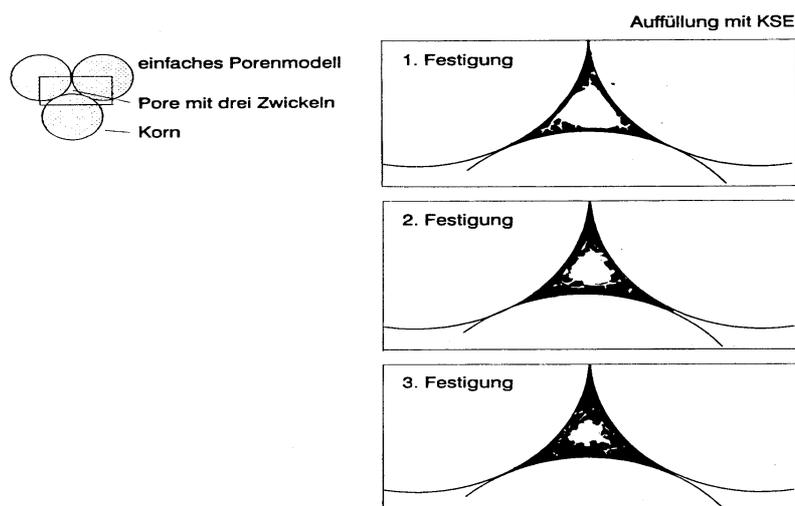


Abbildung 2.9: Einfaches Porenmodell [102]

Die Wirkungsweise des Steinfestigungsmittels hängt letztendlich davon ab, welche Menge an Kieselgel abgeschieden wird und in welchen Zonen die Ablagerung des Kieselgels erfolgt.

Sattler [102] fand durch seine Untersuchungen zu "Wirkung und Dauerhaftigkeit von Sandsteinfestigungen mit Kieselsäureester" heraus, daß in engen Porenbereichen (Spalten und Kornzwickelräumen) durch vorhandene Flüssigkeitsmenisken bevorzugt größere Gelmengen eingelagert werden, die am meisten zur Erhöhung der mechanischen Festigkeit im Gesteinsgefüge beitragen. Gelablagerungen in offenen Porenräumen ohne Kraftschluß tragen hingegen kaum zur Festigkeitssteigerung bei.

Die Kieselsäureester können bis zu einem Wirkstoffgehalt von 70-80% verarbeitet werden, wodurch eine genügend hohe Abscheidung von Bindemittel gesichert ist. Ein kg Kieselsäureester mit einem Wirkstoffgehalt von 75% bildet z.B. 300g Kieselgel.

Hauptvoraussetzung für eine gute Wirksamkeit der Festigung ist das Eindringen des Kieselsäureesters bis in die ungeschädigten Bereiche des Steins. Ein zu hoher Bindeeintrag im Oberflächenbereich kann zu einer Schalenbildung und damit zu unerwünschten Abplatzungen führen. Nach *Sattler* und *Klemm* [101] ist eine Festigung nur dann als gelungen einzustufen, wenn außer dem Festigkeitszuwachs auch gewährleistet ist, daß entfestigte Bereiche so gefestigt werden konnten, daß keine extremen Festigkeitssprünge hervorgerufen wurden. Dem Festigkeitsprofil der Abbildung 2.10 ist zu entnehmen, daß die Festigkeit der äußeren verwitterten Zone eines Steins gegenüber der Festigkeit im steininneren deutlich vermindert sein kann. Der Erfolg einer Festigungsmaßnahme zeichnet sich nicht durch einen möglichst hohen Eintrag an Steinfestiger aus, sondern durch die Wiederherstellung eines möglichst gleichmäßigen Festigkeitsniveaus.

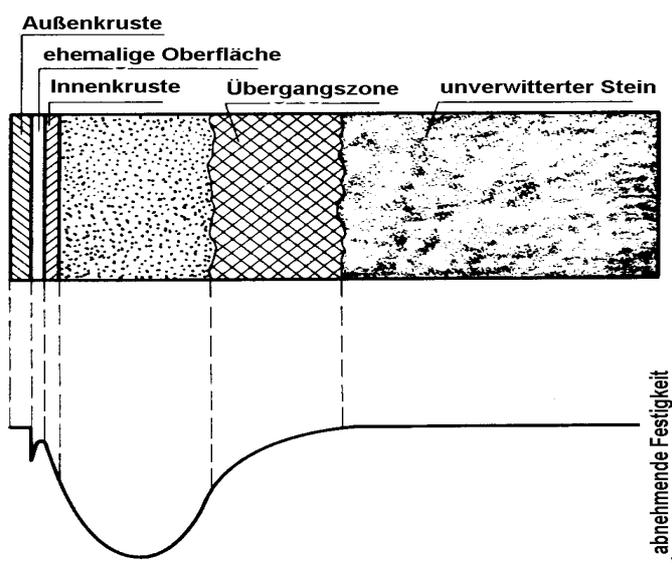


Abbildung 2.10: Festigkeitsprofil eines verwitterten Steins [118]

Der Verwendung von Kieselsäureestern für die Steinfestigung sind Grenzen gesetzt. Bei Sandsteinen mit tonhaltigen Einschlüssen, dringt der Kieselsäureester nicht in die tonigen Lagen ein, so daß es zu unerwünschten Festigkeitsunterschieden im Sandsteingefüge kommt. Zur Festigung von carbonatischen Steinen, wie z.B. Muschelkalk, sind Kieselsäureester nur bedingt geeignet. Das gefügebildende Calcit ist chemisch mit der Kieselsäure nicht verwandt, so daß es nur zu einem geringen Verbund der Kieselgele mit dem Calcitgefüge kommt [48].

In [102] wurde der Einfluß der Salzbelastung auf den Festigungserfolg untersucht. Dabei stellte sich heraus, daß sich die Salzminerale ebenfalls in den für die Festigung entscheidenden Kornzwickelräumen befinden und somit eine Anlagerung von Kieselgel blockieren, so daß es zu starken Wirksamkeitsverlusten der Steinfestigung kommt.

Sattler [102] hat experimentell nachgewiesen, daß bei Steinen mit ähnlicher Gesamtporosität und einer Versalzung der gleichen Größenordnung, die Porenradienverteilung bestimmenden Einfluss auf den Mitteleintrag des Festigungsmittels hat. Der Mitteleintrag in salzbelastete Steine mit hohem Anteil an Mikroporosität ist geringer als bei Steinen mit geringem Anteil an Mikroporosität.

Ein pauschaler Grenzwert der Salzhaltigkeit, oberhalb derer eine Festigung nicht mehr durchgeführt werden sollte, ist in der Fachliteratur bisher nicht bekannt.

Experimentell nachgewiesene Grenzwerte der Steinfuchtigkeit, oberhalb derer eine Festigung nicht mehr durchgeführt werden sollte, sind in der Literatur bisher nicht zu finden.

Krus [73] hat den Einfluß der Feuchte von Natursandstein auf die Applikation von Schutzmitteln untersucht. Dabei zeigte sich eine deutliche Abhängigkeit der Eindring- und Wirkungstiefe von der Anfangsfeuchte der Proben. Durch die Lagerung im Klimaraum wurden die Proben auf eine Ausgleichsfeuchte bei der Applikation des Festigers (KSE) von 65% rel. Luftfeuchte gebracht. Der Festigungszuwachs der so vorkonditionierten Proben lag zwischen 70% und 145%. Bei Proben, die im Klimaraum bei 93% rel. Luftfeuchte gelagert waren, sank der Festigungszuwachs auf 20%. Bei Proben, die nach Wasserlagerung einen Wassergehalt von 50% Sättigung aufwiesen, beträgt der Festigungszuwachs nur noch 15%. *Krus* [73] weist darauf hin, das die oben angegebenen Werte je nach Material unterschiedlich sein können.

Eine gewisse Menge Feuchtigkeit ist jedoch für den Ablauf der Reaktion Kieselsäureester + Wasser \Rightarrow Kieselgel + Alkohol erforderlich. Ein zu hoher Feuchtigkeitsgehalt im Stein bringt jedoch den Kieselsäureester zu sofortiger Gelierung, so daß er nicht mehr eindringen kann [124]. Auf diese Weise entsteht eine verdichtete Oberfläche, die in kurzer Zeit schuppenförmig oder ganzflächig abgesprengt werden kann.

2.1.5 Zerstörungsarme/-freie Untersuchungsmethoden an Mauerwerk

2.1.5.1 Allgemeiner Überblick

Im Sinne einer substanzschonenden Untersuchung bestehender Gebäude besteht großer Forschungsbedarf auf dem Gebiet zerstörungsarmer bzw. -freier Prüfverfahren. Einen guten Überblick der Einsatzmöglichkeiten zerstörungsfreier Untersuchungsmethoden an Mauerwerk, insbesondere an historischen Bauten, geben *Berger* und *Wenzel* in [9].

Die Planung von Erhaltungs- und Instandsetzungsmaßnahmen für historische Gebäude orientiert sich am vorhandenen Bestand. Zur Beurteilung des vorhandenen IST-Zustandes sind aber häufig zerstörende Eingriffe wie z.B. Ausbrüche oder Bohrkernentnahmen unumgänglich. Um die vorhandene Bausubstanz so gering wie möglich zu schädigen, sind zerstörungsarme/-freie Prüfmethode anzustreben.

Die folgende Tabelle 2.2 gibt eine Übersicht über mögliche zerstörungsarme/-freie Untersuchungsverfahren, die bereits an historischem Mauerwerk zum Einsatz gekommen sind [9], [15], [18], [61], [74], [106], [119], [121]. Dabei werden nur Prüfverfahren hinsichtlich Mauergefüge und -festigkeiten berücksichtigt.

Tabelle 2.2: Übersicht über mögliche Verfahren zur Erkundung von Mauergefüge und Festigkeit.

Verfahren	Erkundungsziel		
	Hohlraum	Mehrschaligkeit	Druckfestigkeit
Radar	x	x	
Geoelektrik	x	x	
Ultraschall	x	x	x
Seismik	x	x	
Endoskopie	x	x	
Flachpressen			x
Eindringhärteprüfung			x
Bohrwiderstandsmessung			x
Bohrkerne			x

Im folgenden werden die in Tabelle 2.2 enthaltenen Verfahren kurz beschrieben:

Radar

Die Fassade wird mit einer Sende- und Empfangsantenne an entlang zuvor festgelegten Profilen abgefahren. Die Empfangsamplitude wird in Radargrammen aufgezeichnet. In diesen Radargrammen kann man anhand der materialspezifischen Reflexionen der elektromagnetischen Wellen Schallengrenzen, Hohlräume oder Materialeinlagerungen erkennen [61].

Geoelektrik

Ein durch zwei Elektroden in der Wand erzeugtes Potentialfeld wird durch eine Fehlstelle verzerrt, was an einer Spannungsänderung zwischen zwei Potentialsonden erkennbar ist [121].

Ultraschall

Die vom Sender erzeugten elektronischen Impulse werden im Sendeprüfkopf nach dem piezoelektrischen Effekt in mechanische Schwingungen umgewandelt und von dort über das Ankopplungsmittel auf das zu prüfende Werkstück abgestrahlt. Nachdem sie das Werkstück durchlaufen haben, werden sie im Empfängerprüfkopf in elektrische Impulse zurückverwandelt und im Meßgerät registriert. Die Impulsenergie wird an allen Poren und Fehlstellen im Material nahezu vollständig reflektiert, so daß sich im Bereich eines Hohlraumes eine deutliche Zunahme der Wellenlaufzeit, die aus den Umwegeffekten resultiert, zeigt [9]. Weitere Erläuterungen des Ultraschallmeßverfahrens sind Kapitel 2.1.5.3 zu entnehmen.

Seismik

Der Prüfkörper wird mit Schlagzellen, Hammerschlag oder Vibratoren angeregt. Als Empfänger der erzeugten Schallwellen werden Geophone eingesetzt. Im Vergleich zum Ultraschall hat die seismische Erkundungsmethode eine bedeutend größere Reichweite durch die höhere Sendeintensität und geringere Absorption. Die Seismik ist insbesondere zum Nachweis von Hohlräumen geeignet [61].

Endoskopie

Einführung eines starren oder flexiblen dünnen Stahlrohrs mit eingebettetem lichtleitenden Glasfaserbündel in Bohrlöcher oder Hohlräume; Beobachtung des Innenraums durch Okular, Aufnahme der Bilder mit Fotoapparat oder Videokamera [9].

Flachpressen (Flat Jack)

In horizontale Sägeschnitte im Mauerwerk oder ausgefräste Lagerfugen werden hydraulische Flachpressen eingelegt und über eine Hebelpresse unter Druck gesetzt. Bei gleichzeitiger Kontrolle der vertikalen Verformungen im Mauerbereich um die Presse und des aufgebracht Pressendrucks können der ursprüngliche Spannungszustand bzw. die Verformbarkeit des Mauerwerks bestimmt werden [9], [80], [81].

Eindringhärteprüfung

Die Eindringhärte gibt die lokale Festigkeit eines Materials an. Da die Prüflasten klein und die bleibenden Verformungen mit dem Auge kaum wahrnehmbar sind, ist die Eindringhärte-Prüfung ein quasi zerstörungsfreies Prüfverfahren.

Bei der Eindringhärte wird ein Prüfkopf, der die geometrische Form einer Kugel, eines Kegels oder einer Pyramide haben kann, in das zu prüfende Material eingedrückt, und es wird die Last und die Eindringtiefe oder nach der Lastwegnahme der Eindruckdurchmesser gemessen. Aufgrund von in Aachen (ibac) durchgeführten Versuchen hat sich eine Hartmetall-Kugel von 3 mm Durchmesser für Natursteine als günstig herausgestellt.

Eine bestehende Korrelation der Eindringhärte zur Druckfestigkeit kann genutzt werden, um die Festigkeit des zu untersuchenden Materials einzustufen [1], [114]. Für Metalle wird dieses Prüfverfahren nach DIN 50351 bereits angewandt.

Bohrwiderstandsmessung

Die Bohrwiderstandsmessung ist als zerstörungsarmes Prüfverfahren für die Schadensdiagnose von verwittertem Naturstein geeignet.

Das am Institut für Bauphysik der FhG entwickelte Verfahren der Bohrwiderstandsmessung basiert auf der Messung des gesteinstiefenabhängigen Widerstandes beim Bohren eines 3 mm (für Sandsteine) Bohrloches mit konstanter Andrucklast und konstanter Leistung. Ein Bohrer wird durch eine Rollenübersetzung durch ein Gewicht an das Mauerwerk gedrückt. Ein mit der Rollenübersetzung verbundener Stift registriert nach gleichzeitigem Starten von Bohrmaschine und Schreiber den Bohrfortschritt in Abhängigkeit von der Gesteinstiefe. Die Bohrereindringtiefe wird auf dem Schreibstreifen als Funktion der Zeit aufgezeichnet. Aus der Steigung dieser Bohrdiagramm-Kurve, die tiefenabhängig unterschiedlich sein kann, läßt sich der Bohrwiderstand (auch Bohrhärte genannt) nach folgendem Verhältnis definieren:

$$\text{Bohrwiderstand [-]} = \frac{\text{Papiervorschub [cm]}}{\text{Änderung der Bohrtiefe [cm]}}$$

Als Bohrer eignen sich Hartmetallbohrer sowie Diamantbohrer.

Ziel der Untersuchung der Bausubstanz im Hinblick auf die Tragfähigkeit mit Hilfe der Bohrwiderstandsmessung ist, daß zwischen Bohrparametern und Festigkeit des Materials eine Korrelation hergestellt werden kann [2], [75], [82], [120]. Kapitel 2.1.5.2 enthält zusammenfassende Ergebnisse eigener Versuche der Bohrwiderstandsmessung.

Bohrkerne

An am Bauwerk entnommenen Bohrkernen der Durchmesser 20 bis 200 mm, kann die Rohdichte, die Druckfestigkeit und die Verformbarkeit (E-Modul, Querdehnzahl) bestimmt werden [9], [105].

Im folgenden werden die im experimentellen Teil dieser Arbeit angewandten zerstörungsarmen/-freien Prüfverfahren der Bohrwiderstandsmessung sowie der Ultraschall- und der Resonanzfrequenzmessung ausführlich beschrieben und bereits bekannte Erkenntnisse aus der Literatur zusammengestellt.

2.1.5.2 Bohrwiderstandsmessung

Die mit den Bohrwiderstandsmessungen gewonnen Tiefenprofile können qualitativ oder quantitativ gedeutet werden, jedoch müssen bei quantitativer Deutung Korrelationen zur Festigkeit herangezogen werden. Nicht nur die quantitative Festigkeitssteigerung, sondern auch die Eindringtiefe von Steinfestigern kann mit der Bohrtechnik anhand sogenannter Tiefenprofile nachgewiesen werden [1], [120].

Für die Interpretation der Messergebnisse sind insbesondere folgende Einflußgrößen zu berücksichtigen:

- Bohrerantrieb

Beim Bohren findet ein interaktiver Prozeß zwischen Prüfkörper und Bohrer statt. Bohrungen mit Hartmetallbohrern in Kalksandsteinen als Referenzmaterial haben gezeigt, daß die Bohrer ca. ab der 20. Bohrung verschleifen. Die Bohrhärte nimmt durch den Verschleiß scheinbar zu [2], [82], [120].

Bei Verwendung von Diamantbohrern können diese durch Reibung entweder abstumpfen oder auch geschärft werden [120].

- Bohrmehlförderung

In [120] wurde eine Erhöhung des Bohrwiderstandes mit zunehmender Tiefe infolge behinderter Förderung des Bohrmehls festgestellt.

Der Einfluß der Bohrmehlförderung ist stark vom zu prüfenden Material und vom Feuchtzustand des Materials abhängig. Bei hohem Feuchtegehalt der Proben frißt sich der Bohrer regelrecht fest, weil sich das Bohrmehl in der Wendel verklebt [82]. Die Untersuchung 6 unterschiedlicher Sandsteine in [120] ergab, daß der Einfluß der Bohrmehlförderung je nach Sandstein höchst unterschiedlich ist. Allen Proben gemein war aber, daß bis in eine Tiefe von ca. 8 - 10 mm der Einfluß der Bohrmehlförderung generell vernachlässigbar ist.

- Einfluß des Bohrerandrucks

Da Probekörper sehr unterschiedliche Festigkeitseigenschaften aufweisen, muß der Andruck auch unterschiedlich groß sein. Der Andruck wird über Gewichte zwischen 1 bis 3 kg aufgebracht. Ist der Andruck zu niedrig, wird ein überproportional hoher Bohrwiderstand ausgewiesen, ist er zu hoch, ist der Bohrwiderstand zu niedrig [1], [75], [120].

Um einzelne Messungen untereinander vergleichbar zu machen, sollte zur Feststellung des Festigungserfolges eines Materials der gleiche Anpressdruck für ungefestigtes und gefestigtes Material gewählt werden. Bei hohen Festigkeitssteigerungen aufgrund der Behandlung mit einem Steinfestiger kann die Forderung des gleichen Anpressdruckes vor und nach einer Verfestigung oft nicht erfüllt werden, da das gefestigte Material einen höheren Anpressdruck erfordert, als das weichere, ungefestigte Material [120].

Die Höhe des Anpressdruckes sollte im Hinblick auf die Vergleichbarkeit der Ergebnisse immer im Prüfprotokoll festgehalten werden.

2.1.5.3 *Ultraschallaufzeitmessung*

Die Untersuchung der Ultraschallaufzeitmessung wird von der Überlegung geleitet, Korrelationen zwischen Schallgeschwindigkeit und diversen Materialparametern, wie z.B. Festigkeit, E-Modul, Rohdichte, herzustellen, um mit einem minimalen Eingriff in die bestehende Bausubstanz zwecks Bohrkernentnahme möglichst großflächig auf das Bauwerk verteilte Aussagen bezüglich der bestehenden Bausubstanz treffen zu können. Desweiteren könnten Änderungen der Schallaufzeit Hinweise auf den Festigungserfolg eines Materials geben.

Über den Einsatz der Ultraschallmessung zur Prüfung mechanischer Eigenschaften von Baustoffen, insbesondere Beton, wird in der Literatur vielfach berichtet, siehe z.B. [36], [94], [123]. DIN ISO 8047 [33] regelt die Bestimmung der Ultraschallgeschwindigkeit für Festbeton. Heft 422 des DAfStb [16] gibt für Festbeton ein Verfahren zur Ermittlung einer Regressionsgerade an, anhand derer mittels Ultraschall auf die Druckfestigkeit des Betons geschlossen werden kann.

DIN 54126 Teil 1 [30] und Teil 2 [31] enthält allgemeine Regelungen zur Prüfung mit Ultraschall, das Merkblatt B 4 des DGZfP [17] beschreibt die Anwendung der zerstörungsfreien Ultraschallprüfung mineralischer Baustoffe und Bauteile.

Das Grundprinzip der Ultraschallprüfung wurde bereits in Kapitel 2.1.5.1 erläutert. Bei der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung mit Ultraschall werden im Bauteil mechanische Wellen durch einen Schallsender angeregt. Um eine gute Schalleitung zwischen den Schallköpfen und den Prüfkörpern zu erhalten, müssen die Schallköpfe mit einem Kopplungsmittel (z.B. Vaseline) an den Prüfkörper angedrückt werden. Die Hohlräume zwischen Prüfkopf und Baustoffoberfläche müssen durch das Kopplungsmittel ausgefüllt werden. Aufgrund des hohen Dichtesprungs zwischen Material und Luft erfolgt an

Grenzflächen (Außenflächen, Hohlräumen, Rissen) nahezu vollständige Reflexion, d.h. es werden keine Schallenergien übertragen.

Die vollständige Reflexion der Ultraschallwellen an Hohlräumen oder Rissen macht die Bestimmung von Fehlstellen im Material möglich, da der Ultraschallimpuls die luftgefüllte Fehlstelle nicht durchdringen kann. Durch die "Wegumleitung" an der luftgefüllten Fehlstelle vorbei, wird die Laufzeit t der Ultraschallwellen verlängert.

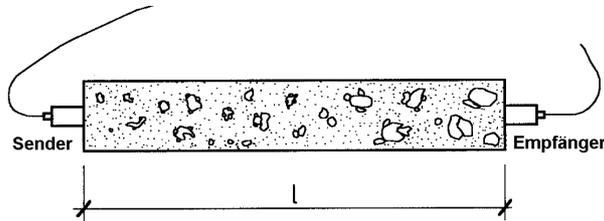


Abbildung 2.11: Durchschallung eines Probekörpers

Die Schallwellen breiten sich mit einer für den Baustoff charakteristischen Schallgeschwindigkeit v aus:

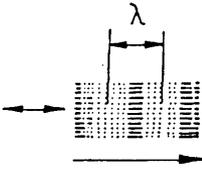
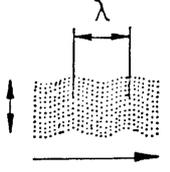
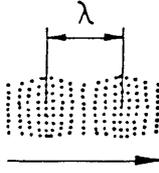
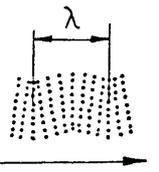
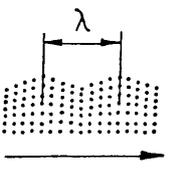
$$v \text{ [km/s]} = l \text{ [mm]} / t \text{ [\mu s]} \quad (2.11)$$

Bei einem unendlich ausgedehnten, isotropen, homogenen festen Körper kommen nur zwei Wellenarten vor, die Longitudinalwelle und die Transversalwelle. In begrenzten Medien, wie Stäben, Platten oder ähnlichen Körpern, kommen jedoch weitere Wellentypen vor, welche durch Überlagerung der beiden vorgenannten Wellenarten bewirkt werden können [72], [74].

Die mit dem Ultraschallgerät gemessene Geschwindigkeit bezieht sich auf die Longitudinalwelle, weil sie gegenüber den anderen Wellenarten die größte Fortpflanzungsgeschwindigkeit hat und daher als erste den Empfänger erreicht [17], [18], [74]. Bei dieser Wellenform schwingen alle Teilchen in Ausbreitungsrichtung. Die Querkontraktion in den Richtungen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung ist unterdrückt [72].

Wichtige Kenngrößen bei der Ultraschallprüfung sind die Wellenlänge λ und die Frequenz f des Impulses. Die Frequenz f ist die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde, die vom Sender angeregt wird. Sie wird also allein vom Schallsender vorgegeben [17]. Bei inhomogenen Körpern sind niedere Frequenzen im Bereich 20 - 200 kHz erforderlich [72]. Bei höheren Frequenzen nehmen Streuungen und damit auch Energieverluste infolge der stoffeigenen Inhomogenitäten bei mineralischen Baustoffen derart zu, daß eine starke Schwächung der Schallintensität auftritt [17].

Bei der Messung mechanischer Schwingungen in Festkörpern können sich verschiedene Wellenarten ausbreiten (Abbildung 2.12) [72].

Wellenart	Teilchenbewegung	Ausbreitungsgeschwindigkeit
Longitudinalwelle		$v_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)}}$
Transversalwelle		$v_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\mu)}}$
Dehnwelle		$v_D = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$
Biegewelle		$v_B = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{I}{A}}$
Oberflächenwelle		$v_0 = \frac{0.87 + 1.12 \mu}{(1-\mu)} v_T$

E = Elastizitätsmodul ; μ = Querdehnzahl ; ρ = Rohdichte

A = Querschnittsfläche ; I = Flächenträgheitsmoment ; λ = Wellenlänge

Abbildung 2.12: Elastische Wellen in festen Baustoffen [72]

Die Wellenlänge λ ist durch den regelmäßigen Abstand derjenigen schwingenden Teilchen gegeben, deren Schwingungszustand jeweils übereinstimmt (siehe Abbildung 2.12).

$$\lambda \text{ [m]} = v \text{ [km/s]} / f \text{ [kHz]} \quad (2.12)$$

Der dynamische E-Modul lässt sich für die Longitudinalwelle aus folgender Bestimmungsgleichung ermitteln:

$$E_{\text{dyn}} = v_L^2 \cdot \rho \cdot \frac{1}{k} \quad (2.13)$$

mit

E_{dyn} [kN/mm²] dynamischer E-Modul

v_L [km/s] Longitudinalwellengeschwindigkeit

ρ [g/cm³] Rohdichte

$$k [-] = \frac{1 - m}{(1 + m) \cdot (1 - 2m)}$$

Die Behinderung der Querkontraktion wird durch den Faktor k ausgedrückt.

Gleichung (2.13) kann nur angewendet werden, wenn die Querabmessung senkrecht zur Schallausbreitung groß gegenüber der Wellenlänge in dem zu untersuchenden Material ist.

Bei der Dehnwelle (siehe Abbildung 2.12) schwingen alle Teilchen ebenfalls in Ausbreitungsrichtung, im Gegensatz zur Longitudinalwelle ist hier die Querkontraktion jedoch nicht behindert. Der dynamische E-Modul für die Dehnwelle errechnet sich aus:

$$E_{\text{dyn}} = v_D^2 \cdot \rho \quad (2.14)$$

mit

E_{dyn} [kN/mm²] dynamischer E-Modul

v_D [km/s] Dehnwellengeschwindigkeit

ρ [g/cm³] Rohdichte

Diese Beziehung gilt nur, solange die Querabmessungen des Stabes genügend klein gegenüber der Wellenlänge sind.

Bei schmalen Probekörpern tritt keine vollständige Querdehnungsbehinderung auf. Ist das Quermaß b eines Probekörpers kleiner als $l/(t \cdot f)$, wird der berechnete Absolutwert von E_{dyn} ungenau. Relative Änderungen lassen sich aber damit ausreichend genau bestimmen [16].

$$b < l/(t \cdot f) \quad (2.15)$$

mit

b [mm] kleinstes Maß senkrecht zur Durchschallungsrichtung

l [mm] Durchschallungslänge

t [µs] Laufzeit des Schallimpulses

f [MHz] Sendefrequenz

Erst ab Querdehnzahlen $\mu > 0,2$ wird der dynamische E-Modul merklich von der Querdehnzahl beeinflusst, *Leers* [74]. Auch von *Egermann* [38] wurde in Versuchen an historischen Mauerwerkskonstruktionen ermittelt, daß der dynamische E-Modul ohne Berücksichtigung der Querkontraktion μ hinreichend genau aus der Dehnwellengeschwindigkeit v_D ermittelt werden kann Gl (2.14) (dynamischer E-Modul wird bei $\mu \leq 0,2$ um maximal 10% unterschätzt).

Bei anisotropen Materialien (z.B. Sandstein) sind die Ultraschallgeschwindigkeiten richtungsabhängig.

Im Merkblatt B 4 des DGZfP [17] wird darauf hingewiesen, daß wassergefüllte Fehlstellen die Schallgeschwindigkeit mindern. *Leers* [74] ermittelte in Versuchen, daß lufttrockene Mörtelproben eine größere Schallgeschwindigkeit aufweisen als wassergesättigte Proben. Dagegen ermittelte *Schön* [106] an Sandsteinen eine Zunahme der Longitudinalwellengeschwindigkeit bei steigendem Wassergehalt. Diese Tendenz tritt jedoch nur auf, wenn das Poren- bzw. Kluftwasser die mechanischen Eigenschaften des festen Mineralverbandes nicht herabsetzt (z.B. Löse- oder Quellvorgänge), und es ist um so deutlicher ausgeprägt, je größer die Porosität bzw. Klüftigkeit ist.

2.1.5.4 Resonanzfrequenzmessung

Zur Bestimmung elastischer Kennwerte wird neben der Ultraschallmessung auch die Resonanzfrequenzmessung angewandt.

Für Probekörper und kleinere Bauteile z.B. Prisma, Zylinder, Ring-, Kreis- und Rechteckplatte lassen sich bei Kenntnis der Eigenschwingungsform und der Dichte elastische Kennwerte (E_{dyn} , G_{dyn} , μ_{dyn}) ermitteln [17].

Zur Ermittlung der Eigenfrequenz wird der Probekörper durch einen einmaligen, kurzzeitigen mechanischen Impuls (elastischer Anschlag) in einer für den Prüfling charakteristischen Grundschwingung angeregt. Zur Aufnahme der Schwingungen wird ein piezoelektrischer Taster verwendet. In der Phase des freien Ausschlagens des Körpers wird die Eigenfrequenz analysiert und am Gerät in kHz angezeigt.

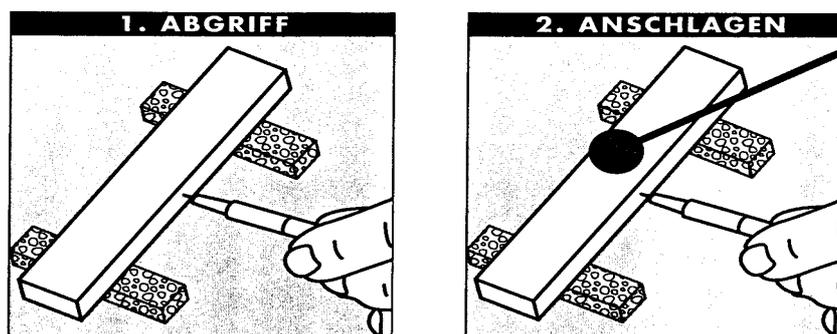


Abbildung 2.13: Ermittlung der Eigenfrequenz eines Prüfkörpers

Für die Bestimmung des Elastizitätsmoduls E ist die Dehnwelle oder die Biegewelle und für den Schubmodul G die Torsionswelle zu ermitteln.

Je nachdem an welchen Stellen die Anregung des Prüflings erfolgt, wird sich die Dehnwelle, die Biegewelle oder die Torsionswelle ausbilden [16]. Um eine möglichst ungehinderte Schwingung zu ermöglichen, ist eine Auflagerung des Probekörpers in den Schwingungsknoten vorzunehmen. Dies ist insbesondere für lange (im Meter-Bereich) oder flache Proben erforderlich. Oft reicht die Verwendung einer Schaumstoffunterlage aus, um die Abkoppelung von einem starren Untergrund zu erreichen und somit die dadurch hervorgerufene Dämpfung zu unterdrücken, *Kössler* [72].

Die Probekörperform ist bei der Bestimmung der elastischen Kennwerte von wesentlicher Bedeutung. Sie darf weder kugel- noch würfelförmig sein [16]. Die Länge der Probe sollte ein vielfaches der Querabmessung betragen [72]. *Pohl* [18] schlägt zur genauen Berechnung der dynamischen E - und G -Moduli eine Länge der Probe von mindestens der vierfachen Höhe vor. Nach [16] sollte die Länge mindestens das 1,5-fache der größten Querabmessung betragen.

Sowohl in [72] als auch in [16] sind Korrekturfaktoren zur Berechnung von dynamischem E -Modul bzw. dynamischem Schubmodul in Abhängigkeit der Probekörpergeometrie angegeben.

Bei bestimmten geometrischen Verhältnissen können Eigenfrequenzen (Biegewellenresonanz, Dehnwellenresonanz oder Torsionswellenresonanz) eng benachbart sein oder zusammenfallen [16], [72]. *Leers* [74] stellte bei der Bestimmung der Resonanzfrequenz an Ziegeln (Format 250 x 125 x 65 mm³) fest, daß Torsions- und Biegeschwingung kaum voneinander zu unterscheiden waren.

Bei geeigneten Probekörperdimensionen kann das Verhältnis der drei Grundresonanzen in einem bestimmten Verhältnis angegeben werden [72]. Bei einer Betonprobe mit der Dimension 4 x 4 x 16 cm³ ist das Verhältnis der Dehn-: Torsions-: und Biegewellen-

resonanz gleich 1:0,58:0,43. *Berger* und *Wenzel* [9] geben für elastisch isotrope Materialien das Verhältnis Dehn-: Torsions-: und Biegewellenresonanz zu 1:0,58:0,52 an.

Bei der Bestimmung der elastischen Kennwerte mittels Resonanzfrequenz beeinflusst ferner die massebezogene Feuchtigkeit des Baustoffs das Ergebnis [16], [74].

Lokale Fehlstellen der Probekörper können mit dem Verfahren nicht erkannt werden.

Ein Vorteil der Resonanzfrequenzmethode gegenüber der Ultraschallmethode liegt darin, daß aus dem Elastizitätsmodul E_{dyn} und dem Schubmodul G_{dyn} die Poissonkonstante μ bestimmt werden kann:

$$\mu = \frac{E}{2 \cdot G} - 1 \quad (2.16)$$

Das Resonanzfrequenzverfahren ist gut geeignet, um im Werkstoff Veränderungen aufzuzeigen z.B. vor - nach einem Frost - Tau - Wechsel [74], vor - nach einer Steinfestigung.

Im Holzbau wird die Methode der Resonanzfrequenzmessung bereits seit vielen Jahren zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls angewandt [50].

2.1.5.5 Vergleich Ultraschallaufzeitmessung - Resonanzfrequenzmessung

Sowohl aus der Ultraschallaufzeitmessung als auch aus der Resonanzfrequenzmessung lassen sich spezifische elastische Kennwerte eines Materials bestimmen.

Die Differenzen zwischen den E-Moduli beider Messverfahren sind auf die unterschiedliche Art der Anregung zum Schwingen der Probekörper zurückzuführen [19]. Die Anwendung von Ultraschallimpulsen führt zur Ausbildung von Longitudinalwellen, die jedoch in ihrer Ausbildungsform von der Geometrie des Probekörpers beeinflusst sind. Bei der Resonanzfrequenzmessung wird der dynamische E-Modul aus der Biegeschwingung berechnet. Eine Übereinstimmung der berechneten E-Modulwerte der angewendeten Meßmethoden können aufgrund der Auswertung unterschiedlicher Meßgrößen nur in gewissen Grenzen erwartet werden [19], [72].

Leers [74] berichtet von vergleichenden Untersuchungen der E-Modul-Bestimmung nach der Ultraschall- und Resonanzfrequenzmethode an unterschiedlichen Materialien (z.B. Mörtel, Sandsteine, Ziegelerzeugnisse), bei denen sich ein guter linearer Zusammenhang ergab. Bei unterschiedlichen Materialien und gleichartigen Probekörpern konnte kein konstantes Verhältnis der E-Modul-Werte festgestellt werden.

Alfes [5] ermittelte, mithilfe des Ultraschallaufzeitverfahrens an Sandsteinen um 14 % höhere E-Moduli als mittels Resonanzfrequenzverfahren (Bestimmtheitsmaß $r^2 = 0,99$).

Die Ultraschallmethode besitzt gegenüber der Resonanzfrequenzmethode den Vorteil, daß sie an jedem beliebigen Prüfkörperformat eingesetzt werden kann [74]. Bei der Untersuchung großer Prüfkörper (z.B. Mauerwerkswänden) ist die Resonanzfrequenzmethode im Gegensatz zur Ultraschallmethode ungeeignet.

Leers [74] fand aber heraus, daß die Anwendung der Resonanzfrequenzmethode in Bezug auf ihre Repezierbarkeit größere Genauigkeit der Prüfergebnisse ergab.

Mittels der Resonanzfrequenzmethode kann die Poissonzahl μ bestimmt werden. Dies ist mit der Ultraschallaufzeitmessung auch möglich, wenn die Geschwindigkeiten v_l und v_t gemessen werden [74], [115].

Die Ortung von Fehlstellen kann wiederum nur mit der Ultraschallmethode durchgeführt werden. Grundsätzlich sind beide Messverfahren geeignet, um Veränderungen im Werkstoff (Temperatur, Festigung, Frost-Tau-Wechsel) aufzuzeigen [74].

2.1.6 Korrelationen der Messergebnisse aus Ultraschallaufzeit- und Resonanzfrequenzmessung mit physikalisch-mechanischen Gesteinseigenschaften

• Dynamischer E-Modul - Druckfestigkeit

Leers [74] berichtet von Versuchen, in denen für Porenbeton die Beziehung zwischen Druckfestigkeit und dynamischem bzw. statischem E-Modul wie folgt festgestellt werden konnte:

$$\beta_{D, st} \text{ [N/mm}^2\text{]} = \frac{E_{dyn}}{519} = \frac{E_{stat}}{500} \quad E_{dyn} \text{ und } E_{stat} \text{ in [N/mm}^2\text{]} \quad (2.17)$$

Oberhalb eines Festigkeitswertes von 0,5 N/mm² waren allerdings größere Streuungen erkennbar. Das Verhältnis E_{dyn}/E_{stat} wurde mit steigendem E-Modul kleiner.

Schubert/Glitz [107] untersuchten Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Mauersteinen mittels Resonanzfrequenzverfahren. Als Steinmaterial wurden Kalksandsteine und Hochlochziegel verwendet. Der Zusammenhang zwischen dynamischem E-Modul und Steindruckfestigkeit ließ sich über folgende Gleichung beschreiben

$$E_{dyn} \text{ [N/mm}^2\text{]} = 130 \cdot \beta_{D, st} \text{ [N/mm}^2\text{]} + 3500 \quad (2.18)$$

Alfes [5] konnte zwischen statischen Druck-E-Modul und der Druckfestigkeit unterschiedlicher Sandsteine keinen befriedigenden Zusammenhang feststellen.

Franke, Deckelmann und *Goretzky* haben in [46] zwischen dynamischem E-Modul und Druckfestigkeit an Vollziegeln folgenden Zusammenhang mit einem Regressionskoeffizienten von $r = 0,967$ festgestellt:

$$E_{dyn} \text{ [N/mm}^2\text{]} = 302 \cdot \beta_{D, st} \text{ [N/mm}^2\text{]} - 2450 \quad (2.19)$$

Die Ziegel wurden in Querrichtung durchschallt.

• Schallgeschwindigkeit - Druckfestigkeit

Leers [74] hat Untersuchungen zur Abhängigkeit der Druckfestigkeit verschiedener Mörtel und der Longitudinalwellen-Schallgeschwindigkeit durchgeführt. Unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten konnten Festigkeitsbereiche der Mörtel zugewiesen werden:

$$v = 3000 \text{ m/s} \quad \beta_{D, mö} = 1,5 \text{ bis } 4,5 \text{ N/mm}^2$$

Weimann/Wittmann [119] haben zerstörungsfrei die Ermittlung der Festigkeit von Säulen aus Naturstein mithilfe der Ultraschallaufzeitmessung ermittelt.

Die Druckfestigkeit der Sandsteinproben wurde an Bohrkernen $\varnothing 50 \text{ mm} / l = 145 \text{ mm}$ ermittelt. Für den Savonière - Kalkstein wurde die Druckfestigkeit $\beta_{D, st}$ als Funktion der Schallgeschwindigkeit v wie folgt ermittelt:

$$\beta_{D, st} \text{ [N/mm}^2\text{]} = 0,007 \cdot v \text{ [m/s]} - 11,6 \quad (2.20)$$

Die Autoren [119] kommen zu dem Schluß, daß die Ultraschallaufzeitmessung geeignet ist, die verbliebene Festigkeit von geschädigten Bauteilen aus Naturstein näherungsweise zu bestimmen.

Der Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und Druckfestigkeit wurde für Vollziegel in [46] mit einem Regressionskoeffizient $r = 0,975$ wie folgt ermittelt:

$$v \text{ [m/s]} = 41 \cdot \beta_{D, st} \text{ [N/mm}^2\text{]} + 389 \quad (2.21)$$

- **Statischer E-Modul - dynamischer E-Modul**

Der statische Elastizitätsmodul gibt entsprechend dem Hook'schen Gesetz die Steigung der Spannungsdehnungslinie an. Im Allgemeinen wird er als Sekantenmodul bei 1/3 der Festigkeit aus den Spannungsdehnungslinien berechnet. Der dynamische E-Modul ist der Tangentenmodul im Ursprung der Spannungsdehnungslinie. Daraus folgt:

$$E_{\text{dyn}} > E_{\text{stat.}} \quad (2.22)$$

Da der dynamische E-Modul gegenüber dem statischen E-Modul sehr viel einfacher, weniger aufwendig und zerstörungsfrei bestimmt werden kann, wird versucht, auf der Grundlage empirischer Formalismen den dynamischen E-Modul in den statischen E-Modul umzurechnen [9].

Leers [74] berichtet über zufriedenstellende Zusammenhänge zwischen statischem und dynamischem E-Modul.

Alfes [5] ermittelte bei Versuchen an Sandsteinen einen straffen Zusammenhang zwischen statischem und dynamischem E-Modul mit einem Bestimmtheitsmaß $r^2 = 0,98$:

$$E_{\text{stat}} [\text{N/mm}^2] = 0,49 \cdot E_{\text{dyn}} [\text{N/mm}^2] \quad (2.23)$$

Egermann [38] ermittelte für Mörtel folgende Beziehung mit einem Bestimmtheitsmaß $r^2 = 0,97$:

$$E_{\text{stat}} [\text{N/mm}^2] = - 520 + 0,46 E_{\text{dyn}} [\text{N/mm}^2] \quad (2.24)$$

- **Dynamischer E-Modul, Schallgeschwindigkeit - Porosität**

Bezüglich des Zusammenhanges dynamischer E-Modul und Porosität ermittelten sowohl *Alfes* [5], als auch *Hoffmann* [57], daß mit abnehmender Porosität der E-Modul der Sandsteine ansteigt. *Schön* [106] berichtet über zahlreiche Zusammenhänge der Ausbreitungsgeschwindigkeit elastischer Wellen von Steinen zu beispielsweise deren Dichte, Porosität, Temperatur. Die Geschwindigkeit-Porosität-Abhängigkeit tritt um so klarer hervor, je stärker die Eingrenzung auf eine Gesteinsart ist. Die bereits von *Alfes* [5] und *Hoffmann* [57] ermittelte Tendenz, daß mit abnehmender Porosität die Schallgeschwindigkeit und damit auch der dynamische E-Modul ansteigt wird von *Schön* [106] und *Leers* [74] bestätigt.

- **Schallgeschwindigkeit - Rohdichte**

Schön [106] stellt zahlreiche Beziehungen zwischen Gesteinsrohddichte und Longitudinalwellengeschwindigkeit dar, z.B. für magmatische Steine:

$$v_L [\text{km/s}] = 2,67 \cdot \rho [\text{g/cm}^3] - 1,08 \quad (2.25)$$

Grundsätzliche Tendenz ist, daß die Geschwindigkeit mit der Rohdichte zunimmt [74], [106].

- **Schallgeschwindigkeit - Temperatur**

Der Einfluß erhöhter Temperatur macht sich nach *Schön* [106] generell in einer Abnahme der Schallgeschwindigkeit bemerkbar.

- **Schallgeschwindigkeit - Festigungserfolg**

Mithilfe der Ultraschalllaufzeitmessung haben *Dimmig* und *Erfurt* [19] Tiefenprofile gefestigter Sandsteine erstellt. Der Festigungserfolg konnte durch die Änderung der Ultraschalllaufzeit ermittelt werden. Mit zunehmender Verfestigung erhöhte sich die Schallgeschwindigkeit. Die anschließende Segmentierung der Bohrkerne und Bestimmung der zweiaxialen Biegezugfestigkeit gibt weiteren Aufschluß über den Festigungserfolg.

- **Schallgeschwindigkeit - Schadenszustand**

Fitzner und *Heinrichs* [43] ermittelten eine Klassifizierung des Schadenszustands anhand von Ultraschallgeschwindigkeiten. Tendenziell war der Schaden mit abnehmender Schallgeschwindigkeit größer.

2.2 Folgerungen für das Versuchsprogramm

Ein Überblick bereits angewandter Verfahren zur Sicherung historischen Mauerwerks enthält Kapitel 2.1.2. *Maus* und *Wenzel* [122] haben im Rahmen von Nachuntersuchungen an ingenieurmäßig sanierten Mauerwerksbauten Vor- und Nachteile der Sicherungsmethoden zusammengetragen.

Zur Festigung von Mauerziegeln und Mörtel bzw. ganzer Mauerwerkswände mit Steinfestigungsmitteln konnten in der Literatur keine Angaben gefunden werden.

Die Wirkung von zwei unterschiedlichen Steinfestigern in Bezug auf die Tragfähigkeits-erhöhung alten Mauerwerks (aus Sandsteinen oder Ziegeln) wird im experimentellen Teil dieser Arbeit untersucht.

Aus der Literaturrecherche wird deutlich, daß Steinfestigungsmittel in ihrer Wirkungs-weise je nach Steinart unterschiedlich sind [102].

In der Denkmalpflege werden Steinfestigungsmittel schon seit Jahren erfolgreich ein-gesetzt (Kapitel 2.1.4.). Die bisherigen Untersuchungen der Wirkungsweise von Stein-festigungsmitteln z.B. [7], [47], [49], [102] beziehen sich auf die Wirkung und Dauerhaf-tigkeit von Steinfestigungsmitteln im Hinblick auf die Verwitterungsbeständigkeit be-handelter Fassaden oder Steindenkmäler.

Parallel zur Tragfähigkeitsuntersuchung an verfestigten und unverfestigten RILEM-Körpern werden auch Untersuchungen an verfestigten und unverfestigten Einzelprüf-körpern durchgeführt (Verwitterungsbeständigkeit, Porosität, Dichte, Rohdichte, Festig-keitsparameter).

Der Vorteil des Einsatzes von Steinfestigungsmitteln zur Erhöhung der Tragfähigkeit liegt insbesondere darin, daß das äußere Erscheinungsbild des zu erhaltenden Mauer-werks nicht verändert wird.

Über eventuelle Nachteile für das mit einem Steinfestigungsmittel behandelte histori-sche Mauerwerk sollen eigene experimentelle Versuche Aufschluß geben.

Die Anwendungsmöglichkeiten der bekannten zerstörungswarmen/-freien Prüfmetho-den (Kapitel 2.1.5) sollen hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf die besonderen Probleme historischen Mauerwerks untersucht werden, insbesondere auch im Hinblick auf deren Verfestigung. Dabei kommen im experimentellen Teil dieser Arbeit die Ultraschallauf-zeit- und Resonanzfrequenzmessung zur Anwendung.

Bei der Anwendung beider Verfahren ist zu berücksichtigen:

- Einfluß der Stoffeuchte auf die Schallgeschwindigkeit bzw. Resonanzfrequenz [74]
- Richtungsabhängigkeit der Schallwellen bei anisotropen Materialien [9]
- Probekörpergeometrie [16], [17], [74].

Die Bohrwiderstandsmessung ist im experimentellen Teil dieser Arbeit nach einigen Vorversuchen nicht weiter zum Einsatz gekommen (Kapitel 4.1.1).

Aus den Kenngrößen der experimentell ermittelten Ultraschallaufzeit- und Resonanz-frequenzmessungen werden mögliche Korrelationen zu physikalisch-mechanischen Gesteinseigenschaften gesucht (analog zu Kapitel 2.1.6).

Egermann und *Mayer* [37] weisen darauf hin, daß obwohl die Erfolge der ersten Untersuchungen zum Einsatz zerstörungsfreier Verfahren sehr vielversprechend sind, dennoch eine Probennahme am Bauwerk durch die zerstörungsfreien Verfahren nicht abgelöst wird, sondern nur wertvoll unterstützt, denn die zerstörenden Eingriffe können so auf ein Mindestmaß beschränkt werden.

3 Versuchsprogramm

3.1 Untersuchungsmaterial

3.1.1 Steine

3.1.1.1 Ziegel

Für die Untersuchungen wurden sowohl historische Ziegel als auch fabrikneue Ziegel verwendet. Wie bereits in Kapitel 2.1.1.2 erläutert, weisen historische Ziegel eine Streuung der mechanischen Eigenschaften bis über 70% auf (Streuung nach [45] ausgedrückt als Abstand der 5% Fraktile zum Mittelwert, bezogen auf den Mittelwert: $[\beta_{D,st} - \beta_{D,st(5\%)}]/\beta_{D,st}$).

Untersuchungen von *Egermann* und *Mayer* [37] ergaben, daß mechanische Eigenschaften der Mauerziegel stark von der Rohstoffzusammensetzung, vom Formgebungsverfahren und von der Brenntechnik beeinflusst werden (siehe auch Kapitel 2.1.1.2). In eigenen Untersuchungen wiesen historische Ziegel Druckfestigkeiten zwischen 6,5 N/mm² und 25 N/mm² auf. Auch von *Hoffmann/Hofmann* [58] sind bei historischen Ziegeln stark streuende Druckfestigkeiten zwischen 5 N/mm² und 20 N/mm² festgestellt worden.

Um eine Aussage über die festigende Wirkung von Steinfestigern auf Ziegel treffen zu können, d.h. einen Bezug zu "Null"-Serien (ungefestigte Ausgangseigenschaft) herstellen zu können, wurden neben historischen Ziegeln auch in ihren Eigenschaften wenig streuende fabrikneue Ziegel verwendet.

Die historischen Abbruchziegel stammten alle aus Abbruchobjekten in Nienburg/Weser. Bauamtlichen Unterlagen konnte entnommen werden, daß die Abbruchziegel ein Alter von ca. 100 Jahren aufwiesen. Die historischen Ziegel besaßen Abmessungen von 250 x 120 x 65 mm³. Dies entsprach dem "Reichsformat", einem einheitlichen Ziegel-Standardformat, welches Ende des 19. Jahrhunderts in Deutschland eingeführt wurde.

Nach Untersuchungen an historischen Ziegeln [10], [39], [45] liegen die durchschnittlichen Druckfestigkeiten bei $\beta_{D,st} \leq 20$ N/mm².

Für Versuche an fabrikneuen Ziegeln wurden Mauerziegel nach DIN 105 [20] VMz 8 - 1,8 - NF verwendet, um den historischen Ziegeln hinsichtlich Festigkeit, Abmessung und Rohdichte ähnliche Ziegel zu verwenden.

3.1.1.2 Natursteine

Für die Untersuchungen wurden 3 Sandsteinarten ausgewählt, die sich hinsichtlich Festigkeit, Porosität und Bindungsart unterscheiden und in Niedersachsen seit Jahrhunderten üblich sind:

- Obernkirchener Sandstein,
- Roter Wesersandstein,
- Rüthener Grünsandstein.

Um Aussagen über die Wirkung der Steinfestigung auf die physikalisch-mechanischen Eigenschaften der Sandsteine im Verhältnis zum Ausgangsmaterial (ungefestigte "Nullserien") treffen zu können, wurden wegen der gleichen Gesteinseigenschaften unverwitterte, bruchfrische Proben verwendet.

Tabelle 3.1 gibt einen Überblick der untersuchten Sandsteinarten.

Tabelle 3.1: Überblick über die untersuchten Sandsteinarten

Handelsname	Rüthener Grünsandstein	Obernkirchener Sandstein	Roter Wesersandstein
Abbauort	Rüthen, Sauerland (Westfalen)	Obernkirchner Sandsteinbruch in Obernkirchen	Natursteinwerk Linnenberg, Steinbruch Heidwinkel in Linnenberg
Megaskopischer Überblick	graugrüner, mittelsandiger und fein- bis mitelporiger, glaukonitführender Sandstein	Homogener, kieseliger, grobsiltiger bis feinsandiger Sandstein, grauweiße bis gelblichweiße Färbung z.T. mit blasser Eisenbänderung.	Roter, feinsandiger, feinporiger bis dicht erscheinender Sandstein, glimmerführend, Sandnester bis zu 5 mm Größe.
Petrographische Beschreibung	Komponenten: 69% Bindemittel: 10% sichtbarer Porenraum: 21%	Komponenten: 81% Bindemittel: 13% sichtbarer Porenraum: 4%	Komponenten: 76% Bindemittel: 17% sichtbarer Porenraum: 7%
Komponenten in Vol.-%	Quarz: 81% Glaukonit: 13% Limonit: 4% Baryt: 2%	Quarz: 91% Titanoxyd: 6%	Quarz: 52% Gesteinsbruchstücke: 27% Alkalifeldspat: 14% Glimmer: 4% Plagioklas: 3%
Struktur	mittelsandig, gute Sortierung, Korngrößenbereich 0,2-0,3 mm	Korngröße 0,04-0,15 mm, gut sortiert	Korngröße 0,06-0,2 mm, Sortierung mäßig bis gut
Bindemittel	barytisch-kieslig-tonig	Kornbindung beruht auf suturierten Kornkontakten und Quarz-Anwachsräumen	tonig-ferritische Bindung beruht auf inniger Verzahnung der Körner entlang von suturierten Kornkontakten
Sichtbarer Porenraum	hauptsächlich Interpartikelporen, daneben Intrapartikelporen. Größenbereich 0,7 mm und kleiner, häufigste Größe 0,2 mm.	Interpartikelporen, häufigste Porengröße 0,02-0,05 mm, Poren bereichsweise von neugebildetem, lockermaschigem Kaolit gefüllt.	Interpartikelporen und Partikellösungsporen. Häufigste Porengröße 0,02-0,1 mm; Poren sind z.T. mit toniger Substanz, z.T. mit Quarzement ausgekleidet.
Verwendung	Massivbau, Gliederungselemente an Fassaden und Portalen, Denkmäler, Bildhauerei	Massivbau, Bodenplatten, Treppen, Fensterbänke, Wandplatten innen und außen, Gliederungselemente an Fassaden, Denkmäler, Bildhauerei	Massivbau, Dachdeckung, Bodenplatten, Treppen, Fensterbänke außen, Gliederungselemente an Fassaden, Denkmäler, Bildhauerei

Die Angaben in Vol.-% bezüglich der Komponenten des Rüthener Grünsandsteines und des Obernkirchener Sandsteins wurden von den Steinbrüchen mitgeteilt. Das Natursteinwerk Linnenburg (Roter Wesersandstein) konnte keine Angaben zur

petrographischen Zusammensetzung machen, so daß diese Werte dem "Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland" [51] entnommen werden mußten.

Die drei Sandsteine wurden von den jeweiligen Steinbrüchen in größeren Blöcken geliefert, auf denen die Schichtungsrichtung gekennzeichnet war. Aus den Blöcken wurden im Labor die Probekörper naß herausgesägt (Abbildung 3.1).

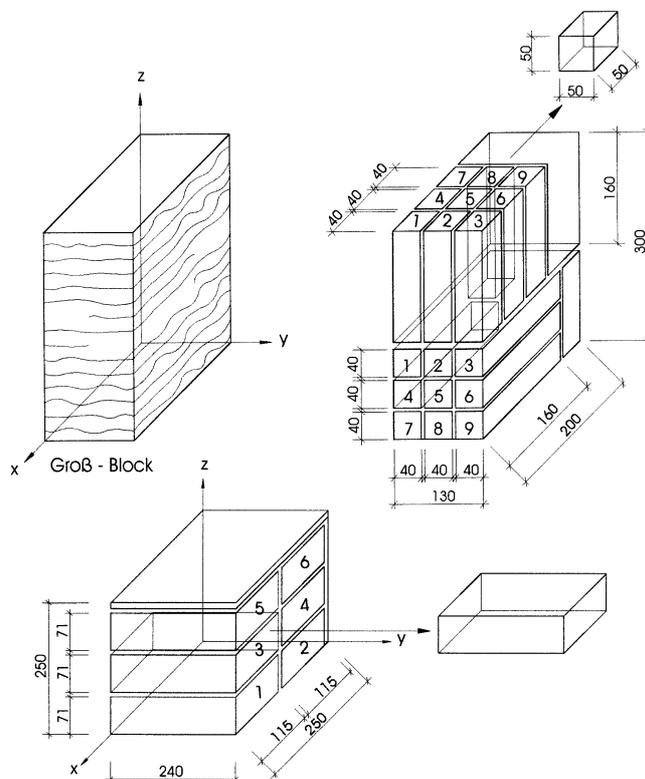


Abbildung 3.1: Probengewinnung aus den Blöcken und Orientierung zur Schichtung

Dabei bedeutet in dieser Arbeit grundsätzlich:

z-Richtung: quer (senkrecht) zur Schichtebene,

x-Richtung: längs zur Schichtebene, also in der Ebene der Schichtung.

Alle Probekörper wurden nach dem Sägen bei einheitlichen Laborbedingungen, 20° C und 65% relativer Luftfeuchte, mindestens 4 Wochen gelagert.

3.1.2 Mörtel

Da bei alten Mauerwerksbauten häufig Mörtel angetroffen werden, deren Druckfestigkeit unter dem nach DIN 1053 - 1 [21] geforderten Wert von $f_{D,m\ddot{o}} = 2,5 \text{ N/mm}^2$ (für tragendes Mauerwerk) liegt, [55], [60], [70], [89], [108], [116], wurden für die Versuche ebenfalls niedrige Mörteldruckfestigkeiten angestrebt. Der Mörtel sollte jedoch soviel Bindemittel enthalten, daß die damit hergestellten Mauerwerksprüfkörper eine gewisse Eigenfestigkeit aufwiesen, um Lagerungsfähigkeit und Transportierbarkeit zu garantieren. In Vorversuchen wurde in Anlehnung an die Mörtelzusammensetzung gemäß DIN 1053-1, Tabelle A.1 ein geeignetes Mischungsverhältnis (in Raumteilen) untersucht. Die Ergebnisse sind Anhang 3.1 zu entnehmen.

Die Mörtel mit Mischungsverhältnissen Weißkalkhydrat : Sand = 2:6 bzw. 2:5 bzw. 2:4 erwiesen sich alle als zu "weich". Ihre Druckfestigkeiten lagen bei maximal 0,5 N/mm² (für Weißkalkhydrat: Sand = 2:4).

Ein geringer Zementzusatz erhöhte die Druckfestigkeit bei guter Verarbeitbarkeit im Labor. Als Zement wurde Portlandzement CEM I 32,5 R gewählt. Der Mauer sand stammte aus der Grube Bolsehle im Kreis Nienburg. Die Sieblinie des Sandes ist in Abbildung 3.2 dargestellt.

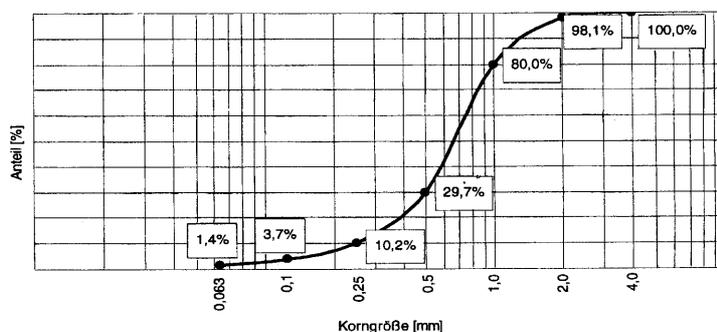


Abbildung 3.2: Sieblinie des Mauer sandes aus der Grube Bolsehle

Für alle Mörtelversuche und Mauerwerkskörper wurde Mörtel im Mischungsverhältnis (RT) Weißkalkhydrat : Zement : Sand = 2:0,5:8 verwendet. Die Wasserzugabe erfolgte bis der Mörtel "kellengerecht" war. Aus den Frischmörteln, die jeweils zum Mauern der RILEM-Körper hergestellt wurden, sind jeweils Mörtelproben für mindestens drei Prismen 4x4x16 cm³ entnommen worden.

Die in der Stahlschalung hergestellten Mörtelprismen wurden gemäß DIN 18 555 Teil 3 [23] Tabelle 1 gelagert. Die Prüfung der Biegezug- und Druckfestigkeit erfolgte gemäß DIN 18 555 Teil 3 [23], die Druckfläche der Mörtelprismenhälften betrug 2500 mm².

3.1.3 Steinfestiger

Für die Untersuchungen der Festigungswirkung wurden zwei Steinfestiger ausgewählt, die auf unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen basieren.

Der im folgenden mit "S" bezeichnete Steinfestiger basiert auf Kiesel-Säure-Ethylester (KSE). Wie bereits in Kapitel 2.1.4 beschrieben, haben sich die KSE-Festiger in den vergangenen 20 Jahren als wirksame Festiger ohne offensichtliche Nachteile etabliert [40], [90], [101], [102]. Der verwendete Steinfestiger "S" ist ein Einkomponenten-System. Dem zugehörigen technischen Merkblatt ist zu entnehmen: "...Mit Hilfe eines neutralen Katalysators tritt zwischen dem Kieselsäure-Ethylester und der Luftfeuchtigkeit bzw. mit dem an den Kapillarwandungen anhaftenden Wasser eine Reaktion ein. Hierbei wird als neues Bindemittel Kieselsäuregel, eine glasartige Substanz gebildet. Als Nebenprodukt entsteht Ethanol, das sich verflüchtigt."

Der zweite Steinfestiger, im folgenden mit "T" bezeichnet, ist laut Produktmerkblatt ein wasserlösliches Konzentrat modifizierter Silane mit Alkylketten. Das Produkt wirkt sowohl festigend als auch hydrophobierend. Nähere Angaben zu den Molekülketten werden nicht gemacht.

Festiger "T" ist im Verhältnis 1:1 bis 1:4 mit Wasser verdünnbar. Die in diesen Mischungsverhältnissen angesetzten Lösungen sind 24 h verwendbar, das reine Konzentrat 12 Monate im geschlossenen Behälter.

In Vorversuchen, die Ergebnisse sind in Anhang 3.2 enthalten, wurde das geeignete Mischungsverhältnis Konzentrat : Wasser ermittelt. Die einzelnen Steine wurden 4 Stunden vollständig im jeweiligen Mischungsverhältnis getränkt. Nach dreiwöchiger

Lagerung im Laborklima bei 20° C und 65% rel. Luftfeuchte, wurde die Massenzunahme der ausgehärteten Proben festgestellt. Bei einem Mischungsverhältnis Wasser : Festiger "T" 2 : 1, ergab sich bei allen Steinen eine Massenzunahme in %, die hinsichtlich des Mitteleintrages als ausreichend angesehen werden konnte.

Vergleichende Untersuchungen bezüglich der physikalisch - mechanischen Eigenschaften bei unterschiedlichen Mischungsverhältnissen wurden nicht durchgeführt, wären aber im Rahmen weitergehender Voruntersuchungen insbesondere im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit von Interesse.

Vorversuche sind jedoch beim Einsatz von Steinfestigungsmitteln an historischen Bauwerken unerlässlich, wie folgendes Beispiel eindringlich verdeutlicht. In einer an der FH Hannover von Dipl.Ing. Hofmann und Dipl.Ing. Hoffmann angefertigten Diplomarbeit [58] wurde ein Festiger untersucht, - im folgenden "B" genannt - der ebenfalls nicht auf KSE-Basis aufbaut. Dem Produktmerkblatt war zu entnehmen, daß es sich um ein hydrophobierendes, mineralisches Verfestigungsmittel handelte. Weiterhin war angegeben, daß das Konzentrat anorganische und organische, z.T. katalytisch wirksame Komponenten enthält. Es wurde ausdrücklich darauf hingewiesen, daß der Festiger keine Silikone und keinen Kieselsäureester enthält. In einem in Vorversuchen festzulegendem Mischungsverhältnis sollte das Konzentrat mit Wasser verdünnt werden.

Nach Tränkung von Ziegel- und Natursteinproben mit "B" war nach der Aushärtung zunächst ein lasurartiger Überzug sichtbar. Nach 24-stündiger Lagerung an der Luft traten sowohl an historischen, als auch an fabrikneuen Ziegeln Ausblühungen auf, nach einigen Tagen teilweise sogar Schimmelbildung.

Dieses Beispiel zeigt eindringlich, daß Vorversuche bei der Anwendung von Steinfestigungsmitteln unverzichtbar sind.

3.2 Mauerwerkskörper ("RILEM"-Körper)

Als Mauerwerksprüfkörper wurde der sogenannte "RILEM-Körper" gewählt. Dieser Prüfkörper hat entsprechend der RILEM-Empfehlung [98] bzw. den Angaben der DIN 18554 Teil 1 [22] eine Breite b von 2 Steinen (hier = 49 cm), eine Dicke d von einer Steinbreite (hier = 11,5 cm) und eine Höhe von 5 Steinschichten (hier: beim NF-Format ≈ 40 cm). Die Prüfkörper wiesen somit eine Schlankheit von $h/d \approx 3,5$ auf.

RILEM-Körper wurden jeweils aus fabrikneuen Ziegeln, historischen Ziegeln, Obernkirchener Sandstein, Rotem Wesersandstein und Rüthener Grünsandstein hergestellt. Die Steine für die RILEM-Sandsteinkörper sind aus vom Sandsteinbruch gelieferten Großblöcken naß im Format 240 x 115 x 71 herausgesägt worden siehe Kapitel 3.1.1.2, Abbildung 3.1. Zur Vorkonditionierung wurden die naß gesägten Sandsteine mindestens vier Wochen bei Laborklima (20°C / 65% rel. Luftfeuchte) gelagert.

Ein RILEM-Prüfkörper mit Meßstellenanordnung der induktiven Wegaufnehmer entspricht den Angaben der DIN 18554, Teil 1 [22] und ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Die Angaben in Klammern beziehen sich auf die rückseitigen Meßstellen.

Die untere Steinschicht jedes Prüfkörpers wurde auf einer ebenen Stahlplatte in Zementmörtel (Zement : Sand = 1:1 in Raumteilen) verlegt. Die weiteren Steinschichten wurden mit Mörtel-Gruppe I (siehe Kapitel 3.1.2) im Läuferverband gemauert, die Dicke der Lagerfugen betrug dabei im Mittel 12 mm, die der Stoßfugen 10 mm. Die Mauersteine wurden vor dem Vermauern eine Minute vorgeätzt. Die RILEM-Körper wurden bis zum Prüfzeitpunkt wiederum im Laborklima (20° C/65% rel. Luftfeuchte) gelagert.

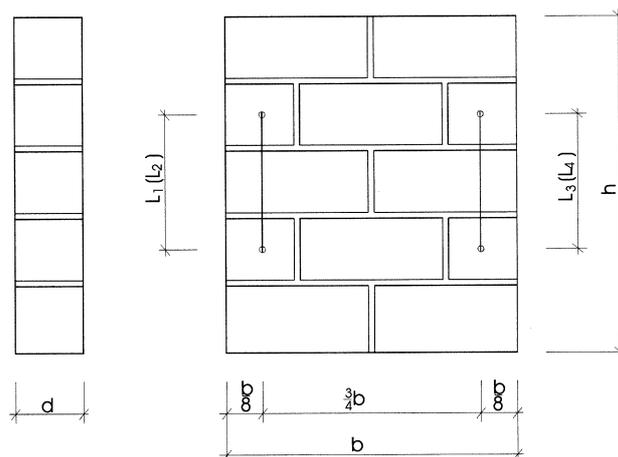


Abbildung 3.3: RILEM-Prüfkörper mit Meßstellenanordnung

Die ungefestigten Prüfkörper wurden im Alter von 28 Tagen geprüft, die gefestigten Prüfkörper dagegen im Alter von 40 Tagen (siehe Kapitel 3.4.1).

Wie unter Kapitel 3.1.2 ausgeführt, wurden aus dem zum Mauern der RILEM-Prüfkörper verwendeten Frischmörtel jeweils Mörtelproben für Prismensätze 4cm x 4cm x 16 cm entnommen. Diese wurden zum gleichen Zeitpunkt wie die Mauerwerkskörper gemäß DIN 18 555 Teil 3 [23] geprüft.

Bei den gefestigten Mauerwerkskörpern, die erst nach 40 Tagen geprüft wurden, wurden immer zusätzlich auch drei Prismen im Alter von 28 Tagen geprüft.

3.3 Messgeräte zur zerstörungsfreien Materialprüfung

3.3.1 Ultraschall-Meßgerät

Die Ultraschalllaufzeit wurde mit dem Gerät "Typ BP5" der SUSPA Spannbeton GmbH ermittelt. Die Sendefrequenz der Prüfköpfe beträgt 50 kHz, deren Durchmesser 30 mm. Als Kopplungsmittel zwischen Prüfkopf und Prüfkörper wurde Vaseline verwendet.

Mit Hilfe des Ultraschallmeßgerätes wird die Longitudinalwellengeschwindigkeit v_L aus der Länge l des Prüfkörpers und der am Gerät abzulesenden Schalllaufzeit t ermittelt :

$$v_L \text{ [km/s]} = l \text{ [mm]} / t \text{ [\mu s]} \text{ (s. auch Kap. 2.1.5.3).}$$

Der dynamische E-Modul kann mittels Gl. (2.13) oder (2.14) berechnet werden.

3.3.2 Resonanzfrequenz-Meßgerät

Die Resonanzfrequenzmessung erfolgte mit dem Gerät "GrindoSonic-Typ MK5 Industrial" der J.W. Lemmens GmbH.

Nach der Anregung des Prüfkörpers mit einem Anschlaghammer und der Registrierung mittels Schwingungsaufnehmer wird die gemessene Frequenz in kHz am Gerät angezeigt. Mithilfe des zugehörigen PC-Programms EMOD lassen sich unter Berücksichtigung der Form, den Abmessungen und des Gewichts des Prüfkörpers die Ergebnisse für den dynamischen E-Modul, den G-Modul und der Poisson'schen Zahl ermitteln.

Die Ermittlung des E- und G-Moduls per Handrechnung ist nach Heft 422, Seiten 29-31 [16] auch möglich, aber aufwendig.

Kontrollrechnungen nach [16] ergaben bis auf eine Nachkommastelle genaue Übereinstimmung mit den Ergebnissen des in dieser Arbeit verwendeten EMOD-Programms.

3.4 Durchgeführte Laborversuche

3.4.1 Festigung der Steine, des Mörtels und der Mauerwerkskörper

Zur Untersuchung des Einflusses der Festigung auf die physikalisch-mechanischen Eigenschaften der Einzelprüfkörper (Sandsteine, Mörtel oder Ziegel) wurden die Materialien bis zu dreimal 4 Stunden im Steinfestiger "S" bzw. "T" getränkt. In der ersten Stunde wurden alle Proben nur bis zur Hälfte in den Steinfestiger getaucht, so daß sich der Festiger kapillar in das Probenmaterial saugen und die Luft in den Poren nach oben entweichen konnte. In Vorversuchen wurde festgestellt, daß eine über 4 h hinausgehende Tränkungsdauer keine nennenswerte Erhöhung des Mitteleintrages bewirkte. Bei zu langen Tränkungszeiten führt die rasche Verdunstung des Lösungsmittels zu einer relativen Erhöhung des Wirkstoffgehaltes und im Kontakt mit dem Feuchtegehalt der umgebenden Luft zu beginnender Hydrolyse, was sich in einer Erhöhung der Viskosität bemerkbar macht [102]. Um eine verfrühte Gelbildung zu verhindern, wurden die Behälter mit den getränkten Proben durch eine Folie abgedeckt.

In Voruntersuchungen stellte sich weiterhin heraus, daß ein Zeitraum von 2 Wochen bei den gewählten Klimakonditionen (20° C / 65% rel. Luftfeuchte) für die chemisch/physikalische Reaktion ausreicht, um gegebenenfalls weitere Tränkungen vorzunehmen.

Die Einzelprüfkörper wurden in Abständen von jeweils zwei Wochen bis zu dreimal getränkt. Nach einer anschließenden Aushärtungsdauer von mindestens drei Wochen wurden die Steine geprüft.

Die Festigung der RILEM-Körper erfolgte an beiden Längsseiten mit dem Pinsel im Streichverfahren. Sie wurden 2-fach gefestigt, wobei eine Festigung mit dem Pinsel jeweils naß-in-naß erfolgte, bis der Mauerwerkskörper keinen Festiger mehr aufnahm. Pro Festigung betrug der Verbrauch für die Ziegelprüfkörper ca. 5 Liter/m², für die Sandsteinprüfkörper ca. 4 Liter/m².

Die RILEM-Körper wurden drei Wochen nach ihrer Herstellung das erste Mal gefestigt, eine Woche später erfolgte die zweite Festigung. Nach 12 Tagen Aushärtung wurde die Prüfung der Druckfestigkeit durchgeführt, d.h., das gefestigte Mauerwerk war zum Zeitpunkt der Prüfung 40 Tage alt.

3.4.2 Versuche an Einzelprüfkörpern

Die unterschiedlichen Untersuchungsmaterialien bei zwei Steinfestigern sowie die verschiedenen physikalisch-mechanischen Untersuchungsziele erforderten eine Vielzahl von Einzelprüfungen. Ein Überblick über die durchgeführten Versuche an den Einzelprüfkörpern ist nachfolgender Tabelle 3.2 zu entnehmen.

Tabelle 3.2: Überblick durchgeführter Versuche an Einzelprüfkörpern

Untersuchte Parameter	Materialien					
	Fabrikneue Ziegel	Historische Ziegel	Mörtel (MGI)	Roter Wesersandstein	Rüthener Grünsandstein	Obernkirchener Sandstein
Druckfestigkeit	x	x	x	x	x	x
Biegezugfestigkeit			x	x	x	x
Statischer E-Modul				x	x	x
Dynamischer E-Modul	x	x	x	x	x	x
Wasseraufnahme	x	x	x	x	x	x
Aufnahme Festiger	x	x	x	x	x	x
Gesamtporosität	x	x		x	x	x
Dichte	x	x		x	x	x
Porenradienverteilung	x	x		x	x	x
Rohdichte (lufttrocken)	x	x	x	x	x	x
Trockenrohichte	x	x	x	x	x	x
Frost-Tau-Wechsel	x	x	x	x	x	x

Alle Prüfungen wurden sowohl an unverfestigten "Null-Proben" als auch an ein- bis dreifach gefestigten Materialien durchgeführt. Die Probekörpergeometrie war bei den einzelnen Prüfungen unterschiedlich.

- Für die Festigkeitsprüfungen:

Ziegel	aufeinander gemauerte Steinhälften	
Mörtel	Prismen	4cm x 4cm x 16cm
Sandsteine	Prismen	4cm x 4cm x 16cm
	Würfel	5cm x 5cm x 5cm

- Für den statischen E-Modul:

Sandsteine	Prismen	4cm x 4cm x 16cm
------------	---------	------------------

- Für den dynamischen E-Modul:

Ziegel	ganzer Stein	
Mörtel	Prismen	4cm x 4cm x 16cm
Sandsteine	Prismen	4cm x 4cm x 16cm

- Für die Wasseraufnahme:

Ziegel	ganzer Stein	
Mörtel	Prismen	4cm x 4cm x 16cm
Sandsteine	Prismen	4cm x 4cm x 16cm

- Für die Frost-Tau-Wechsel:

Ziegel	ganzer Stein	
Mörtel	Prismen	4cm x 4cm x 16cm
Sandsteine	Würfel	5cm x 5cm x 5cm

Die Proben der Sandsteine wurden aus den gelieferten Blöcken herausgesägt, wie in Kapitel 3.1.1.2, Abbildung 3.1, dargestellt.

In Kapitel 4 werden die durchgeführten Prüfungen und Prüfergebnisse im Einzelnen beschrieben.

3.4.3 Versuche an RILEM-Körpern

Die mit Mörtelgruppe I (siehe Kapitel 3.1.2) aufgemauerten RILEM-Körper wiesen eine Schlankheit von $h/d \approx 3,5$ auf. Die ungefestigten RILEM-Körper wurden im Alter von 28 Tagen geprüft, die gefestigten im Alter von 40 Tagen, wie in Kapitel 3.4.1 ausgeführt.

Die RILEM-Körper wurden unter zentrischer gleichmäßig verteilter Belastung geprüft. Die Prüfung erfolgte in einer 4000 kN Druckprüfmaschine.

Die Belastung wurde stufenlos mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit aufgebracht, so daß die Bruchlast nach ca. 15 Minuten eintrat. Die Belastung der RILEM-Körper erfolgte über den Bruch hinaus. Während der Belastung wurde die Lasten beim ersten Ausbröckeln des Mörtels aus den Fugen, bei ersten sichtbaren Rissen sowie im Bruchzustand registriert.

An allen RILEM-Körpern wurden die nach Abbildung 3.2 vorgesehenen Verformungsmessungen vorgenommen. Die vertikalen Verformungen der RILEM-Körper wurden an 4 Meßstrecken, zwei an Vorder- und zwei an der Rückseite, mit induktiven Wegaufnehmern gemessen. Die Meßsignale der Wegaufnehmer sowie der Kraftaufnehmer wurden an eine Vielstellenmeßanlage übertragen und von dort an einen PC mit entsprechender Software (HBM-catman) weitergeleitet und ausgewertet.

Die Prüfung der Mörtelproben erfolgte parallel zur Prüfung des Mauerwerks.

Vor jeder Druckfestigkeitsprüfung der RILEM-Körper wurde die Schalllaufzeit der Steine mittels Ultraschall gemessen. Dies sollte vor allen Dingen der Ermittlung einer veränderten Schalllaufzeit vor und nach einer Festigung mit Steinfestigungsmittel "S" bzw. "T" dienen.

An den nachfolgend in Tabelle 3.3 aufgeführten RILEM-Körpern sind die Druckfestigkeit und der Elastizitätsmodul gemäß DIN 18 554 Teil 1 [22] bestimmt worden.

Tabelle 3.3: Anzahl der RILEM-Körper für die Druckfestigkeitsprüfung sowie E-Modul Bestimmung

Material	Festigungs-grad/ -mittel	Anzahl
Fabrikneue Ziegel NF (240x115x71 mm ³)	ungefestigt	25
	gefestigt mit S	20
	gefestigt mit T	8
Historische Ziegel Reichsformat (250x120x65 mm ³)	ungefestigt	8
	gefestigt mit S	3
	gefestigt mit T	3
Obernkirchener Sandstein NF (240x115x71 mm ³)	ungefestigt	5
	gefestigt mit S	3
	gefestigt mit T	3
Roter Wesersandstein NF (240x115x71 mm ³)	ungefestigt	3
	gefestigt mit S	3
	gefestigt mit T	3
Rüthener Grünsandstein NF (240x115x71 mm ³)	ungefestigt	3
	gefestigt mit S	3
	gefestigt mit T	3

4 Versuchsdurchführung und Prüfergebnisse

4.1 Vorversuche

4.1.1 Bohrwiderstandsmessung

Mithilfe eines am Fraunhofer-Institut für Bauphysik entwickelten Bohrwiderstandsmeßgerätes "DURABO – Bohrhärteprüfgerät" wurden Vorversuche an Ziegeln, Sandsteinen und Mörteln durchgeführt. Als Bohrer wurden Diamantbohrer \varnothing 3 mm verwendet, weil sich Bohrwiderstandsmessungen mit handelsüblichen Bohrern wegen der schnellen Abnutzung als unbrauchbar erwiesen haben, siehe auch Kapitel 2.1.5.2.

Laut Herstellerangaben sollen Bohrtiefen von 25 mm nicht überschritten werden, da Reibungskräfte bei größeren Tiefen zunehmend große Fehler verursachen.

Aufgrund folgender Untersuchungsergebnisse der Bohrwiderstandsmessung wurde hier jedoch diese zerstörungsarme Prüfmethode nicht weiter eingesetzt:

I) Um die Eigenschaften ungefestigter und gefestigter Prüfkörper miteinander vergleichen zu können, wurden bruchfrische Sandsteinproben verwendet. Der Anpressdruck des Bohrwiderstandmeßgerätes war auf 3 kg begrenzt. Der maximale Anpressdruck von 3 kg war aber zu gering, um die ein- bis dreifach gefestigten Probekörper anzubohren. Der Bohrer drang nur bis zu 2 mm ein. Für eine Erfolgskontrolle der durchgeführten Steinfestigung an bruchfrischen Sandsteinen war dieses Verfahren daher nicht geeignet.

II) Die Anwendung der Bohrwiderstandsmessung bei Ziegeln erwies sich besonders in Hinblick auf die Klüftigkeit historischer Ziegel als problematisch. Aufgrund von Unstetigkeiten im Bohrwiderstandsmessprotokoll infolge von Hohlstellen konnte die Bohrhärte aus der Steigung der aufgezeichneten Kurve nicht zuverlässig ermittelt werden.

III) Bei den geringen Mörtelfestigkeiten ($\beta_{D,m\ddot{o}} = 0,8$ und $1,5$ N/mm²) mußte für die ungefestigten Mörtel der kleinste Anpressdruck (1 kg) gewählt werden. Da die gefestigten Mörtel Festigkeitssteigerungen von über 100 % aufwiesen, mußten höhere Anpressdrücke (2 – 3 kg) verwendet werden, womit die Einzelergebnisse gefestigter – ungefestigter Mörtel nur noch bedingt vergleichbar waren.

In [82] konnten bei unterschiedlichen Mörtelfestigkeiten gute Zusammenhänge zwischen Biegezug- bzw. Druckfestigkeit und der Bohrhärte nachgewiesen werden. Die Bohrhärte des Fugenmörtels stieg erwartungsgemäß mit zunehmender Druckfestigkeit an.

In Verbindung mit zerstörenden Druckfestigkeitsprüfungen bei Mörtel ist die Korrelation mit der Bohrhärte erfolversprechend, so daß diese zerstörungsarme Prüfmethode in einer weiterführenden Arbeit genauer untersucht werden sollte.

4.1.2 Einflüsse auf die Ultraschall- und Resonanzfrequenzmessung

4.1.2.1 Stoffeuchte

In Vorversuchen wurde der Einfluß der Stoffeuchte von Ziegeln, Sandsteinen und Mörtel auf die Ultraschalllaufzeit sowie die Resonanzfrequenz untersucht.

Tabelle 4.1: Ultraschallaufzeit bei lufttrockenen und wassergesättigten Proben (Mittelwerte aus 3 Einzelmessungen)

Material	Ultraschallaufzeit t [μs]	
	lufttrocken	wassergesättigt
Obernkirchener Sandstein	54	52
Roter Wesersandstein	64	61
Rüthener Grünsandstein	62	60
Mörtel MG I	115	87
Historische Ziegel	135	120
Fabrikneue Ziegel	110	106

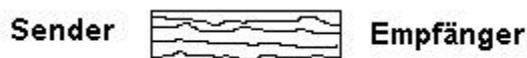
Bei wassergesättigten Prüfkörpern ist die Resonanzfrequenz nicht bestimmbar, da sich kein reproduzierbarer Wert einstellt. Tendenziell sinkt die Resonanzfrequenz mit zunehmender Stoffeuchte, wie die Ultraschallaufzeit bei wassergesättigten gegenüber lufttrockenen Proben sinkt, vergl. Tabelle 4.1, d.h. die Schallgeschwindigkeit steigt. Diese Tendenz stimmt mit den Ergebnissen von Schön [106] überein, vergl. auch Kapitel 2.1.5.3.

Um den Einfluß der Stoffeuchte auf die Schallaufzeit- und Resonanzfrequenzmessung auszuschließen, wurden alle Prüfkörper mindestens 4 Wochen in Laborklima 20° C/ 65 % rel. Luftfeuchte vorkonditioniert.

4.1.2.2 Anisotropie

Die Schallaufzeiten und die Resonanzfrequenzen sind erwartungsgemäß längs und quer zur Schichtung, je nach Ausprägung der Schichtung, unterschiedlich groß. Bei den in dieser Arbeit untersuchten Sandsteinen war der Einfluß der Schichtungsrichtung beim Roten Wesersandstein sehr ausgeprägt, vergl. Ergebnisse in Tabelle 4.2. Alle Untersuchungen erfolgten an Prismen 4 x 4 x 16 cm³, die Ultraschallaufzeit wurde über die Messtrecke von $l = 16$ cm gemessen.

Längs zur Schichtung:



Quer zur Schichtung:

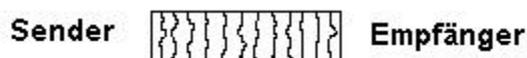


Tabelle 4.2: Ultraschallaufzeit und Resonanzfrequenz in Abhängigkeit der Schichtungsrichtung (Mittelwerte aus 3 Einzelmessungen)

Material	Ultraschallaufzeit [μs]		Resonanzfrequenz f [kHz]	
	<i>längs</i>	<i>quer</i>	<i>längs</i>	<i>quer</i>
Obernkirchener Sandstein	55	53	3,9	4,0
Roter Wesersandstein	53	63	4,0	3,4
Rüthener Grünsandstein	62	61	3,4	3,4

Um Fehler in der Interpretation der Schallaufzeit oder Resonanzfrequenz zu vermeiden, ist es wichtig, den Einfluß der Schichtungsrichtung vorher festzustellen.

Bei Ziegeln wurde der Unterschied der Schallgeschwindigkeit über die Länge bzw. die Breite untersucht. Bei fabrikneuen Ziegeln schwankte die gemessene Ultraschallgeschwindigkeit über die Länge im Vergleich zur Ultraschallgeschwindigkeit über die Breite gemessen um 0,05 – 0,1 km/s und bei historischen Ziegeln um 0,1 – 0,4 km/s.

4.1.2.3 Auflagerung

Bei der Messung der Schallaufzeit mittels Ultraschall konnte kein Unterschied zur Art der Auflagerung, auf festem Untergrund liegend oder ohne Untergrund, festgestellt werden.

Bei der Resonanzfrequenzmessung hingegen, sollte zur Ermittlung der unterschiedlichen Schwingungsarten (Biege-, Torsions-, Longitudinal-Schwingung) möglichst eine Auflagerung in bestimmten Schwingungsknoten erfolgen. Nach [16] reicht es bei bestimmten Probekörperformen aber aus, den Prüfling auf eine Schaumstoffunterlage aufzulagern, siehe auch Kapitel 2.1.5.4. Da die Sandstein- und Mörtelprismen sowie die Ziegel bei verschiedenen Lagerungsarten (auf Schaumstoff oder Lagerung in Schwingungsknoten gemäß [16]) keinen Unterschied in den Resonanzfrequenzen aufwiesen, wurden bei allen Prüfkörpern die Resonanzfrequenzen auf einer Schaumstoffunterlage ermittelt.

An Prismen $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ wurde mittels der Resonanzfrequenzmessung die Torsions- und die Biegeschwingung ermittelt. Die Longitudinalschwingung war in ihrer Größenordnung genauso groß wie die Biegeschwingung.

Aus der Torsions- und der Biegeschwingung läßt sich die elastische Querdehnzahl μ bestimmen, gemäß Gl. 2.16, Kapitel 2.1.5.4. Bei den Ziegeln konnte sowohl bei einer Auflagerung in den Schwingungsknoten als auch auf einer Schaumstoffunterlage nur die Biegeschwingung mittels der Resonanzfrequenzmessung ermittelt werden. Leers [74] hatte dies bei Versuchen an Ziegeln ebenfalls festgestellt, siehe Kapitel 2.1.5.4. Da der Vorteil der Resonanzfrequenzmessung gegenüber der Ultraschallmessung gerade in der Bestimmung der Poissonzahl μ liegt, diese bei Ziegeln aufgrund des Formates ($240 \times 115 \times 71 \text{ mm}^3$) aber nicht zu bestimmen war, wurde bei diesen zweckmäßigerweise nur die Ultraschallmethode angewandt.

4.1.2.4 Einfluß von feinen Rissen oder Brüchen

Zur Beurteilung des Einflusses von Rissen in den untersuchten Materialien auf die Schalllaufzeit t wurden Prüfkörper künstlich gespalten und eine „vorher“ (ohne Riß) – „nachher“ (mit Riß) Messung mittels Ultraschall durchgeführt.

Tabelle 4.3: Einfluß von Rissen auf die Ultraschalllaufzeit (Mittelwerte aus 3 Einzelmessungen)

Material	Ultraschalllaufzeit t [μ s]		in %
	ohne Riss	mit Riss	
Obernkirchener Sandstein	54	59	9,3
Roter Wesersandstein	64	70	9,4
Rüthener Grünsandstein	62	68	9,7
Mörtel	115	124	7,8
Historische Ziegel	135	145	7,4
Fabrikneue Ziegel	110	117	6,4

Tabelle 4.3 zeigt, daß die Schalllaufzeit durch Risse im Material verlängert wird. Das gilt praktisch für alle Werkstoffe in gleicher Größenordnung zwischen 6 und 10 %.

4.2 Ziegel

4.2.1 Festigung der Ziegel

Die fabrikneuen und die historischen Ziegel lagerten vor ihrer Festigung mindestens 4 Wochen im Laborklima (20°C / 65% rel. Luftfeuchte). Wie bereits in Kapitel 3.4.1 beschrieben, wurden die Ziegel 4 h im Steinfestiger "S" bzw. "T" getränkt.

Um die Wirkung der mechanischen Eigenschaften der Ziegel vor und nach der Festigung nachzuweisen, wurden diese bis zu dreimal getränkt. Nach der letzten Tränkung härteten die Ziegel bis zur Prüfung mindestens 3 Wochen im Laborklima aus.

Die Eindringtiefe des Festigers wurde durch Aufspalten dreier Ziegel direkt nach der Tränkung festgestellt. Es zeigte sich, daß bei beiden Festigern die Ziegel nach 4 Stunden jeweils völlig durchtränkt waren. Die Mittelwerte der Aufnahme des Festigers und der Gelabscheidung, das ist der nach der Aushärtung verbleibende Feststoffanteil in Massen-%, sind in Tabelle 4.4 zusammengestellt, sowie in der Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2 dargestellt.

In Tabelle 4.4 sind die Prüfergebnisse zusammengestellt. Für die Aufnahme des Steinfestigers und die Gelabscheidung sind die Extrem- und Mittelwerte sowie Standardabweichungen und Variationskoeffizienten angegeben.

Tabelle 4.4: Aufnahme Festiger und Gelabscheidung, fabrikneue und historische Ziegel mehrfach mit "S" bzw. "T" behandelt

Material Fabrikneue Ziegel Art der Festigung	Anzahl der Proben n	Aufnahme Festiger					Gelabscheidung				
		Extremwerte		Mittelwert	Standardab- weichung	Variationsko- effizient	Extremwerte		Mittelwert	Standardab- weichung	Variationsko- effizient
		min	max	\bar{x}	s	V	min	max	\bar{x}	s	V
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
-	-	M-%	M-%	M-%	M-%	%	M-%	M-%	M-%	M-%	%
1. Festigung S	39	7,44	10,28	9,20	0,53	5,72	4,67	6,90	6,13	0,49	8,01
2. Festigung S	19	2,40	4,62	3,38	0,67	19,92	1,30	1,96	1,58	0,16	10,30
3. Festigung S	4	0,80	1,25	1,03	0,18	17,24	0,16	0,34	0,28	0,07	25,77
Summe				13,61					7,99		
1. Festigung T	38	5,71	8,48	6,94	0,68	9,82	2,59	3,27	2,95	0,18	5,97
2. Festigung T	18	2,99	5,22	3,71	0,64	17,15	0,64	1,39	1,05	0,22	20,99
3. Festigung T	3	1,63	1,96	1,82	0,14	7,81	0,53	0,84	0,66	0,13	19,72
Summe				12,47					4,66		
Historische Ziegel											
1. Festigung S	38	7,67	11,50	9,43	1,06	11,26	4,02	7,00	5,78	0,73	12,59
2. Festigung S	18	2,35	5,91	4,83	0,82	17,03	1,19	2,93	2,19	0,42	19,05
3. Festigung S	3	2,24	3,71	3,05	0,61	19,97	0,98	1,67	1,38	0,29	21,09
Summe				17,31					9,35		
1. Festigung T	23	8,35	13,46	11,06	1,39	12,61	1,58	4,29	3,16	0,67	21,18
2. Festigung T	13	5,20	10,38	8,22	1,33	16,20	0,88	2,15	1,53	0,41	26,52
3. Festigung T	3	3,86	5,46	4,34	0,79	18,28	0,90	1,04	0,98	0,06	5,75
Summe				23,62					5,67		

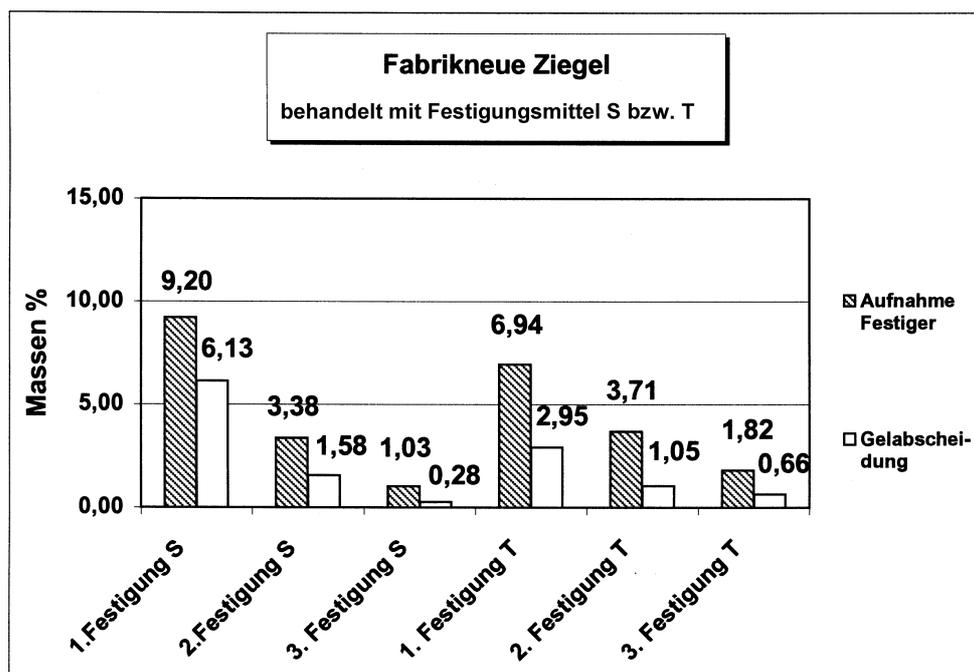


Abbildung 4.1: Aufnahme Festiger und Gelabscheidung, fabrikneue Ziegel mehrfach mit "S" bzw. "T" behandelt

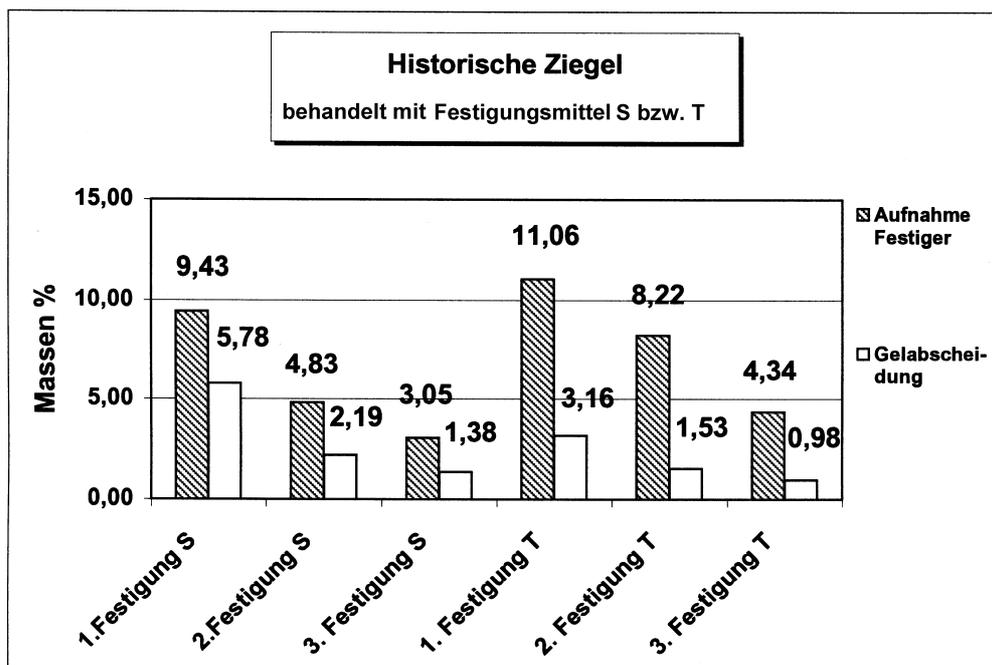


Abbildung 4.2: Aufnahme Festiger und Gelabscheidung, historische Ziegel mehrfach mit "S" bzw. "T" behandelt

4.2.2 Rohdichte und Druckfestigkeit

Die Rohdichten und Druckfestigkeiten der fabrikneuen und historischen Ziegel wurden nach der derzeit gültigen Mauerziegelnorm DIN 105 [20] geprüft. Die fabrikneuen Ziegel wiesen im Mittel die Abmessungen $l \times b \times h = 238 \times 115 \times 71 \text{ mm}^3$ auf, die historischen Ziegel $248 \times 120 \times 65 \text{ mm}^3$. Die Mittelwerte der Druckfestigkeiten und Rohdichten der fabrikneuen und historischen Ziegel, sowie der Extremwerte, Standardabweichungen und der Variationskoeffizienten sind Tabelle 4.5 zu entnehmen.

Tabelle 4.5: Rohdichten und Druckfestigkeiten, fabrikneue und historische Ziegel mehrfach mit "S" bzw. "T" behandelt

Material	Anzahl der Proben	Rohdichte					Druckfestigkeit				
		Extremwerte		Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient	Extremwerte		Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient
		n	min	max	\bar{x}	s	V	min	max	\bar{x}	s
Fabrikneue Ziegel	Art der Festigung	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³	%	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%
-	-	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
unfestigt	10	1,65	1,70	1,67	0,02	1,08	9,0	11,1	10,0	0,7	6,62
1-fach S	10	1,74	1,80	1,77	0,02	0,98	10,1	13,2	12,3	0,9	7,50
2-fach S	10	1,74	1,81	1,79	0,02	0,92	12,1	13,5	13,0	0,4	3,14
3-fach S	4	1,77	1,83	1,79	0,03	1,46					
1-fach T	10	1,68	1,77	1,72	0,03	1,63	11,0	12,0	11,6	0,4	3,24
2-fach T	10	1,68	1,78	1,71	0,03	1,82	10,8	13,2	11,6	0,8	7,08
3-fach T	3	1,73	1,74	1,73	0,00	0,27					
Historische Ziegel											
unfestigt	10	1,51	1,75	1,68	0,07	3,87	6,5	25,0	13,1	6,4	49,05
1-fach S	10	1,71	1,85	1,78	0,04	2,44	15,6	27,0	22,3	4,0	18,06
2-fach S	10	1,97	1,80	1,85	0,06	3,15	14,8	31,2	22,4	5,3	23,54
3-fach S	3	1,83	1,89	1,87	0,03	1,41					
1-fach T	5	1,65	1,80	1,74	0,05	3,05	11,3	14,9	13,8	1,9	13,68
2-fach T	5	1,70	1,82	1,77	0,05	2,72	15,9	20,5	16,0	2,6	16,10
3-fach T	3	1,77	1,82	1,79	0,02	1,21					

4.2.3 Schallgeschwindigkeit und dynamischer E-Modul

An den ungefestigten sowie gefestigten fabrikneuen und historischen Ziegeln wurde mittels Ultraschall die Schallgeschwindigkeit bestimmt und daraus der dynamische E-Modul errechnet. Die Ermittlung der Schallgeschwindigkeit erfolgte über die Längsseite der Ziegel (Meßstrecken $l = 238$ mm bei fabrikneuen Ziegeln, 248 mm bei historischen Ziegeln).

Bei der Bestimmung des dynamischen E-Moduls ist, wie in Kapitel 2.1.5.3 näher ausgeführt, die Probekörpergeometrie von Bedeutung. Sind die Querabmessungen größer als die Wellenlänge, wird die Schallgeschwindigkeit zusätzlich von der Querdehnzahl μ beeinflusst. Die Abmessungen in Querrichtung, also senkrecht zur Schallausbreitung, beträgt bei den Ziegeln 11,5 bis 12 cm. Die Prüffrequenz des Ultraschallmessgerätes beträgt 50 kHz. Bei einer gemessenen Schallgeschwindigkeit v_L der Ziegeln von $v = 2$ bis 3 km/s errechnet sich die Wellenlänge λ nach Gleichung (2.12) zu:

$$\lambda \text{ [m]} = v \text{ [km/s]} / f \text{ [kHz]}$$

$$\lambda = 2/50 = 4 \text{ cm bis } \lambda = 3/50 = 6 \text{ cm.}$$

Die vorhandene Querabmessung der Ziegel ist also größer als die Wellenlänge λ , so daß sich der dynamische E-Modul nach Gleichung (2.13) errechnet:

$$E_{\text{dyn}} = v_L^2 \cdot \rho \cdot \frac{1}{k}$$

mit

E_{dyn} [kN/mm²] dynamischer E-Modul

v_L [km/s] Longitudinalwellengeschwindigkeit

ρ [g/cm³] Rohdichte

$$k [-] = \frac{1 - \mu}{(1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)}$$

Die Querdehnzahl μ wurde bei Ziegeln experimentell nicht ermittelt, kann aber aufgrund von Literaturangaben [38], [46], [107] mit $\mu=0,2$ angenommen werden. Für $\mu=0,2$ ergibt sich dann für k :

$$k = \frac{1 - 0,2}{(1 + 0,2) \cdot (1 - 0,4)} = 1,11.$$

Ohne Berücksichtigung der Querdehnung würde der dynamische E-Modul um maximal 10% unterschätzt. Dieser Wert erscheint im Rahmen der sonstigen Streuungen als vertretbar, so daß der dynamische E-Modul für Ziegel nach Gleichung (2.14) berechnet wurde:

$$E_{\text{dyn}} \text{ [kN/mm}^2\text{]} = v_L \text{ [km/s]}^2 \cdot \rho \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.6 enthalten.

Tabelle 4.6: Ultraschallgeschwindigkeit und dynamischer E-Modul, fabriktneue und historische Ziegel, mehrfach mit "S" bzw. "T" behandelt

Material Fabrikneue Ziegel Art der Festigung	Anzahl der Proben n	Ultraschallgeschwindigkeit v					dynamischer E-Modul				
		Extremwerte		Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient	Extremwerte		Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient
		min	max	\bar{x}	s	V	min	max	\bar{x}	s	V
-	-	km/s	km/s	km/s	km/s	%	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ungefestigt	10	2,03	2,40	2,19	0,13	5,93	6.700	9.600	8.000	1.000	12,17
1-fach S	10	2,67	3,26	3,05	0,15	4,83	12.700	18.500	16.500	1.500	9,04
2-fach S	10	3,13	3,35	3,23	0,07	2,17	17.500	19.900	18.700	800	4,16
1-fach T	10	2,64	2,90	2,75	0,08	2,78	11.800	14.900	13.000	900	6,75
2-fach T	10	2,65	3,05	2,79	0,12	4,26	11.700	15.800	13.300	1.300	9,76
Historische Ziegel											
ungefestigt	10	1,07	2,53	1,62	0,47	29,29	1.700	11.100	4.800	3.100	63,69
1-fach S	10	2,05	3,25	2,74	0,45	16,48	7.400	19.600	13.800	4.400	31,78
2-fach S	10	2,26	3,18	2,63	0,28	10,81	18.700	9.300	13.000	3.000	22,90
1-fach T	5	1,83	2,67	2,08	0,36	17,13	4.600	12.900	7.800	2.900	37,54
2-fach T	5	1,92	2,60	2,14	0,24	11,35	6.000	12.000	8.200	2.000	24,93

4.2.4 Dichte, Trockenrohndichte, Gesamtporosität und Wasseraufnahme

Die mit dem Feuchtegehalt korrelierenden Eigenschaften eines Materials hängen in entscheidendem Maße vom Porensystem ab [84]. Im Hinblick auf Verwitterungsvorgänge kommt der Porenstruktur und der Wasseraufnahme zentrale Bedeutung zu. Wasser bzw. Wasserdampf kann sowohl auf rein physikalische Weise durch die Volumenzunahme beim Gefrieren (Frostspaltung) zur Verwitterung beitragen, als auch als Transportmedium für Salze bei Lösungs- und Rekristallisationsprozessen und weiterhin auf chemischem Weg durch Beteiligung an gefügeschädigenden Reaktionen beitragen [84].

Die Bestimmung der Wasseraufnahme vor und nach der Behandlung mit einem Festigungsmittel kann einen Hinweis auf die Wirksamkeit des Mittels geben.

Die Gesamtporosität wurde an der Universität Hannover mit Hilfe der Quecksilberporosimetrie nach DIN 66133 [32] bestimmt. Mit Hilfe dieser Methode wurde ergänzend auch die Dichte ermittelt.

Die Bestimmung der massenbezogenen Wasseraufnahme $W_{m,a}$ erfolgte nach DIN 52103 [26]:

$$W_{m,a} = W_a / m_{tr} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

mit: $W_a = m_{w,a} - m_{tr}$

$m_{w,a}$ Masse der unter Atmosphärendruck wassergelagerten Probe bis zur Massenkonstanz

m_{tr} Masse der bei 105° C getrockneten Probe bis zur Massenkonstanz.

Zur Bestimmung der Trockenrohndichte ρ_R wurden die Ziegel bei 105° bis zur Massenkonstanz im Trockenschrank getrocknet und die Trockenmasse m_{tr} durch Wiegen bestimmt. Durch Ausmessen ist zuvor das Volumen V_R bestimmt worden.

$$\text{Trockenrohndichte } \rho_R = m_{tr} / V_R \quad (4.2)$$

Die Ergebnisse sind Tabelle 4.7 zu entnehmen.

Tabelle 4.7: Dichte, Gesamtporosität, Trockenrohddichte und Wasseraufnahme, fabrikneue und historische Ziegel

Material	Anzahl der Proben	Dichte	Gesamtporosität	Trockenrohddichte gem. Gl. 4.2					Wasseraufnahme gem. Gl. 4.1				
		Mittelwert \bar{x}	Mittelwert \bar{x}	Extremwerte min	Extremwerte max	Mittelwert \bar{x}	Standardabweichung s	Variationskoeffizient V	Extremwerte min	Extremwerte max	Mittelwert \bar{x}	Standardabweichung s	Variationskoeffizient V
Fabrikneue Ziegel	n	g/cm ³	Vol. %	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³	%	M %	M %	M %	M %	%
Art der Festigung	-	-	-	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ungefestigt	5	1,79	24,0	1,68	1,75	1,71	0,02	1,25	7,50	8,69	8,25	0,41	4,95
2. Festigung S	5			1,75	1,93	1,79	0,07	3,87	4,96	6,29	5,71	0,49	8,54
2. Festigung T	5			1,70	1,77	1,74	0,02	1,33	3,13	3,93	3,39	0,29	8,49
Historische Ziegel													
ungefestigt	5	1,79	33,5	1,52	1,68	1,64	0,06	3,84	12,66	16,20	13,90	1,21	8,69
2. Festigung S	5			1,83	1,97	1,90	0,05	2,73	4,13	6,35	5,26	0,81	15,40
2. Festigung T	5			1,65	1,77	1,73	0,05	2,94	0,47	5,27	3,24	1,67	51,52

4.2.5 Frost-Tau-Wechsel

Zur Beurteilung der Verwitterungsbeständigkeit unbehauelter und behauelter Steine wurde das Frost-Tau-Wechsel Verhalten untersucht. Die Prüfung der Frostbeständigkeit beruht auf der Sprengwirkung des gefrierenden Wassers, die durch Frost-Tau-Zyklen erzeugt wird [8], [124]. Die Frostsprengung beruht auf der Volumenvergrößerung von 9% beim Übergang vom Wasser zum Eis. Poren von Steinen müssten also eigentlich erst bis zu 91% mit Wasser gefüllt sein, ehe die Frostsprengung einsetzen könnte [44], [124]. An der Oberfläche von Bauteilen kann es aber zu einer nahezu vollkommenen Füllung der Poren und dann beim schnellen Gefrieren zu Abplatzungen kommen [124]. Die Porengeometrie spielt bei der Frostsprengung eine wichtige Rolle. Während bei weiten Porenhälsen ein Druckausgleich stattfinden kann, besteht bei dünnen und engen Porenhälsen diese Möglichkeit nur, wenn die Abkühlung langsam vonstatten geht. Bei schneller Abkühlung kann kein Druckausgleich mehr stattfinden, es kommt zur Frostsprengung [118]. Alle Bauteile, die einer permanenten Durchfeuchtung unterliegen, sind im Hinblick auf Frostschäden besonders gefährdet, z.B. Sockelbereiche.

Die Frost-Tau-Wechsel Versuche wurden in Anlehnung an DIN 52252 Teil 1 [29] und DIN 52104, Verfahren A – Q [34], durchgeführt. Je fünf ungefestigte, fünf 2-fach mit Festigungsmittel S und fünf 2-fach mit Festigungsmittel T gefestigte, historische und fabrikneue Ziegel wurden 24 Stunden bei 105° getrocknet. Anschließend lagerten sie 48 Stunden im Wasser bei 20°. Ein Frost-Tau-Zyklus bestand aus einer vierstündigen Gefrierphase bei –20° und der anschließenden einstündigen Auftauphase im Wasser bei +20°. Bei Unterbrechung der Frost-Tau-Zyklen verblieben die Ziegel im Kälteschrank. Die Versuche wurden nach 70 Frost-Tau-Zyklen beendet.

Tabelle 4.8: Verhalten der Ziegel beim Frost-Tau-Wechsel Versuch (maximal 70 Zyklen)

Fabrikneue Ziegel	Auftreten von Verwitterungsformen bei Zyklus n	
Unverfestigt: Nr. 11 12 13 14 15	30: netzartige Risse 30: netzartige Risse 30: netzartige Risse 30: netzartige Risse 30: netzartige Risse	40: zerstört 40: zerstört 60: zerstört 60: zerstört 40: zerstört
2-fach mit S behandelt: Nr. 1 – 5	Nach 70 Frost-Tau-Wechseln optisch unbeschädigt	
2-fach mit T behandelt: Nr. 6 7 8 9 10	30: netzartige Risse 30: keine Risse 25: Längsriss 30: Längsriss 30: netzartige Risse	70: netzartige Risse 70: optisch unbeschädigt 70: Längsriss 70: Längsriss 70: netzartige Risse
Historische Ziegel		
Unverfestigt: Nr. 11 12 13 14 15	10: netzartige Risse 15: netzartige Risse 15: netzartige Risse 15: netzartige Risse 10: netzartige Risse	14: zerstört 25: zerstört 25: zerstört 27: zerstört 16: zerstört
2-fach mit S behandelt: Nr. 41 42 43 44 45	30: netzartige Risse 50: netzartige Risse 50: netzartige Risse 20: netzartige Risse 20: netzartige Risse	70: netzartige Risse 70: netzartige Risse 70: netzartige Risse 70: netzartige Risse 70: netzartige Risse
2-fach mit T behandelt: Nr. 46 47 48 49 50	20: netzartige Risse 35: netzartige Risse 15: netzartige Risse 20: netzartige Risse 15: netzartige Risse	27: zerstört 70: netzartige Risse 30: zerstört 70: netzartige Risse 27: zerstört

An den nach 70 Frost-Tau-Wechseln nicht zerstörten Ziegeln wurde die Ultraschallgeschwindigkeit, die Wasseraufnahme und der Masseverlust ermittelt.

Die Ultraschallgeschwindigkeit sinkt nach dem Frost-Tau-Wechsel Versuch ab, die Wasseraufnahme steigt, siehe folgende Tabelle 4.9, und der Masseverlust beträgt bis zu 1,5 M-%, siehe folgende Tabelle 4.10.

Tabelle 4.9: Wasseraufnahme und Ultraschallgeschwindigkeit bei Ziegeln vor und nach 70 Frost-Tau-Wechseln

Material Fabrikneue Ziegel Art der Festigung	Anzahl der Proben n	Wasseraufnahme					Ultraschallgeschwindigkeit v				
		Extremwerte		Mittelwert	Standardab- weichung	Variationsko- effizient	Extremwerte		Mittelwert	Standardab- weichung	Variationsko- effizient
		min	max	\bar{x}	s	V	min	max	\bar{x}	s	V
-	-	M-%	M-%	M-%	M-%	%	km/s	km/s	km/s	km/s	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ungefestigt vor F.-T.-Wechseln nach 70 F.-T.-W.	5	7,90	8,47	8,25	0,41	4,95	2,10	2,33	2,18	0,08	3,69
2-fach S vor F.-T.-Wechseln nach 70 F.-T.-W.	5	4,96	6,29	5,71	0,49	8,54	2,80	3,22	3,00	0,14	4,63
2-fach T vor F.-T.-Wechseln nach 70 F.-T.-W.	5	3,13	3,93	3,39	0,29	8,49	2,64	3,18	2,97	0,21	6,98
Historische Ziegel											
ungefestigt vor F.-T.-Wechseln nach 70 F.-T.-W.	5	12,66	16,20	13,90	1,21	8,69	1,07	1,60	1,37	0,17	12,46
2-fach S vor F.-T.-Wechseln nach 70 F.-T.-W.	5	4,13	6,35	5,26	0,81	15,40	2,63	3,18	2,84	0,20	7,08
2-fach T vor F.-T.-Wechseln nach 70 F.-T.-W.	5	0,47	5,27	3,24	1,67	51,52	2,11	2,75	2,31	0,23	9,81
		6,67	10,02	8,35	1,68	20,07	2,01	2,63	2,32	0,31	13,44

Tabelle 4.10: Masseverlust nach 70 Frost-Tau-Wechseln bei Ziegeln

Material Fabrikneue Ziegel Art der Festigung	Anzahl der Proben n	Masseverlust				
		Extremwerte		Mittelwert	Standardab- weichung	Variationsko- effizient
		min	max	\bar{x}	s	V
-	-	M-%	M-%	M-%	M-%	%
1	2	3	4	5	6	7
ungefestigt nach 70 F.-T.-W.	5					
2-fach S nach 70 F.-T.-W.	5	1,19	2,04	1,48	0,29	19,73
2-fach T nach 70 F.-T.-W.	5	0,85	1,14	1,04	0,11	10,13
Historische Ziegel						
ungefestigt nach 70 F.-T.-W.	5					
2-fach S nach 70 F.-T.-W.	5	1,15	1,95	1,47	0,27	18,56
2-fach T nach 70 F.-T.-W.	5	0,34	0,55	0,45	0,11	23,63

4.3 Sandsteine

4.3.1 Festigung der Sandsteine

Die aus den gelieferten Blöcken naß herausgesägten Sandsteinprismen (4x4x16 cm³) und -würfel (5x5x5 cm³), vergl. Kapitel 3.1.1.2, lagerten vor der Festigung mindestens 4 Wochen im Laborklima (20°C/65% rel. Luftfeuchte). Wie bereits in Kapitel 3.4.1 beschrieben, wurden die Sandsteine bis zu dreimal 4 h im Steinfestiger "S" bzw. "T" getränkt. Nach der letzten Tränkung und vor Prüfbeginn härteten die Sandsteine mindestens 3 Wochen im Laborklima aus. Die Eindringtiefe des Festigers wurde durch Aufspalten dreier Sandsteine direkt nach der Tränkung an den Bruchflächen festgestellt.

Es zeigte sich wiederum, daß bei beiden Festigern die Sandsteine nach 4 Stunden jeweils völlig durchtränkt waren. In Tabelle 4.11 sind die einzelnen Prüfergebnisse zusammengestellt, zur besseren Anschaulichkeit sind die Mittelwerte der Aufnahme des Festigers und die Gelabscheidung, das ist der nach Aushärtung verbleibende Feststoffanteil in Massen-%, in den Abbildung 4.3 bis Abbildung 4.5 dargestellt.

Tabelle 4.11: Aufnahme Festiger und Gelabscheidung, Sandsteine mehrfach mit "S" bzw. "T" behandelt

Material Obernkirchener Sandstein Art der Festigung	Anzahl der Proben n	Aufnahme Festiger					Gelabscheidung				
		Extremwerte		Mittelwert	Standardab- weichung s	Variationsko- effizient V	Extremwerte		Mittelwert	Standardab- weichung s	Variationsko- effizient V
		min	max	\bar{x}		%	min	max	\bar{x}		%
-	-	M-%	M-%	M-%	M-%	%	M-%	M-%	M-%	M-%	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. Festigung S	70	3,00	4,92	3,82	0,46	12,09	1,43	2,51	2,02	0,21	10,65
2. Festigung S	40	0,94	1,41	1,17	0,09	7,88	0,30	0,69	0,44	0,07	15,01
3. Festigung S	10	0,57	0,66	0,63	0,03	4,31	0,22	0,26	0,25	0,02	6,32
Summe				5,62					2,71		
1. Festigung T	70	2,96	4,88	3,49	0,22	6,43	0,48	0,76	0,58	0,07	12,37
2. Festigung T	40	1,28	2,31	1,72	0,24	14,27	0,25	0,62	0,37	0,10	26,61
3. Festigung T	10	0,72	1,51	0,98	0,23	23,72	0,21	0,37	0,26	0,04	16,63
Summe				6,19					1,21		
Roter Wesersandstein											
1. Festigung S	70	1,88	4,51	2,81	0,74	26,45	0,88	2,16	1,32	0,35	26,31
2. Festigung S	40	0,48	1,61	0,94	0,32	33,70	0,22	0,49	0,35	0,08	21,56
3. Festigung S	10	0,21	0,28	0,25	0,02	6,73	0,06	0,11	0,10	0,02	15,46
Summe				4,00					1,77		
1. Festigung T	70	1,35	3,23	2,09	0,44	20,95	0,26	0,93	0,46	0,10	22,34
2. Festigung T	40	0,61	1,58	1,17	0,27	22,71	0,14	0,43	0,26	0,08	29,94
3. Festigung T	10	0,76	1,13	0,93	0,12	13,15	0,21	0,34	0,26	0,04	16,24
Summe				4,19					0,98		
Rüthener Grünsandstein											
1. Festigung S	70	6,71	8,97	7,66	0,43	5,57	3,27	4,98	3,78	0,36	9,61
2. Festigung S	40	3,83	5,90	4,58	0,42	9,08	1,10	3,72	1,73	0,55	31,60
3. Festigung S	10	1,31	2,86	1,88	0,44	23,52	0,56	1,41	0,88	0,25	28,12
Summe				14,12					6,39		
1. Festigung T	70	6,10	8,39	7,49	0,46	6,20	0,81	2,95	1,14	0,33	28,83
2. Festigung T	40	2,24	6,57	3,82	1,23	32,17	0,11	0,86	0,44	0,21	48,73
3. Festigung T	10	1,32	3,00	2,53	0,89	35,12	0,37	0,70	0,54	0,11	19,80
Summe				13,84					2,12		

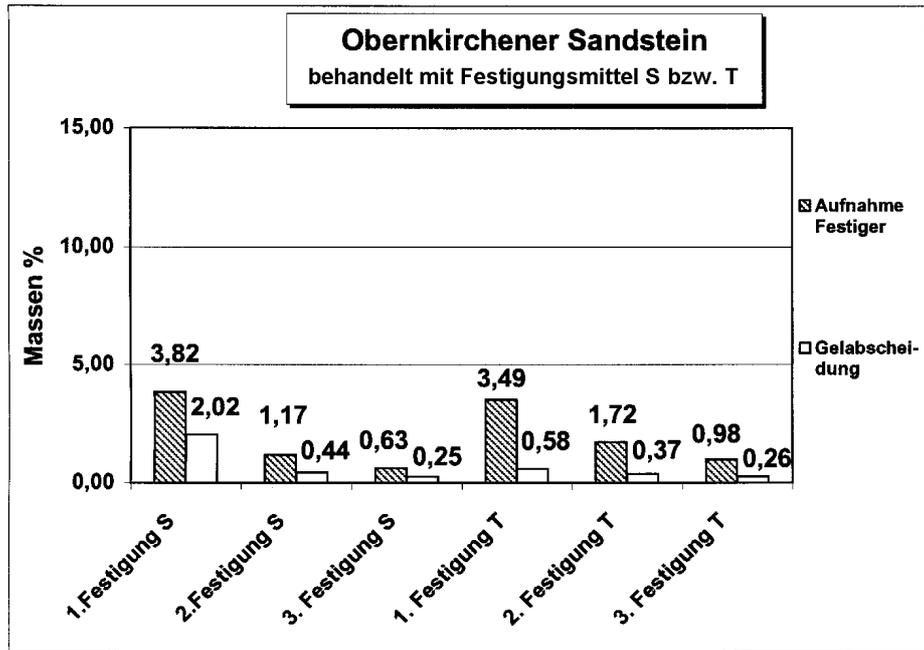


Abbildung 4.3: Aufnahme Festiger und Gelabscheidung, Obernkirchener Sandstein mehrfach mit "S" bzw. "T" behandelt

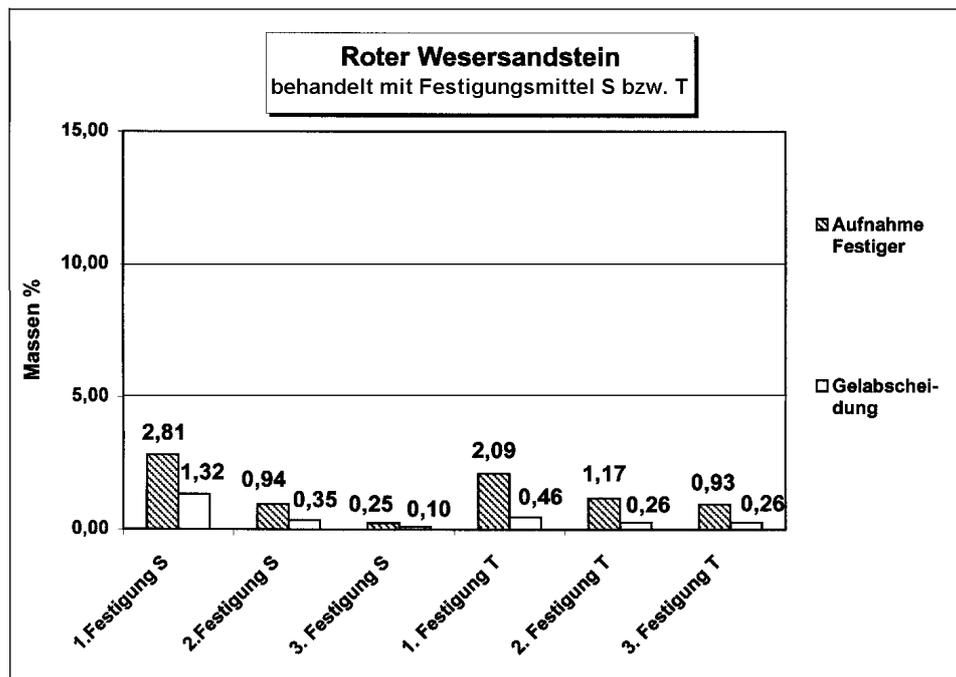


Abbildung 4.4: Aufnahme Festiger und Gelabscheidung, Roter Wesersandstein mehrfach mit "S" bzw. "T" behandelt

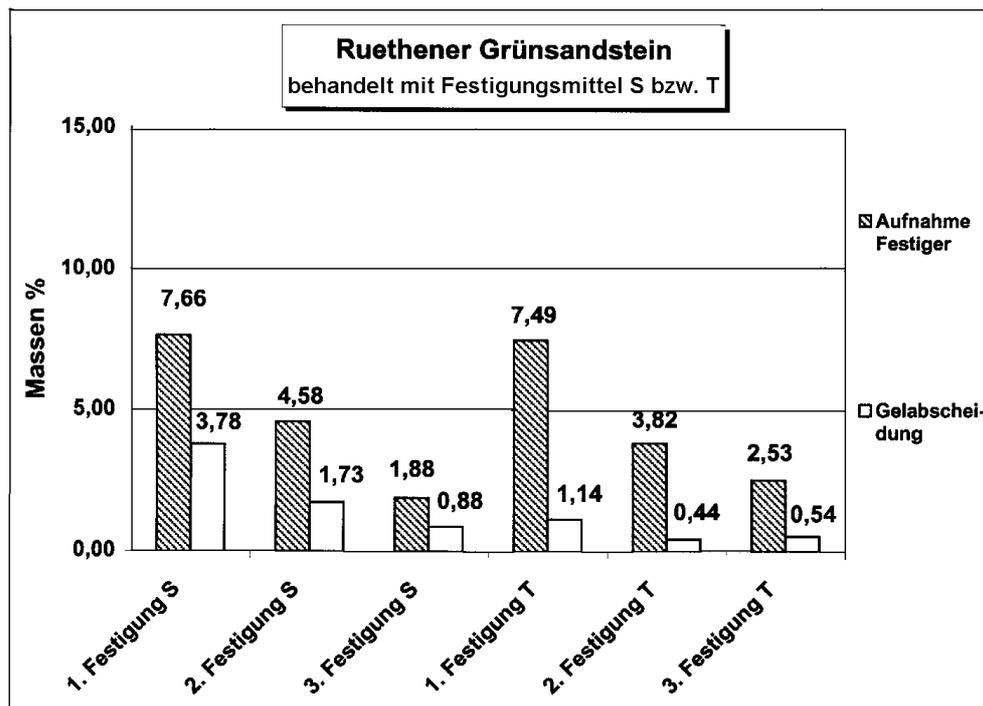


Abbildung 4.5: Aufnahme Festiger und Gelabscheidung, R uthener Gr unsandstein mehrfach mit "S" bzw. "T" behandelt

4.3.2 Rohdichte, Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit

Die Abmessungen wurden mittels Schieblehre bestimmt. Die Rohdichten, Druckfestigkeiten und Biegezugfestigkeiten der Sandsteine wurden in Anlehnung an DIN 52 102 [25], DIN 52 105 [27] und DIN 52 112 [28] an Prismen 4 x 4 x 16 cm³ bestimmt. Die Ermittlung der Druckfestigkeit erfolgte auf einer Druckfläche von 2500 mm², weil gem a  DIN 52 105 [27] die Druckfestigkeit an Würfeln der Kantenlänge 5 x 5 cm² erfolgen soll. Da im Rahmen dieser Untersuchungen sowohl die Ultraschall- als auch die Resonanzfrequenzmethode als zerstörungsfreie Prüfverfahren angewendet werden, die Anwendung der Resonanzfrequenzmethode an Würfeln jedoch nicht durchgeführt werden kann, siehe Kapitel 2.1.5.4, wurde die Druckfestigkeit an fünf Würfeln je Sandsteinart geprüft, um das Verhältnis Prismenfestigkeit zu Würfelfestigkeit zu prüfen. Die Druckfestigkeit an Prismen lag maximal 8% über der Würfeldruckfestigkeit (Druckfestigkeit an Würfeln siehe Anhang 4.1).

Wie bereits in Kapitel 2.1.3 erläutert, sind Sandsteine in vielen Eigenschaften anisotrop. Die Druck- und Biegezugfestigkeiten wurden sowohl längs als auch quer zur Schichtung untersucht.

In folgenden Tabellen 4.12 bis 4.14 sind die einzelnen Prüfergebnisse an Sandsteinen bezüglich der Rohdichte, Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit zusammengestellt.

Tabelle 4.12: Rohdichte der Sandsteine mehrfach mit "S" bzw. "T" behandelt

Material Oberkirchener Sandstein Art der Festigung	Anzahl der Proben n	Rohdichte				
		Extremwerte		Mittelwert	Standardab- weichung	Variationsko- effizient
		min	max	\bar{x}	s	V
-	-	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³	%
1	2	3	4	5	6	7
ungefestigt	20	2,08	2,16	2,13	0,03	1,19
1-fach S	14	2,15	2,21	2,18	0,02	0,99
2-fach S	14	2,14	2,21	2,19	0,02	0,76
3-fach S	10	2,19	2,27	2,23	0,02	1,03
1-fach T	14	2,13	2,18	2,15	0,02	0,82
2-fach T	14	2,13	2,19	2,16	0,02	0,98
3-fach T	10	2,26	2,15	2,19	0,04	2,03
Roter Wesersandstein						
ungefestigt	20	2,16	2,30	2,25	0,04	1,63
1-fach S	14	2,29	2,39	2,34	0,03	1,22
2-fach S	14	2,22	2,40	2,34	0,06	2,82
3-fach S	10	2,32	2,37	2,36	0,02	0,84
1-fach T	14	2,23	2,34	2,28	0,04	1,81
2-fach T	14	2,25	2,38	2,32	0,03	1,30
3-fach T	10	2,32	2,35	2,34	0,01	0,58
Rüthener Grünsandstein						
ungefestigt	20	1,98	2,08	2,04	0,03	1,40
1-fach S	14	2,05	2,12	2,11	0,02	1,11
2-fach S	14	2,09	2,20	2,17	0,03	1,50
3-fach S	10	2,14	2,19	2,17	0,02	1,14
1-fach T	14	2,01	2,09	2,05	0,03	1,32
2-fach T	14	2,03	2,17	2,10	0,04	1,98
3-fach T	10	2,07	2,12	2,10	0,03	1,67

Tabelle 4.13: Druckfestigkeit längs und quer zur Schichtung, Sandsteine mehrfach mit "S" bzw. "T" behandelt

Material	Anzahl der Proben	Druckfestigkeit									
		längs zur Schichtung					quer zur Schichtung				
		Extremwerte		Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient	Extremwerte		Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient
		min	max	\bar{x}	s	V	min	max	\bar{x}	s	V
Art der Festigung	n	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%
-	-	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ungefestigt	20	88,0	106,0	91,6	6,2	6,75	82,0	108,0	97,2	7,5	7,68
1-fach S	14	86,0	110,0	95,6	10,0	10,50	86,0	114,8	99,1	8,3	8,36
2-fach S	14	92,0	112,0	101,3	5,2	5,15	80,0	122,0	104,1	12,1	11,65
3-fach S	10	100,0	128,0	113,0	10,3	9,15	104,0	120,0	113,0	7,1	6,32
1-fach T	14	88,0	104,0	92,0	5,5	5,98	92,0	104,0	97,4	4,6	4,68
2-fach T	14	88,0	102,0	92,7	6,3	6,81	88,0	104,0	97,2	4,7	4,82
3-fach T	10	94,0	112,0	101,0	6,7	6,64	90,0	106,0	97,5	6,1	6,22
Roter Wesersandstein											
ungefestigt	20	68,0	94,0	85,9	7,4	8,57	80,0	96,0	91,6	4,9	5,37
1-fach S	14	82,0	102,0	92,3	4,9	5,30	84,0	108,0	97,3	6,0	6,13
2-fach S	14	82,0	104,0	96,0	7,7	7,99	92,0	106,0	99,4	4,8	4,79
3-fach S	10	95,0	100,0	96,3	3,0	3,13	97,6	105,0	100,2	3,6	3,62
1-fach T	14	70,0	96,0	86,8	8,3	9,51	80,0	98,0	91,1	4,4	4,88
2-fach T	14	84,0	94,0	87,3	3,7	4,19	80,0	100,0	92,0	5,2	5,69
3-fach T	10	84,0	90,0	87,7	2,3	2,57	88,0	96,0	92,5	3,0	3,20
Rüthener Grünsandstein											
ungefestigt	20	28,0	52,0	36,6	5,7	15,66	32,0	50,0	39,2	4,9	12,54
1-fach S	14	42,0	61,0	50,6	6,3	12,41	36,4	50,0	45,9	4,1	8,94
2-fach S	14	41,6	70,0	57,4	9,8	16,99	44,0	59,6	52,9	6,3	11,86
3-fach S	10	54,0	60,0	58,1	2,5	4,36	47,2	57,2	53,1	3,6	6,87
1-fach T	14	38,0	54,0	45,4	5,2	11,56	34,0	50,0	40,7	7,2	17,79
2-fach T	14	36,4	53,2	45,3	4,8	10,52	44,0	51,6	46,8	2,6	5,59
3-fach T	10	40,0	52,0	46,5	4,8	10,60	44,0	50,0	47,0	2,2	4,76

Tabelle 4.14: Biegezugfestigkeit längs und quer zur Schichtung, Sandsteine mehrfach mit "S" bzw. "T" behandelt

Material	Anzahl der Proben	Biegezugfestigkeit									
		quer zur Schichtung					längs zur Schichtung				
		Extremwerte		Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient	Extremwerte		Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient
		min	max	\bar{x}	s	V	min	max	\bar{x}	s	V
Art der Festigung	n	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%
-	-	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ungefestigt	10	8,8	10,7	9,9	0,6	6,53	8,2	10,5	9,2	0,8	8,45
1-fach S	7	11,8	14,7	13,3	1,1	8,36	10,5	12,8	11,6	0,8	6,93
2-fach S	7	13,0	14,5	14,0	0,5	3,34	13,0	14,7	14,1	0,6	4,13
3-fach S	5	15,0	14,7	14,9	0,2	1,01	14,0	15,0	14,2	0,3	2,01
1-fach T	7	8,9	12,0	10,2	1,0	9,52	8,8	11,2	9,7	0,8	8,22
2-fach T	7	11,3	12,9	11,8	0,5	4,42	9,1	11,0	10,4	0,7	6,76
3-fach T	5	10,8	12,8	11,4	0,6	5,26	10,0	10,5	10,3	0,3	2,91
Roter Wesersandstein											
ungefestigt	10	9,6	12,5	10,8	0,8	7,20	6,0	8,2	7,5	0,7	9,25
1-fach S	7	10,6	13,7	12,6	0,9	7,09	7,7	9,5	8,6	0,6	6,48
2-fach S	7	13,2	17,0	14,7	1,2	7,87	8,4	10,6	9,7	0,8	8,47
3-fach S	5	14,0	14,9	14,6	0,3	1,70	9,7	10,8	10,2	0,4	3,60
1-fach T	7	10,0	12,0	10,8	0,9	7,87	6,8	7,6	7,4	0,3	4,24
2-fach T	7	10,2	13,0	12,1	0,9	7,42	7,1	8,4	7,9	0,6	7,66
3-fach T	5	12,7	13,5	12,9	0,6	4,31	8,0	8,9	8,5	0,1	1,20
Rüthener Grünsandstein											
ungefestigt	10	3,0	5,4	4,0	0,6	15,28	2,9	5,3	4,3	0,7	16,32
1-fach S	7	6,3	7,4	7,0	0,3	4,96	5,6	7,8	7,4	0,8	10,45
2-fach S	7	7,5	8,3	7,8	0,4	4,97	6,3	8,4	7,6	0,7	8,64
3-fach S	5	8,4	9,2	9,0	0,4	4,44	7,7	8,3	8,0	0,3	3,75
1-fach T	7	3,8	4,7	4,1	0,3	7,01	3,7	5,0	4,3	0,4	9,01
2-fach T	7	4,4	5,4	4,9	0,3	6,58	4,6	5,7	5,3	0,3	6,50
3-fach T	5	5,0	5,4	5,1	0,2	3,92	4,9	5,2	5,1	0,2	2,97

4.3.3 Schallgeschwindigkeit und dynamischer E-Modul

An den ungefestigten und gefestigten Sandsteinen wurde mittels Ultraschall die Schallgeschwindigkeit in Prismenlängsrichtung (Meßlänge l=160mm) bestimmt und daraus der dynamische E-Modul errechnet. Als Kopplungsmittel wurde Schmierseife verwendet. Die Ultraschallgeschwindigkeit v kann durch einen hohen Anpressdruck der Schallköpfe an den Prüfkörper um bis zu 0,3 km/s steigen. Aufgrund der Anisotropie der Sandsteine wurden sowohl längs geschichtete Prismen, als auch quer geschichtete, siehe Kapitel 4.1.2.2, untersucht. Die Ergebnisse enthält Tabelle 4.15.

Tabelle 4.15: Ultraschallgeschwindigkeit bei Sandsteinen längs und quer zur Schichtung

Material	Anzahl der Proben	Ultraschallgeschwindigkeit v									
		längs zur Schichtung					quer zur Schichtung				
		Extremwerte		Mittelwert \bar{x}	Standardabweichung s	Variationskoeffizient V	Extremwerte		Mittelwert \bar{x}	Standardabweichung s	Variationskoeffizient V
Oberkirchener Sandstein	n	min	max	km/s	km/s	%	min	max	km/s	km/s	%
Art der Festigung	-	km/s	km/s	km/s	km/s	%	km/s	km/s	km/s	km/s	%
-	-	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ungefestigt	10	2,90	3,14	2,98	0,06	2,13	3,00	3,08	3,03	0,03	0,83
1-fach S	7	4,08	4,18	4,10	0,06	1,39	4,10	4,10	4,10	0,00	0,00
2-fach S	7	4,18	4,21	4,19	0,01	0,23	4,10	4,21	4,15	0,04	1,07
3-fach S	5	4,21	4,24	4,22	0,01	0,31	4,13	4,21	4,16	0,05	1,30
1-fach T	7	3,65	3,82	3,74	0,06	1,52	3,71	3,82	3,77	0,05	1,28
2-fach T	7	3,90	4,00	3,93	0,04	1,10	3,81	3,90	3,87	0,04	1,05
3-fach T	5	3,93	4,14	4,08	0,16	3,80	4,00	4,00	4,00	0,00	0,00
Roter Wesersandstein											
ungefestigt	10	2,95	3,16	3,03	0,07	2,29	2,53	2,61	2,58	0,03	1,25
1-fach S	7	3,73	3,90	3,83	0,06	1,47	3,31	3,40	3,35	0,03	1,02
2-fach S	7	3,99	4,10	4,05	0,05	1,15	3,27	3,56	3,45	0,12	3,62
3-fach S	5	4,00	4,08	4,05	0,05	1,27	3,47	3,48	3,47	0,01	0,16
1-fach T	7	3,26	3,32	3,29	0,03	0,91	2,81	2,91	2,86	0,03	1,03
2-fach T	7	3,38	3,56	3,46	0,06	1,62	2,94	3,27	3,13	0,11	3,58
3-fach T	5	3,62	3,65	3,64	0,01	0,16	3,11	3,18	3,14	0,06	1,96
Rüthener Grünsandstein											
ungefestigt	10	2,40	2,72	2,58	0,10	3,70	2,54	2,71	2,63	0,05	2,08
1-fach S	7	3,47	3,57	3,52	0,04	1,10	3,53	3,61	3,57	0,03	0,96
2-fach S	7	3,50	3,65	3,60	0,06	1,56	3,51	3,60	3,57	0,03	0,91
3-fach S	5	3,63	3,67	3,64	0,04	1,15	3,59	3,63	3,60	0,08	1,00
1-fach T	7	2,89	3,03	2,95	0,06	1,88	2,72	3,00	2,84	0,09	3,21
2-fach T	7	3,02	3,20	3,14	0,06	1,78	3,10	3,26	3,19	0,06	1,87
3-fach T	5	3,20	3,25	3,22	0,03	1,01	3,21	3,24	3,22	0,04	1,32

Wie bereits in Kapitel 4.2.3 erwähnt, ist bei der Bestimmung des dynamischen E-Moduls die Probekörpergeometrie von Bedeutung, vergl. Kapitel 2.1.5.3. Sind die Abmessungen senkrecht zur Durchschallung größer als die Wellenlänge, wird die Schallgeschwindigkeit zusätzlich von der Querdehnzahl μ beeinflusst. Die Querabmessungen senkrecht zur Schallausbreitung betragen bei den Prismen 4 cm. Die Prüffrequenz des Ultraschallmessgerätes beträgt 50 kHz. Bei einer gemessenen Schallgeschwindigkeit bei Sandsteinen von $v = 3$ bis 4 km/s errechnet sich die Wellenlänge λ nach Gl. (2.12) zu:

$$\lambda [m] = v [km/s] / f [kHz]$$

$$\lambda = 3/50 = 6 \text{ cm bis } \lambda = 4/50 = 8 \text{ cm.}$$

Die vorhandenen Querabmessungen der Sandsteine (Prismen $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) sind kleiner als die Wellenlänge λ , so daß sich der dynamische E-Modul gemäß Gleichung (2.14) errechnen läßt:

$$E_{\text{dyn}} [kN/mm^2] = v_L^2 \cdot \rho$$

mit

v_L [km/s] Longitudinalwellengeschwindigkeit

ρ [g/cm³] Rohdichte

In Tabelle 4.16 sind die aus der Ultraschalllaufzeit ermittelten dynamischen E-Moduli für die drei untersuchten Sandsteine enthalten.

Tabelle 4.16: Dynamischer E-Modul ermittelt bei Sandsteinen mittels Ultraschalllaufzeit längs und quer zur Schichtung – Mittelwerte-

Material	Anzahl der Proben	dynamischer E-Modul ermittelt aus Ultraschallgeschwindigkeit										
		längs zur Schichtung					quer zur Schichtung					
		Extremwerte		Mittelwert \bar{x}	Standardabweichung s	Variationskoeffizient V	Extremwerte		Mittelwert \bar{x}	Standardabweichung s	Variationskoeffizient V	
	n	min	max	N/mm ²	N/mm ²	%	min	max	N/mm ²	N/mm ²	%	
		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Oberkirchener Sandstein												
Art der Festigung												
ungefestigt	10	17.600	21.300	18.900		999	5,28	19.100	20.400	19.600	431	2,20
1-fach S	7	34.200	38.300	36.600		1.249	3,42	36.200	37.200	36.700	337	0,92
2-fach S	7	38.200	39.200	38.500		331	0,86	38.500	36.800	37.600	933	2,48
3-fach S	5	39.700	40.800	40.200		532	1,32	37.000	39.700	38.300	1.389	3,63
1-fach T	7	28.300	31.500	29.900		1.017	3,40	29.600	31.900	30.700	939	3,06
2-fach T	7	32.500	34.000	33.300		702	2,11	31.100	33.100	32.400	729	2,25
3-fach T	5	33.400	36.800	35.400		1.020	1,90	34.700	34.400	34.500	105	0,20
Roter Wesersandstein												
ungefestigt	10	19.100	22.400	20.600		1.106	5,36	13.900	15.700	14.900	477	3,19
1-fach S	7	32.600	35.900	34.300		1.125	3,28	25.700	27.400	26.400	718	2,72
2-fach S	7	36.400	40.100	38.100		1.028	2,70	25.000	28.500	27.200	1.303	4,78
3-fach S	5	37.600	39.900	38.700		1.185	3,06	28.500	28.100	28.200	200	0,70
1-fach T	7	23.800	25.900	24.800		709	2,85	17.800	19.300	18.500	500	2,61
2-fach T	7	26.100	29.800	28.000		1.125	4,02	20.300	24.400	22.600	1.418	6,27
3-fach T	5	30.800	31.000	30.800		200	0,60	22.100	24.000	23.100	870	3,77
Rüthener Grünsandstein												
ungefestigt	10	11.500	15.000	13.500		1.034	7,67	13.100	15.100	14.200	650	4,58
1-fach S	7	25.500	27.000	26.000		561	2,16	26.300	27.700	26.800	505	1,88
2-fach S	7	26.100	29.100	28.000		1.218	4,35	26.400	28.100	27.000	541	2,01
3-fach S	5	28.000	30.200	29.300		1.000	3,44	27.000	27.800	27.600	370	1,36
1-fach T	7	16.800	18.600	17.800		680	3,89	15.000	18.700	16.500	1.237	7,52
2-fach T	7	18.700	21.400	20.600		892	4,34	22.200	20.200	21.500	717	3,34
3-fach T	5	20.900	22.000	21.500		600	2,80	21.600	22.200	21.900	402	1,83

Mit Hilfe des Gerätes "Grindo Sonic-Typ MK5 Industrial" (Kapitel 3.3.2) wurden die Resonanzfrequenzen der Prismen ermittelt. Als Auflagerung diente eine Schaumstoffunterlage (Kapitel 4.1.2.3). Mittels Anregung der Prüfkörper in unterschiedlichen Schwingungsknoten konnten die Biege- und Torsionsschwingungen festgestellt werden. Der dynamische E- und G-Modul sowie die Querdehnzahl μ wurden mittels dem PC-Programm EMOD aus den gemessenen Resonanzfrequenzen ermittelt.

Der dynamische E-Modul ermittelt aus Resonanzfrequenz ist Anhang 4.2-1 zu entnehmen. Der mit dem Ultraschalllaufzeitverfahren gemessene dynamische E-Modul lag bei allen Sandsteinen um 5% höher als der mit dem Resonanzfrequenzverfahren ermittelte dynamische E-Modul, vergleiche hierzu auch Kapitel 5.9.1, Abbildung 5.14.

Die Reproduzierbarkeit der Meßwerte der Resonanzfrequenz f ist sehr gut. Die Werte aus drei Einzelmessungen weichen maximal nur um 0,01 kHz voneinander ab. Voraussetzung sind trockene Prüfkörper, da mit zunehmender Stoffeuchte die Reproduzierbarkeit abnimmt und schließlich bei wassergesättigten Proben aufgrund ständig wechselnd angezeigter Frequenzen keine stoffeigene Resonanzfrequenz mehr zu bestimmen ist.

Die Querdehnzahl μ erhöht sich tendenziell mit zunehmendem Festigungsgrad. Sie weist jedoch große Schwankungsbreiten auf, d.h. der Variationskoeffizient liegt zwischen 25% und 35%. Die Einzelwerte sind Anhang 4.3 zu entnehmen.

4.3.4 Statischer E-Modul

Zur Ermittlung des statischen E-Moduls wurden je drei ungefestigte und gefestigte Prismen 4 x 4 x 16 cm³ bis zum Bruch belastet. Als statischer E-Modul gilt der als Sekantenmodul ermittelte Verhältniswert zwischen einer Druckspannungsdifferenz und der ihr entsprechenden elastischen Verformung. Die obere Prüfspannung σ_o beträgt ein Drittel der zuvor ermittelten mittleren Bruchspannung der Sandsteine. Als untere Prüfspannung wird $\sigma_u = 0,5 \text{ N/mm}^2$ aufgebracht. An zwei gegenüberliegenden Seiten der Prismen wurden Meßstrecken angelegt und die obere (ϵ_o) und untere Dehnung (ϵ_u) jeweils als Mittelwert beider Meßstrecken bei der oberen (σ_o) und unteren (σ_u) Prüfspannung mit Hilfe eines Setzdehnungsmessers ermittelt. Der statische Elastizitätsmodul wird wie folgt berechnet:

$$E_{\text{stat}} = \Delta\sigma/\Delta\epsilon = \frac{S_o - S_u}{\epsilon_o - \epsilon_u} \tag{4.3}$$

Die nachfolgende Tabelle 4.17 enthält die statischen E-Moduli der Sandsteine unbehandelt und mehrfach mit "S" bzw. "T" behandelt.

Tabelle 4.17: Statischer E-Modul längs und quer zur Schichtung dreier Sandsteine

Material Oberkirchener Sandstein Art der Festigung	Anzahl der Proben n	statischer E-Modul									
		längs zur Schichtung					quer zur Schichtung				
		Extremwerte		Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient	Extremwerte		Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient
min	max	\bar{x}	s	V	min	max	\bar{x}	s	V		
-	-	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ungefestigt	5	13.800	15.200	14.500	478	3,31	13.200	16.400	14.800	1.368	9,23
1-fach S	5	26.200	32.600	29.800	2.469	8,27	28.500	30.000	29.000	522	1,80
2-fach S	5	30.200	32.400	31.500	799	2,54	30.800	32.000	31.300	411	1,31
3-fach S	5	33.500	34.100	34.000	610	1,80	31.000	32.200	31.700	835	2,63
1-fach T	5	15.600	16.600	16.000	384	2,39	15.800	17.700	16.900	619	3,67
2-fach T	5	21.500	21.800	21.700	149	0,69	19.200	20.100	19.700	386	1,96
3-fach T	5	25.600	23.300	24.500	1.189	4,86	23.400	23.900	23.600	120	0,58
Roter Wesersandstein											
ungefestigt	5	10.000	11.500	10.700	597	5,56	9.100	11.000	10.000	636	6,37
1-fach S	5	20.100	26.500	23.000	2.801	12,17	12.800	14.400	13.600	616	4,54
2-fach S	5	24.700	28.900	27.900	1.582	5,68	19.700	20.300	20.100	194	0,97
3-fach S	5	27.100	28.000	27.600	451	1,64	20.200	21.500	20.800	618	2,96
1-fach T	5	10.600	12.600	12.200	769	6,33	8.600	12.300	9.700	1.347	13,84
2-fach T	5	14.300	15.300	14.900	373	2,51	10.900	11.500	11.100	231	2,08
3-fach T	5	15.600	16.800	16.200	500	3,12	11.600	11.900	11.800	218	0,50
Rüthener Grünsandstein											
ungefestigt	5	6.400	12.800	10.100	2.102	20,83	7.600	9.100	8.300	462	5,55
1-fach S	5	21.700	23.700	22.800	787	3,46	19.500	23.400	22.100	1.470	6,63
2-fach S	5	23.200	26.800	24.400	1.281	5,24	18.600	24.200	21.900	2.071	9,48
3-fach S	5	25.000	26.400	25.600	612	2,40	22.500	24.600	24.600	590	2,39
1-fach T	5	11.500	12.400	11.800	288	2,43	7.000	10.300	8.500	1.352	15,89
2-fach T	5	10.200	17.900	13.800	3.170	22,98	9.000	15.900	13.000	2.247	17,18
3-fach T	5	15.000	15.300	15.100	131	0,86	11.500	12.800	12.000	786	6,55

4.3.5 Dichte, Trockenrohdichte, Gesamtporosität und Wasseraufnahme

Die Gesamtporosität wurde an der Universität Hannover mit Hilfe der Quecksilberporosimetrie nach DIN 66 133 [32] bestimmt. Ergänzend wurde auch die Dichte bestimmt. Die Wasseraufnahme und die Trockenrohdichte wurden analog zur Verfahrensweise bei Ziegeln (Kapitel 4.2.4) ermittelt. Die Trocknung bis zur Massenkonstanz erfolgte jedoch nicht bei 105° sondern lediglich bei 40°, um mögliche Gefügeveränderungen der Sandsteine durch zu hohe Temperaturen auszuschließen. Die nachfolgende Tabelle

4.18 enthält die Dichte, Trockenrohddichte, Gesamtporosität und Wasseraufnahme der Sandsteine unbehandelt und mehrfach mit "S" bzw. "T" behandelt.

Tabelle 4.18: Dichte, Gesamtporosität, Trockenrohddichte, Wasseraufnahme dreier Sandsteine

Material Oberkirchener Sandstein Art der Festigung	Anzahl der Proben n	Dichte		Gesamt- porosität		Trockenrohddichte				Wasseraufnahme				
		Mittelwert x̄	Mittelwert x̄	Extremwerte		Mittelwert x̄	Standardab- weichung s	Variationsko- effizient V	Extremwerte		Mittelwert x̄	Standardab- weichung s	Variationsko- effizient V	
		g/cm³	Vol. %	min	max	g/cm³	g/cm³	g/cm³	%	min	max	M %	M %	M %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
ungefestigt	6	2,09	16,15	2,11	2,15	2,13	0,01	0,63	5,48	6,45	6,06	0,32	5,35	
1-fach S	6			2,13	2,20	2,18	0,02	0,95	4,86	5,02	4,94	0,05	0,99	
2-fach S	6			2,14	2,20	2,18	0,02	0,75	4,38	4,61	4,46	0,08	1,75	
3-fach S	6			2,18	2,28	2,24	0,04	1,62	4,05	4,23	4,15	0,06	1,55	
1-fach T	6			2,08	2,15	2,13	0,03	1,49	1,71	2,24	1,95	0,17	8,71	
2-fach T	6			2,11	2,18	2,15	0,03	1,32	1,73	2,16	1,93	0,14	7,19	
3-fach T	6			2,16	2,24	2,20	0,03	1,34	1,28	1,72	1,52	0,17	11,36	
Roter Wesersandstein														
ungefestigt	6	2,33	14,95	2,19	2,30	2,25	0,03	1,43	4,96	5,90	5,35	0,31	5,79	
1-fach S	6			2,27	2,35	2,32	0,02	1,08	3,91	4,10	4,00	0,07	1,78	
2-fach S	6			2,32	2,38	2,34	0,02	0,96	3,49	4,22	3,98	0,26	6,43	
3-fach S	6			2,33	2,38	2,36	0,02	0,78	3,63	3,77	3,69	0,06	1,58	
1-fach T	6			2,22	2,34	2,27	0,05	2,10	1,38	2,20	1,81	0,32	17,87	
2-fach T	6			2,24	2,38	2,29	0,05	2,15	1,13	1,38	1,17	0,03	2,21	
3-fach T	6			2,32	2,35	2,34	0,01	0,34	0,98	1,06	1,03	0,03	3,07	
Rüthener Grünsandstein														
ungefestigt	9	2,06	29,45	1,98	2,09	2,05	0,03	1,49	9,98	15,66	13,51	2,42	17,90	
1-fach S	6			2,07	2,12	2,10	0,02	0,95	8,00	8,62	8,14	0,25	3,04	
2-fach S	6			2,12	2,16	2,15	0,01	0,66	6,73	7,85	7,13	0,41	5,69	
3-fach S	6			2,16	2,19	2,18	0,01	0,50	6,01	6,64	6,27	0,24	3,81	
1-fach T	6			2,04	2,07	2,06	0,01	0,66	9,98	10,81	10,25	0,28	2,76	
2-fach T	6			2,05	2,11	2,09	0,02	1,04	6,49	9,56	7,91	1,62	20,48	
3-fach T	6			2,08	2,15	2,11	0,03	1,51	3,76	5,33	4,52	0,68	15,04	

4.3.6 Frost-Tau-Wechsel

Die Frost-Tau-Wechsel Versuche wurden in Anlehnung an DIN 52 104 [34] (Verfahren A – Q) durchgeführt. Nachdem die Sandsteine eine Woche im Trockenschrank bei 40° gelagert hatten, wurden sie 48 Stunden im Wasser bei 20° gelagert. Ein Frost-Tau-Zyklus bestand aus einer vierstündigen Gefrierphase bei -20° und der anschließenden einstündigen Auftauphase im Wasser bei +20°. Bei Unterbrechung der Frost-Tau-Zyklen verblieben die Sandsteine im Kälteschrank. Die Versuche wurden nach 70 Frost-Tau-Zyklen beendet. Tabelle 4.19 enthält einen Überblick des Erscheinungsbildes der Sandsteine nach 70 Frost-Tau-Wechseln.

Tabelle 4.19: Verwitterungsverhalten der Sandsteine beim Frost-Tau-Wechsel Versuch (maximal 70 Zyklen)

Obernkirchener Sandstein	Auftreten von Verwitterungsformen bei Zyklus n
Unverfestigt Nr.: IX3 – IX8	70: optisch unbeschädigt
2-fach mit S behandelt Nr. IV1 – IV6	70: optisch unbeschädigt
2-fach mit T behandelt Nr. VIII3 – VIII8	70: optisch unbeschädigt
Roter Wesersandstein	
Unverfestigt Nr.: 20 – 25	70: optisch unbeschädigt
2-fach mit S behandelt Nr. 1 - 6	70: optisch unbeschädigt
2-fach mit T behandelt Nr. 7 - 12	70: optisch unbeschädigt
Rüthener Grünsandstein	
Unverfestigt Nr.: C15 – C20	70: großporig, stark ausgewaschen
2-fach mit S behandelt Nr. C1 – C6	70: optisch unbeschädigt
2-fach mit T behandelt Nr. C7 - C12	70: leicht ausgewaschen

Nach 70 Frost-Tau-Wechseln wurde die Ultraschallgeschwindigkeit, die Wasseraufnahme und der Masseverlust ermittelt. Tabelle 4.20 enthält einen Überblick der Wasseraufnahme und der Ultraschallgeschwindigkeit vor und nach 70 Frost-Tau-Wechseln, in Tabelle 4.21 sind die Ergebnisse des Masseverlustes nach 70 Frost-Tau-Wechseln zusammengefasst. Zusammenfassend wurde festgestellt, daß nach 70 Frost-Tau-Wechseln die Ultraschallgeschwindigkeit sinkt, die Wasseraufnahme steigt und der Masseverlust bis zu 0,7 M-% beträgt.

Tabelle 4.20: Wasseraufnahme und Ultraschallgeschwindigkeit bei drei Sandsteinen vor und nach 70 Frost-Tau-Wechseln

Material Oberkirchener Sandstein Art der Festigung	Anzahl der Proben n	Wasseraufnahme					Ultraschallgeschwindigkeit v				
		Extremwerte		Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient	Extremwerte		Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient
		min	max	\bar{x}	s	V	min	max	\bar{x}	s	V
-	M-%	M-%	M-%	M-%	%	km/s	km/s	km/s	km/s	%	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ungefestigt vor F.-T.-Wechseln nach 70 F.-T.-W.	6	4,66 5,51	5,34 6,79	4,96 6,15	0,26 0,43	5,14 7,07	2,88 2,88	2,94 2,94	2,92 2,92	0,03 0,03	0,95 0,95
2-fach S vor F.-T.-Wechseln nach 70 F.-T.-W.	6	3,31 3,63	3,40 4,00	3,37 3,82	0,04 0,11	1,28 2,90	3,83 3,54	4,19 3,87	4,11 3,66	0,13 0,14	3,08 3,72
2-fach T vor F.-T.-Wechseln nach 70 F.-T.-W.	6	0,34 0,64	0,53 1,06	0,42 0,83	0,08 0,12	18,31 14,97	3,10 3,30	3,56 3,34	3,32 3,32	0,13 0,01	3,99 0,38
Roter Wesersandstein											
ungefestigt vor F.-T.-Wechseln nach 70 F.-T.-W.	6	3,56 3,90	4,19 4,69	4,04 4,40	0,25 0,31	6,18 7,03	2,49 2,38	3,16 3,08	2,72 2,64	0,27 0,28	10,10 10,56
2-fach S vor F.-T.-Wechseln nach 70 F.-T.-W.	6	1,12 3,57	1,34 4,14	1,55 3,70	0,09 0,20	1,56 5,37	3,52 2,93	3,66 3,00	3,61 2,97	0,06 0,03	1,66 1,13
2-fach T vor F.-T.-Wechseln nach 70 F.-T.-W.	6	0,37 0,74	0,51 1,00	0,42 0,83	0,05 0,09	11,13 10,77	2,83 2,76	3,56 3,56	3,33 3,22	0,29 0,29	8,83 8,89
Rüthener Grünsandstein											
ungefestigt vor F.-T.-Wechseln nach 70 F.-T.-W.	6	6,70 8,84	7,50 9,47	7,11 9,03	0,24 0,25	3,42 2,75	2,51 2,39	2,71 2,58	2,61 2,51	0,09 0,08	3,29 3,32
2-fach S vor F.-T.-Wechseln nach 70 F.-T.-W.	6	3,30 4,02	4,70 5,22	4,17 4,86	0,47 0,42	11,37 8,72	3,59 3,14	3,66 3,20	3,59 3,17	0,10 0,02	2,88 0,71
2-fach T vor F.-T.-Wechseln nach 70 F.-T.-W.	6	0,80 3,69	1,50 5,11	1,20 4,33	0,23 0,58	18,88 13,47	3,14 2,79	3,41 3,19	3,33 3,00	0,09 0,14	2,67 4,59

Tabelle 4.21: Masseverlust nach 70 Frost-Tau-Wechseln bei drei Sandsteinen

Material Oberkirchener Sandstein Art der Festigung	Anzahl der Proben n	Masseverlust				
		Extremwerte		Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient
		min	max	\bar{x}	s	V
-	M-%	M-%	M-%	M-%	%	
1	2	3	4	5	6	7
ungefestigt nach 70 F.-T.-W.	6	0,08	0,15	0,11	0,03	23,56
2-fach S nach 70 F.-T.-W.	6	0,22	0,30	0,24	0,03	11,58
2-fach T nach 70 F.-T.-W.	6	0,04	0,08	0,06	0,04	22,70
Roter Wesersandstein						
ungefestigt nach 70 F.-T.-W.	6	0,18	0,30	0,22	0,05	22,96
2-fach S nach 70 F.-T.-W.	6	0,29	0,35	0,33	0,02	6,72
2-fach T nach 70 F.-T.-W.	6	0,09	0,15	0,13	0,06	10,50
Rüthener Grünsandstein						
ungefestigt nach 70 F.-T.-W.	6	0,54	0,64	0,56	0,04	7,78
2-fach S nach 70 F.-T.-W.	6	0,66	0,75	0,70	0,03	3,71
2-fach T nach 70 F.-T.-W.	6	0,10	0,21	0,13	0,05	28,89

4.4 Mörtel

4.4.1 Festigung der Mörtel

Die parallel zur Aufmauerung der RILEM-Körper in Stahlschalung hergestellten Mörtelprismen, Kapitel 3.1.2, wurden nach 28 Tagen bis zu dreifach vier Stunden mit Festiger "T" bzw. "S" getränkt, siehe Kapitel 3.4.1. Durch Aufspalten der Mörtelprismen konnte an den Bruchflächen festgestellt werden, daß sie nach vierstündiger Trängung völlig durchtränkt waren. Die Mittelwerte der Festigeraufnahme und Gelabscheidung sind in Tabelle 4.22 zusammengestellt und in Abbildung 4.6 dargestellt. Die Schwankungen bei der Festigeraufnahme und der Gelabscheidung wird anhand des Variationskoeffizienten deutlich.

Tabelle 4.22: Festigeraufnahme und Gelabscheidung des Mörtels

Material Mörtel Art der Festigung	Anzahl der Proben n	Aufnahme Festiger					Gelabscheidung				
		Extremwerte		Mittelwert	Standardab- weichung s	Variationsko- effizient V	Extremwerte		Mittelwert	Standardab- weichung s	Variationsko- effizient V
-	-	min	max	\bar{x}	M-%	%	min	max	\bar{x}	M-%	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. Festigung S	39	13,01	14,65	13,73	1,08	7,90	3,28	7,34	5,48	1,86	34,02
2. Festigung S	24	6,97	14,24	8,76	2,64	30,15	2,30	7,51	3,67	1,68	45,66
3. Festigung S	9	2,79	3,11	2,94	0,11	3,64	0,10	0,21	0,15	0,04	25,48
Summe				25,43					9,30		
1. Festigung T	39	8,41	15,02	12,37	1,57	12,67	0,99	2,09	1,51	0,32	21,29
2. Festigung T	24	4,11	6,88	4,89	0,94	19,14	0,19	1,05	0,61	0,22	35,26
3. Festigung T	9	3,67	4,99	4,41	0,42	9,53	0,4	0,96	0,73	0,19	25,73
Summe				21,67					2,85		

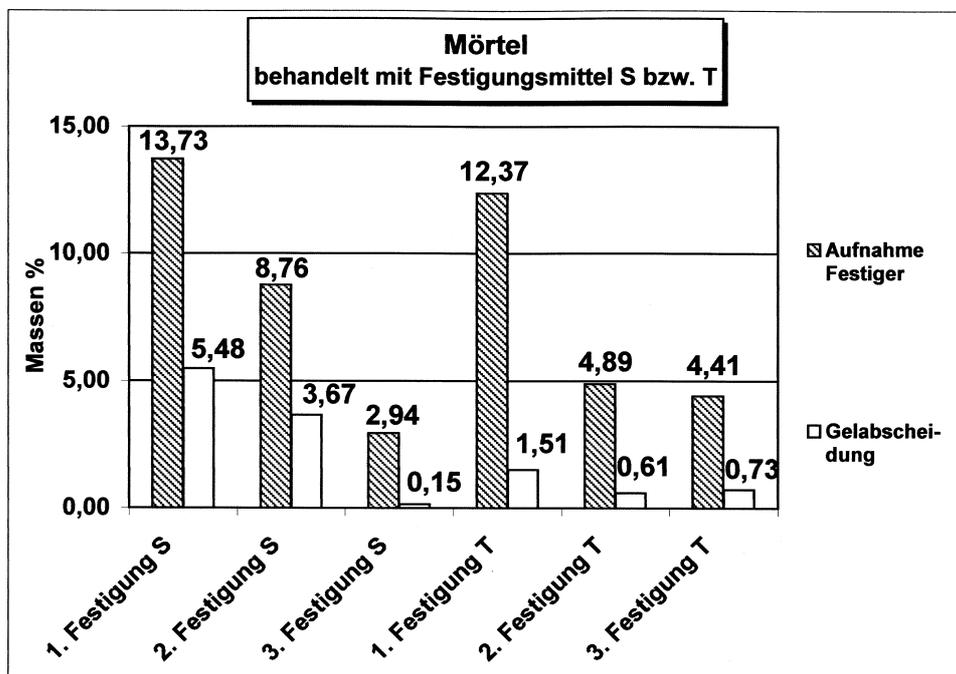


Abbildung 4.6: Festigeraufnahme und Gelabscheidung des Mörtels

4.4.2 Rohdichte, Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit

Die in der Stahlschalung hergestellten Mörtelprismen wiesen die Abmessung 4x4x16 cm³ auf. Die Biegezug- und Druckfestigkeitsprüfung der Mörtelprismen erfolgte gemäß DIN 18555 T3 [23]. In folgenden Tabellen 4.23 und 4.24 sind die Rohdichten

sowie die Biegezug- und Druckfestigkeiten der unbehandelten sowie mehrfach behandelten Mörtel zusammengestellt

Tabelle 4.23: Rohdichte (lufttrocken) des Mörtels, mehrfach mit "S" bzw. "T" behandelt

Material Mörtel Art der Festigung	Anzahl der Proben n	Rohdichte				
		Extremwerte min max		Mittelwert \bar{x}	Standardab- weichung s	Variationsko- effizient V
-	-	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³	%
1	2	3	4	5	6	7
ungefestigt	130	1,65	1,79	1,72	0,03	2,01
1-fach S	39	1,69	1,91	1,83	0,06	3,40
2-fach S	24	1,78	1,99	1,89	0,07	3,55
3-fach S	9	1,83	2,11	1,99	0,08	4,02
1-fach T	39	1,7	1,79	1,75	0,02	1,38
2-fach T	24	1,73	1,79	1,76	0,02	1,24
3-fach T	9	1,75	1,79	1,76	0,01	0,57

Tabelle 4.24: Biegezug- und Druckfestigkeit des Mörtels, mehrfach mit "S" bzw. "T" behandelt

Material Mörtel Art der Festigung	Anzahl der Proben n	Druckfestigkeit					Biegezugfestigkeit				
		Extremwerte min max		Mittelwert \bar{x}	Standardab- weichung s	Variationsko- effizient V	Extremwerte min max		Mittelwert \bar{x}	Standardab- weichung s	Variationsko- effizient V
-	-	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%
1	2	8	9	10	11	12	3	4	5	6	7
ungefestigt	90	0,4	2,2	1,2	0,4	31,39	8,8	10,7	0,4	0,6	6,53
1-fach S	15	5,3	6,6	6,1	0,3	5,54	0,8	1,3	1,1	0,2	15,00
2-fach S	15	7,8	11,0	9,1	0,9	9,40	2,0	4,3	2,5	0,7	28,21
3-fach S	9	12,1	13,5	12,8	0,4	3,14	2,5	3,0	2,8	0,5	17,90
1-fach T	15	1,3	1,9	1,5	0,2	13,3	0,5	0,8	0,6	0,1	16,60
2-fach T	15	1,7	3,4	2,4	0,5	20,37	0,5	1,6	1,1	0,3	30,85
3-fach T	9	2,0	3,2	2,4	0,4	16,70	0,9	1,7	1,2	0,3	25,00

4.4.3 Schallgeschwindigkeit und dynamischer E-Modul

An den ungefestigten und gefestigten Mörteln wurde mittels Ultraschall die Schallgeschwindigkeit in Prismenlängsrichtung (Meßlänge l=160mm) bestimmt und daraus der dynamische E-Modul errechnet. Als Kopplungsmittel wurde Schmierseife verwendet. Analog zur Messung an Sandsteinprismen wurde der dynamische E-Modul nach Gleichung 2.14 bestimmt:

$$E_{\text{dyn}} [\text{kN/mm}^2] = v_L^2 \cdot \rho \quad \text{mit:}$$

v_L [km/s] Longitudinalwellengeschwindigkeit

ρ [g/cm³] Rohdichte

Mit Hilfe des Gerätes "Grindo Sonic-Typ MK5 Industrial" (Kapitel 3.3.2) wurden die Resonanzfrequenzen der Prismen ermittelt. Als Auflagerung diente eine Schaumstoffunterlage (Kapitel 4.1.2.3). Mittels Anregung der Prüfkörper in unterschiedlichen Schwingungsknoten konnten die Biege- und Torsionsschwingungen festgestellt werden. Der dynamische E- und G-Modul sowie die Querdehnzahl μ wurden mittels dem PC-Programm EMOD aus den gemessenen Resonanzfrequenzen ermittelt. Folgende Tabelle 4.25 enthält die Zusammenstellung der Ultraschallgeschwindigkeiten bei Mörteln sowie die daraus errechneten dynamischen E-Moduli.

Tabelle 4.25: Ultraschallgeschwindigkeit und dynamischer E-Modul des Mörtels, ermittelt aus der Schalllaufzeit (Mittelwerte)

Material	Anzahl der Proben	Ultraschallgeschwindigkeit v					dynamischer E-Modul ermittelt aus Ultraschallgeschwindigkeit				
		Extremwerte		Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient	Extremwerte		Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient
Mörtel	n	min	max	\bar{x}	s	V	min	max	\bar{x}	s	V
Art der Festigung	-	km/s	km/s	km/s	km/s	%	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ungefestigt	130	0,92	1,45	1,25	0,15	12,11	1.400	3.700	2.700	662	24,23
1-fach S	39	1,51	2,00	1,67	0,16	9,33	3.400	7.000	5.100	981	19,08
2-fach S	24	1,85	2,56	2,10	0,19	9,09	6.400	11.800	8.400	1.390	16,56
3-fach S	9	2,13	2,49	2,18	0,08	3,70	8.600	11.800	9.400	500	5,30
1-fach T	39	1,33	1,74	1,53	0,11	7,42	3.100	5.300	4.100	620	15,05
2-fach T	24	1,48	1,80	1,65	0,10	5,80	3.800	5.700	4.800	574	11,96
3-fach T	9	1,63	1,71	1,66	0,03	1,86	4.200	5.200	4.800	229	4,76

Der dynamische E-Modul ermittelt aus Resonanzfrequenz ist Anhang 4.2-2 zu entnehmen. Der aus der Ultraschalllaufzeit ermittelte dynamische E-Modul lag beim Mörtel um 31% höher als der mit dem Resonanzfrequenzverfahren ermittelte dynamische E-Modul, vergleiche hierzu auch Kapitel 5.9.1, Abb. 5.15.

Die Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse der Resonanzfrequenz ist wie bei den Sandsteinen sehr hoch (Werte aus drei Einzelmessungen weichen nur um maximal 0,01 kHz voneinander ab). Die Ultraschalllaufzeit kann durch den Anpressdruck geringfügig verändert werden, niedriger Anpressdruck kann zur Verringerung der Schallgeschwindigkeit um bis zu 0,3 km/s führen.

Die Querdehnzahl μ unterliegt bei den Mörteln sehr hohen Schwankungen (Variationskoeffizienten bis zu 75%). Die Einzelwerte sind Anhang 4.3-1 bis 4.3-2 zu entnehmen. Aufgrund des hohen Variationskoeffizienten ist die Zuverlässigkeit der Aussage einer Querdehnzahl mit Hilfe des Resonanzfrequenzverfahrens als zu ungenau einzustufen. Beim roten Wesersandstein konnte die Querdehnzahl μ aufgrund der ausgeprägten Anisotropie gar nicht mittels der Resonanzfrequenzmessung bestimmt werden.

4.4.4 Trockenrohddichte, Wasseraufnahme

Die Trockenrohddichte wurde gemäß DIN 18 555 T3 [23], die Wasseraufnahme in Anlehnung an DIN 52 103 [26] ermittelt. Die Trocknung der Mörtel erfolgte im Trockenschrank bei 40° bis zur Massenkonstanz wie bei den Sandsteinen, vergl. Kapitel 4.3.5. In Tabelle 4.26 sind die Ergebnisse der Trockenrohddichte und der Wasseraufnahme bei unbehandelten sowie bei mehrfach behandelten Mörteln zusammengestellt.

Tabelle 4.26: Trockenrohddichte und Wasseraufnahme des Mörtels

Material	Anzahl der Proben	Trockenrohddichte					Wasseraufnahme				
		Extremwerte		Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient	Extremwerte		Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient
Mörtel	n	min	max	\bar{x}	s	V	min	max	\bar{x}	s	V
Art der Festigung	-	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³	%	M %	M %	M %	M %	%
1	2	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ungefestigt	5	1,66	1,73	1,71	0,02	1,31	16,30	17,10	16,90	0,35	1,90
1-fach S	5	1,77	1,85	1,80	0,03	1,48	10,20	11,60	11,07	0,46	4,14
2-fach S	5	1,84	1,88	1,85	0,02	0,92	1,32	1,53	1,39	0,09	6,31
1-fach T	5	1,74	1,75	1,74	0,01	0,15	2,98	4,45	3,77	0,64	16,85
2-fach T	5	1,74	1,75	1,75	0,01	0,17	1,35	1,63	1,41	0,16	11,29

4.4.5 Frost-Tau-Wechsel

Die Frost-Tau-Wechsel Versuche erfolgten in Anlehnung an DIN 52 104 [34]. Nachdem die Mörtel eine Woche im Trockenschrank bei 40° gelagert hatten, wurden sie 48 Stunden bei 20° ins Wasser gelegt. Ein Frost-Tau-Zyklus bestand wiederum aus einer vierstündigen Gefrierphase bei -20° und der anschließenden einstündigen Auftauphase im Wasser bei +20°. Bei Unterbrechung der Frost-Tau-Zyklen verblieben die Sandsteine im Kälteschrank. Der Versuch wurde nach 70 Frost-Tau-Zyklen beendet. Tabelle 4.27 enthält einen Überblick des Verwitterungsverhaltens.

Tabelle 4.27: Verhalten des Mörtels beim Frost-Tau-Wechsel Versuch (maximal 70 Zyklen)

Mörtel	Auftreten von Verwitterungsformen bei Zyklus n	
ungefestigt Nr.: 1-3	5: zerstört	
2-fach mit S behandelt Nr.: 4-6	60: Längsrisse	68: zerstört
2-fach mit T behandelt Nr.: 7-9	45: Längsrisse	57: zerstört

4.5 RILEM-Körper

4.5.1 RILEM-Körper aus fabrikneuen und historischen Ziegeln

Die Herstellung der RILEM-Körper ist in Kapitel 3.2 beschrieben. Die RILEM-Körper wurden nach den Angaben der DIN 18 554 Teil 1 [22] mit Mörteln der Mörtelgruppe I (Kapitel 3.1.2) aufgemauert und geprüft. Als fabrikneue Ziegel wurden Vollsteine der Steinfestigkeitsklasse 8 verwendet. Die Druckfestigkeiten der historischen Ziegel unterliegen großen Schwankungen (Variationskoeffizienten bis zu 49%, siehe Kapitel 4.2.2). Um eine vergleichende Aussage über die Tragfähigkeit von ungefestigten und gefestigten Mauerwerkskörpern treffen zu können, wurde die größere Anzahl an Versuchen mit aus fabrikneuen Ziegeln hergestellten RILEM-Körpern durchgeführt. Die Versuchsdurchführung ist in Kapitel 3.4.3 ausführlicher erläutert. Die Druckfestigkeit des Mauerwerks $\beta_{D,mw}$ errechnet sich aus $\beta_{D,mw} = \max F/A$. Der Elastizitätsmodul E_{stat} wird als Sekantenmodul aus der Spannung σ bei einem Drittel der Druckfestigkeit $\beta_{D,mw}$ und der bei dieser Spannung aufgetretenen mittleren Dehnung \bar{e} (Mittelwert aller vier Meßstrecken) bei einmaliger Belastung berechnet:

$$E_{stat} = \frac{b_{D,mw}}{3 \cdot \bar{e}} \quad (4.4)$$

Die Versuchsergebnisse der Druckfestigkeits- und Verformungsprüfungen der RILEM-Körper sind Anhang 4.4 zu entnehmen. Da bei der Herstellung des Mörtels nicht immer die gleiche Mörteldruckfestigkeit erzielt wurde, enthalten die Tabellen in Anhang 4.4 die auf eine einheitliche Mörteldruckfestigkeit (MG I) umgerechnete Mauerwerksdruckfestigkeit (Spalte 12 bzw. 13). Dies bedeutet:

- nach EC 6 [35]:
$$f_k = \beta_{D,mw} \cdot \left(\frac{1,0}{b_{D,mö}}\right)^{0,25} \quad (4.5)$$

- nach DIN 18 554 T1 [22]:
$$\beta_{D,mw} = \beta_{D,mw} \cdot \left(\frac{1,0}{b_{D,mö}}\right)^{0,2} \quad (4.6)$$

Für RILEM-Körper wird der Gestaltseinfluß mit dem Faktor 0,9 berücksichtigt [103]. Franke, Deckelmann und Goretzky [46] berücksichtigen die Schlankheit $h/d = 3$ von untersuchten RILEM-Körpern gegenüber RILEM-Körpern mit einer Schlankheit $h/d = 5$ mit dem Korrekturfaktor $k_c = 0,85$. Danach ist $\beta_{D,mw}(h/d=5) = 0,85 \cdot \beta_{D,mw}(h/d=3)$. Die in dieser Arbeit untersuchten RILEM-Körper wiesen eine Schlankheit von $h/d \approx 3,5$ auf. Zur Berücksichtigung der Schlankheit $h/d = 3,5$ werden die Versuchsergebnisse der Mauerwerksprüfungen mit dem Abminderungsfaktor 0,85 multipliziert (Spalte 14, Tabellen Anhang 4.4).

Bei den im Streichverfahren 2-fach an den Längsseiten gefestigten RILEM-Körpern (Festigung siehe Kapitel 3.4.1) drang der Steinfestiger bei einem Verbrauch von ca. 5 Litern/m² je Festigung in Mörtel und Ziegel mindestens 1,0 cm, maximal 1,5 cm ein.

Vor jeder Druckfestigkeitsprüfung wurden die ungefestigten und gefestigten RILEM-Körper in Querrichtung, Meßlänge 11,5 bis 12 cm, durchschallt. Bei RILEM-Körpern aus fabrikneuen Ziegeln wurden folgende Schallgeschwindigkeiten v gemessen:

- ungefestigte Ziegel $v = 2,0 - 2,5$ km/s
- mit "S" gefestigte Ziegel: $v = 2,5 - 2,9$ km/s
- mit "T" gefestigte Ziegel: $v = 2,3 - 2,7$ km/s

Die Schallgeschwindigkeiten gemessen an RILEM-Körpern aus historischen Ziegeln variierten sehr stark ($v = 1,2 - 2,4$ km/s). Eine generelle Aussage bezüglich der Änderung der Schallgeschwindigkeit vor und nach einer Festigung der historischen Ziegel ist deshalb nicht möglich.

Der Druckbruch aller Versuchsserien wurde durch Ausrieseln des oberflächennahen Fugenmörtels bei 80% - 95% der Bruchlast angekündigt. Der erste sichtbare Riss aller RILEM-Körper zeigte sich in vertikaler Richtung im Stein auf der Stirnseite. Abplatzungen traten vereinzelt bei den mit "S" gefestigten RILEM-Körpern aus fabrikneuen Ziegeln nach dem ersten Riss auf.

Die Spannungs-Dehnungs-Linien aller RILEM-Körper sind in Anhang 4.5-1 bis 4.5-13 enthalten.

4.5.2 RILEM-Körper aus Sandsteinen

Die RILEM-Körper aus Sandsteinen wurden analog zu den RILEM-Körpern aus Ziegeln geprüft (Kapitel 4.5.1). Aus den vom jeweiligen Sandsteinbruch gelieferten Blöcken wurden Ziegelformate (240x115x71mm³) naß herausgesägt und analog zu den RILEM-Körpern aus Ziegeln mit Mörtelgruppe I aufgemauert (Kapitel 3.2). Die Schichtungsrichtung der Sandsteine verlief senkrecht zur Druckbelastung. Die Druckfestigkeitsprüfung der Sandsteine wird gemäß DIN 52 105 [27] an Würfeln durchgeführt. Die Prüfergebnisse sind Anhang 4.1 zu entnehmen. Die Sandsteine wiesen im Mittel folgende Würfeldruckfestigkeiten quer zur Schichtung auf:

	Würfeldruckfestigkeit β_D
Obernkirchener Sandstein	94 N/mm ²
Roter Wesersandstein	85 N/mm ²
Rüthener Grünsandstein	37 N/mm ²

Die vollständigen Versuchsergebnisse der Druckfestigkeits- und Verformungsprüfungen der RILEM-Körper sind Anhang 4.4 zu entnehmen.

Bei den im Streichverfahren 2-fach an den Längsseiten gefestigten RILEM-Körpern (Kapitel 3.4.1) drang der Steinfestiger bei einem Verbrauch von ca. 4 Litern/m² je Festigung im Mörtel 1 – 1,5 cm ein und im Einzelnen:

	Eindringtiefe in cm
Obernkirchener Sandstein	0,8 – 1,1 cm
Roter Wesersandstein	0,6 – 0,8 cm
Rüthener Grünsandstein	1,0 – 1,3 cm

Der Druckbruch aller Versuchsserien wird durch Ausrieseln des oberflächennahen Fugenmörtels ab ca. 50% der Bruchlast angekündigt. Der erste sichtbare Riss aller *gefestigten* RILEM-Körper trat in vertikaler Richtung im Stein auf der Stirnseite auf. Bei den *ungefestigten* RILEM-Körpern trat der erste Riss vertikal im Stein auf der Längsseite auf, der 2. Riss auf der Stirnseite. Die äußere Zone (bis zu 1 cm) der mit "S" gefestigten RILEM-Körpern aller Sandsteine platzte nach den ersten Rissen großflächig ab, wobei besonders viele Abplatzungen bei den Obernkirchener Sandsteinen auftraten. Bei den ungefestigten und mit "T" gefestigten Sandsteinkörpern traten keine Abplatzungen auf.

Bei der Durchschallung der RILEM-Körper in Querrichtung, Meßlänge 11,5 bis 12 cm, waren die Schallgeschwindigkeiten bei ungefestigten und gefestigten Steinen gleich groß, d.h., daß die im Streichverfahren erzielte Eindringtiefe des Steinfestigers zu keiner wesentlichen Änderung der Schallgeschwindigkeit führte:

	Schallgeschwindigkeit v
Obernkirchener Sandstein	2,7 – 2,9 km/s
Roter Wesersandstein	2,8 – 2,9 km/s
Rüthener Grünsandstein	2,3 – 2,5 km/s

Der Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Linien der RILEM-Körper ist Anhang 4.5 zu entnehmen.

5 Auswertung und Diskussion der Versuchsergebnisse

5.1 Aufnahme der Festigungsmittel

Auf die Wirkungsweise der beiden Steinfestiger (Kapitel 3.1.3) sei an dieser Stelle nochmals hingewiesen. Der mit "T" bezeichnete Festiger hat neben der festigenden Wirkung auch hydrophobierende Wirkung, hingegen der mit "S" bezeichnete Festiger laut Produktmerkblatt ausschließlich festigend wirkt.

Bei allen Materialien nimmt bei Mehrfachfestigung die Aufnahme des Festigers und der nach Erhärtung verbleibende Feststoffanteil ab. Der hinzugewachsene Feststoffanteil im Verhältnis zur aufgenommenen Menge war bei dem Einkomponenten-Festiger "S" immer höher als beim Festiger "T", der im Verhältnis 2 : 1 (2 Teile Wasser : 1 Teil Festiger) mit Wasser verdünnt wurde. Die Gelabscheidung, das ist der nach Aushärtung im Material verbleibende Massezuwachs, ist bei der Festigung mit Festigungsmittel "S" in jedem Material höher als bei der Festigung mit "T". Da das Festigungsmittel "T" ein mit Wasser verdünntes Mittel ist, ist der geringere Massezuwachs bei gleicher Tränkungs-dauer gegenüber der Festigung mit Festigungsmittel "S", welches ein unverdünntes Einkomponentensystem ist, erklärbar.

Im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit einer Instandsetzungsmaßnahme ist eine möglichst genaue Definition des zu erreichenden Zieles (z.B. Erhöhung der Druckfestigkeit) festzulegen, um einen zu hohen (und damit zu teuren) Festigungsmiteleintrag zu vermeiden. In Voruntersuchungen ist es deshalb wichtig herauszufinden, bei der wievielten Festigung gar keine oder nur noch eine geringfügige Erhöhung der zu verbesserten Eigenschaft zu erreichen ist. In den folgenden Kapiteln werden die Veränderungen der Eigenschaften nach mehrfacher Festigung zusammengefaßt. Die Abbildungen 4.1 und 4.2 für Ziegel, die Abbildungen 4.3 bis 4.5 für Sandsteine sowie Abbildung 4.6 für Mörtel zeigen, daß nach der zweiten Festigung kaum noch Festiger aufgenommen wird und sich daher die mechanischen Eigenschaften nur noch geringfügig ändern, so daß man in der Praxis im allgemeinen mit einer zweifachen Festigerbehandlung auskommen wird.

Bei mehrfacher Volltränkung der Materialien in Festiger "S" bzw. "T" wurden im Mittel etwa folgende Mengen Festiger in l/m^3 aufgenommen:

Tabelle 5.1: Aufnahme Festiger "S" bzw. "T" bei Mehrfachtränkung (Mittelwerte)

	Aufnahme Festiger [l/m ³] bei mehrfach Festigung mit "S" bzw. "T"					
	1-fach S	2-fach S	3-fach S	1-fach T	2-fach T	3-fach T
Fabrikneue Ziegel	150	55	20	110	60	30
Historische Ziegel	156	90	55	180	140	80
Mörtel	240	180	120	230	100	100
Obernkirchener Sandstein	74	23	15	74	35	20
Roter Weser-sandstein	85	23	8	45	30	23
Rüthener Grün-sandstein	156	100	45	156	100	45

5.2 Biegezugfestigkeit der Mörtel und Sandsteine

Die folgende Abbildung enthält die Steigerung der Biegezugfestigkeiten der Sandsteine und des Mörtels. Da die Biegezugfestigkeiten bei der dritten Festigung nur noch geringfügig ansteigen, sind lediglich die Untersuchungsergebnisse der zweifach gefestigten Materialien aufgeführt.

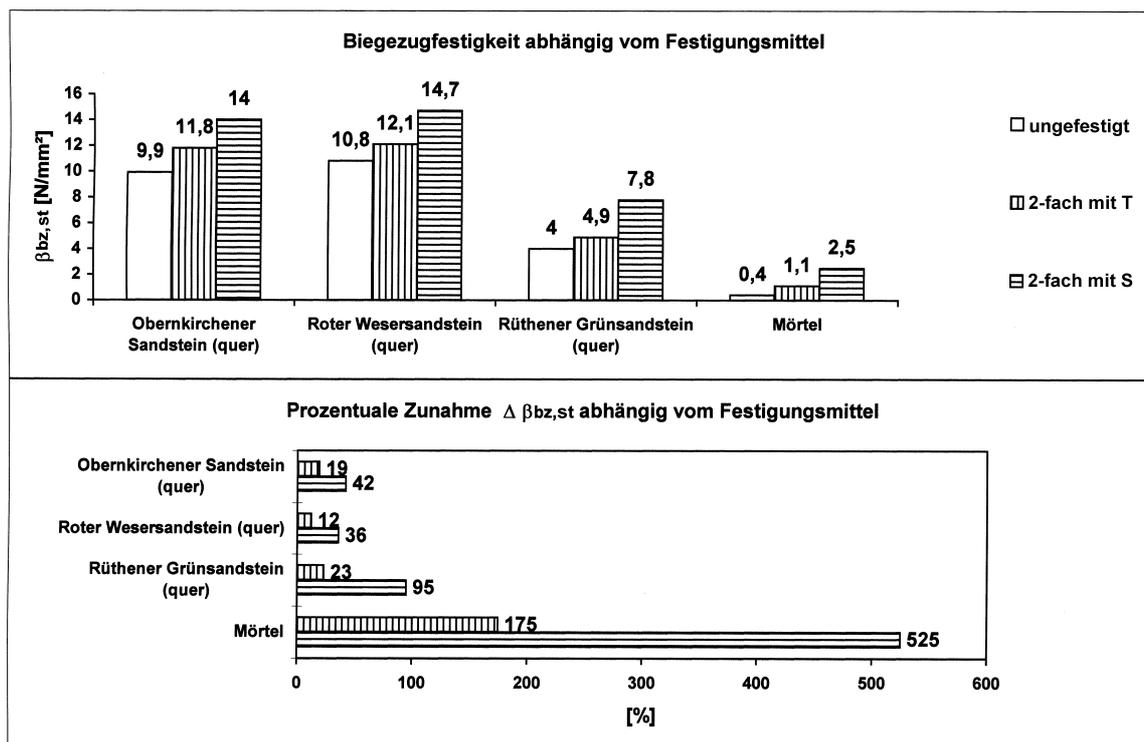


Abbildung 5.1: *Biegezugfestigkeiten ungefestigter und gefestigter Mörtel und Sandsteine, Mittelwerte aus Tabelle 4.14 und 4.24*

Bei allen mit „T“ gefestigten Materialien ist die Steigerung der Biegezugfestigkeiten im Verhältnis zu mit „S“ gefestigten Materialien um ein vielfaches geringer.

Die größte Steigerung der Biegezugfestigkeit durch Festigung mit „S“ weisen die Mörtelproben auf. Dabei ist zu berücksichtigen, daß sich die Erhöhung der Biegezugfestigkeit auf die Mittelwerte der Mörtelfestigkeit bezieht. Die ungefestigten Mörtelproben weisen bei den Biegezugfestigkeiten einen Variationskoeffizient von $V \approx 7\%$ auf, die gefestigten Mörtelproben dagegen Variationskoeffizienten zwischen 15% und 31%, vergleiche Kapitel 4.4.2, Tabelle 4.24. Betrachtet man die Festigkeitssteigerung von Mörteln einer Herstellung so schwankt bei mit „S“ gefestigten Mörteln die Biegezugfestigkeitssteigerung zwischen 300% und 900%, bei mit „T“ gefestigten Mörteln zwischen 45% und 300 %.

Aus Abbildung 5.1 geht hervor, daß die größte Biegezugfestigkeitssteigerung der Sandsteine von 95% der Rühthener Grünsandstein 2-fach mit „S“ gefestigt aufweist. Die Biegezugfestigkeiten des Obernkirchener und roten Wesersandsteins steigerten sich nach zweifacher Festigung mit „S“ auf 42% bzw. 36%. Beim ungefestigten Obernkirchener Sandstein und beim ungefestigten Rühthener Grünsandstein unterscheidet sich die Biegezugfestigkeit längs zur Schichtung nur unwesentlich von den Biegezugfestigkeit quer zur Schichtung. Der ungefestigte rote Wesersandstein weist quer zur Schichtung eine um 44% höhere Biegezugfestigkeit auf als längs zur Schichtung. Die in Kapitel 2.1.3 und 4.1.2.2 behandelte Anisotropie der Sandsteine ist beim roten Wesersandstein hinsichtlich der Biegezugfestigkeit somit besonders ausgeprägt. Beim Rühthener Grünsandstein erhöht sich die Biegezugfestigkeit quer zur Schichtung nach der dritten Festigung nochmals um 30% gegenüber zweifacher Festigung. Bei den anderen beiden Sandsteinen erhöht sich die Biegezugfestigkeit nach dritter Festigung nur noch um maximal 8%.

5.3 Rohdichte und Druckfestigkeit der Ziegel, Mörtel und Sandsteine

Die Rohdichte ist für die physikalisch/mechanischen Eigenschaften eines Materials von wesentlicher Bedeutung. Tendenziell steigt die Druckfestigkeit mit zunehmender Rohdichte. Die Steigerung der Rohdichte gefestigter Materialien ist im Hinblick auf die Änderungen der bauphysikalischen Eigenschaften von Bedeutung.

Bei allen mit "T" gefestigten Materialien ist die Steigerung der Rohdichten und Druckfestigkeiten im Verhältnis zu mit "S" gefestigten Materialien deutlich geringer.

Die folgenden Grafiken enthalten die Steigerung der Rohdichten und Druckfestigkeiten der Steine sowie des Mörtels nach zweifacher Festigung. Bei der dritten Festigung steigen Rohdichten und Druckfestigkeiten nur noch geringfügig an, so daß man sich hier auf die Untersuchungsergebnisse zweifach gefestigter Materialien beschränken kann.

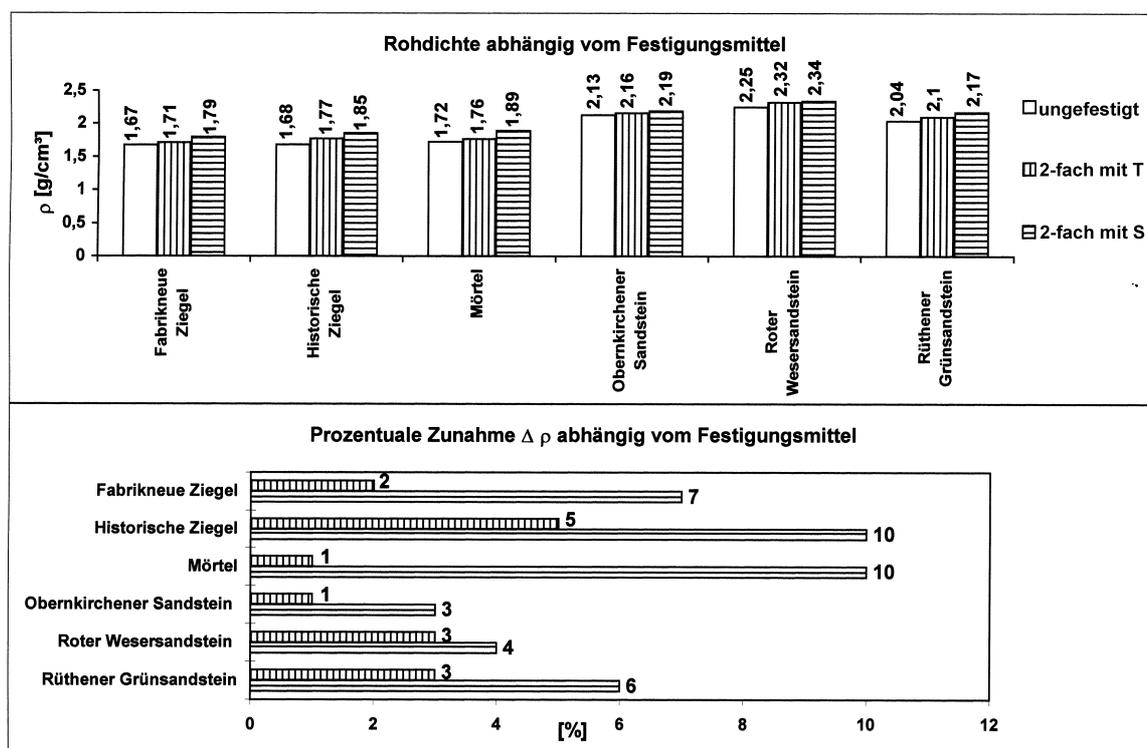


Abbildung 5.2: Rohdichten ungefestigter und gefestigter Ziegel, Mörtel und Sandsteine, Mittelwerte aus Tabelle 4.5, 4.12 und 4.23

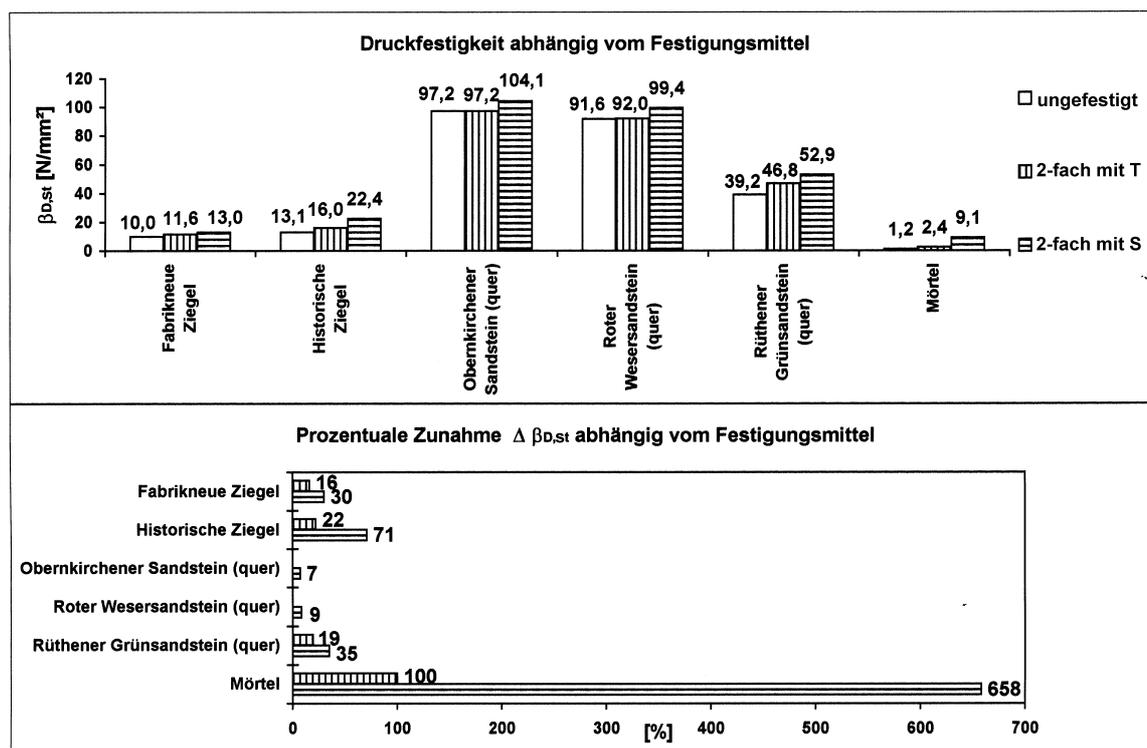


Abbildung 5.3: *Druckfestigkeiten ungefestigter und gefestigter Ziegel, Mörtel und Sandsteine, Mittelwerte aus Tabelle 4.5, 4.13 und 4.24*

Wie Abbildung 5.3 zeigt, weisen die fabrikneue Ziegel nach zweifacher Festigung mit "S" eine Druckfestigkeitssteigerung von ca. 30% auf ($V < 10\%$). Die mit "T" gefestigten Ziegel erreichen dagegen nur etwa die Hälfte des Festigkeitszuwachs (16%).

Die historischen Ziegel wiesen bei Druckfestigkeiten zwischen $\beta_{D,st} = 7 \text{ N/mm}^2$ und 25 N/mm^2 hohe Streuungen auf, mit $15\% < V < 50\%$. Diese Beobachtung entspricht zahlreichen Untersuchungen an historischen Ziegeln (Kapitel 2.1.1.2) und macht eine generelle Aussage über die mögliche Erhöhung der Druckfestigkeit mittels Steinfestigungsmitteln schwierig, da die "Nullproben" bereits große Schwankungsbreiten aufweisen. Die festigende Wirkung bei historischen Ziegeln ist dennoch aufgrund des steigenden Mittelwertes tendenziell nachweisbar und in Anlehnung an die Ergebnisse der fabrikneuen Ziegel bei zweifacher Volltränkung mit "S" mit ca. 30% Druckfestigkeitssteigerung zu erwarten.

Eine Druckfestigkeitssteigerung über 600% der mit "S" gefestigten Mörtel ist die höchste Festigkeitssteigerung aller Materialien. Dabei ist aber zu berücksichtigen, daß sich die Erhöhung der Druckfestigkeit auf die Mittelwerte der Mörtelfestigkeit bezieht. Die ungefestigten Mörtelproben weisen bei der Druckfestigkeit einen Variationskoeffizient von $V \approx 30\%$ auf. Betrachtet man die Festigkeitssteigerung von Mörteln einer Herstellung so beträgt bei mit "S" gefestigten Mörteln die Druckfestigkeitssteigerung 350% bis 800%, bei mit "T" gefestigten Mörteln 20% bis 150%.

Bei den Sandsteinen wurde die Druckfestigkeit längs und quer zur Schichtung untersucht. Die Auswirkung der Schichtungsrichtung auf die Druckfestigkeit ist bei den Sandsteinen unterschiedlich groß. Beim ungefestigten Obernkirchener Sandstein und beim ungefestigten Rüthener Grünsandstein ist die Druckfestigkeit quer zur Schichtung ca. 5% höher, beim ungefestigten roten Wesersandstein ca. 7% höher als die Druckfestigkeit längs zur Schichtung. Die höhere Druckfestigkeit quer zur Schichtung wird mit dem stärker gewundenen Rissverlauf erklärt, wie in Kapitel 2.1.3 erläutert. Bei den Sandsteinen ist der prozentuale Druckfestigkeitsanstieg nach mehrfacher Festigung längs und quer zur Schichtung annähernd gleich groß. Analog zur Steigerung zur Bie-

gezugsfestigkeit ist die größte Erhöhung der Druckfestigkeit beim Rühthener Grünsandstein erkennbar (Steigerung der Druckfestigkeit um 57% nach 2-facher Festigung mit "S"). Beim Rühthener Grünsandstein treten aber auch die größten Streuungen mit $5\% < V < 15\%$ auf. Die Druckfestigkeitssteigerung nach Festigung der Sandsteine ist prozentual jedoch geringer als die Steigerung der Biegezugfestigkeit.

5.4 Schallgeschwindigkeit und dynamischer E-Modul der Ziegel, Mörtel und Sandsteine

Die folgenden Grafiken enthalten die Erhöhung der Schallgeschwindigkeit der Steine und des Mörtels nach zweifacher Festigung und des daraus ermittelten dynamischen E-Moduls. Bei der dritten Festigung steigen Schallgeschwindigkeiten und dynamischer E-Modul nur noch geringfügig an, so daß die folgenden Abbildungen wiederum die Untersuchungsergebnisse nach nur zweifacher Festigung enthalten.

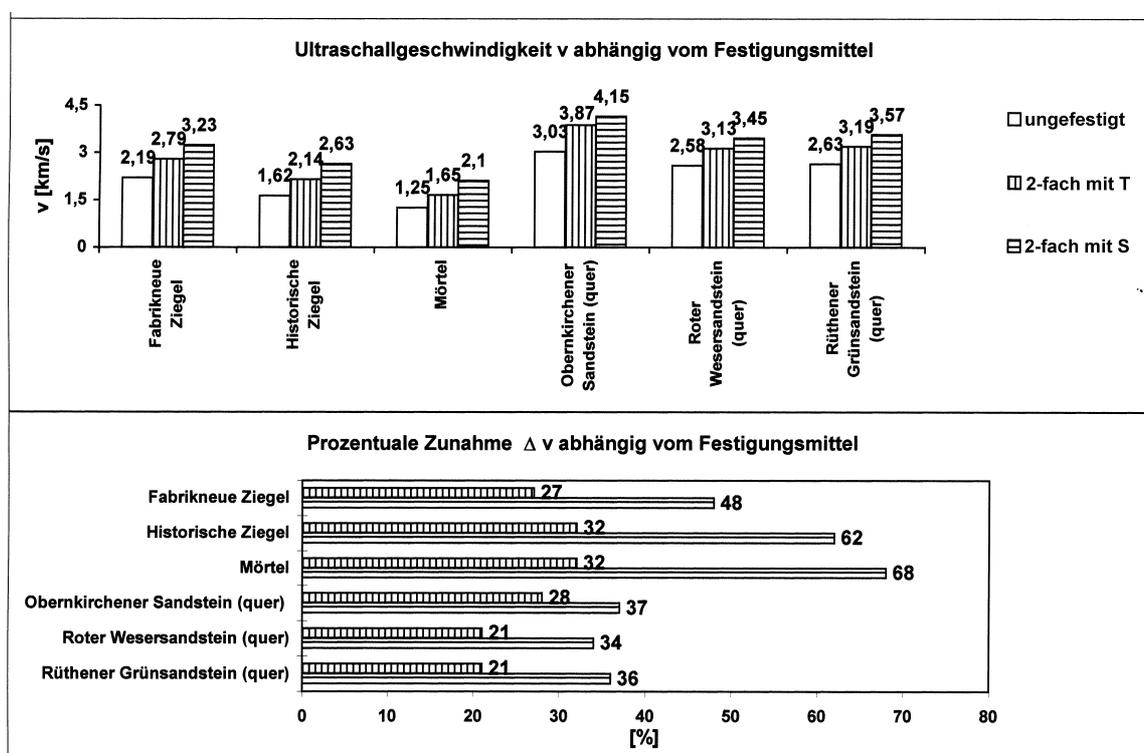


Abbildung 5.4: Ultraschallgeschwindigkeiten ungefestigter und gefestigter Ziegel, Mörtel und Sandsteine, Mittelwerte aus Tabelle 4.6, 4.15 und 4.25

Bei allen mit "T" gefestigten Materialien ist die Steigerung der Schallgeschwindigkeiten und dynamischen E-Moduln im Verhältnis zu mit "S" gefestigten Materialien geringer.

Die Ultraschallgeschwindigkeit der historischen Ziegel steigt nach zweifacher Festigung mit "S" um ca. 62% an. Der hohe Variationskoeffizient ($V = 11\%$ bis 30%) bestätigt, wie bereits bei der Druckfestigkeit historischer Ziegel festgestellt, die große Streuung bei den Materialkennwerten historischer Ziegel.

Die Mörtelproben weisen nach 2-facher Festigung mit "S" mit der Erhöhung der Ultraschallgeschwindigkeit um 68% die höchste Steigerung auf, der Variationskoeffizient ist mit $V \leq 10\%$ relativ niedrig.

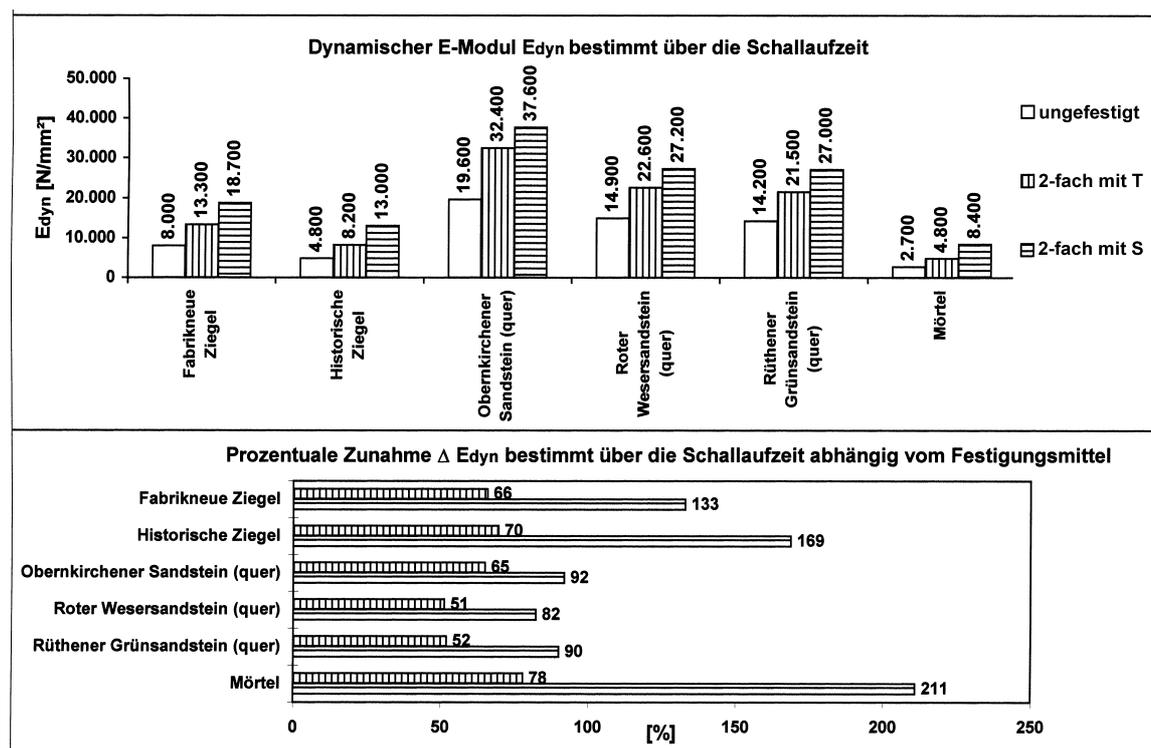


Abbildung 5.5: *Dynamischer E-Modul bestimmt über die Schalllaufzeit ungesfegter und gefestigter Ziegel, Mörtel und Sandsteine, Mittelwerte aus Tabelle 4.6, 4.16 und 4.25*

Beim roten Wesersandstein ist die Schallgeschwindigkeiten längs zur Schichtung um ca. 17% höher als quer zur Schichtung. Da die Schallgeschwindigkeit bei der Berechnung des dynamischen E-Moduls zum Quadrat eingeht, steigt der dynamische E-Modul längs zur Schichtungsrichtung um 38% gegenüber quer zur Schichtung. Der Obernkirchener Sandstein und der Rühthener Grünsandstein weisen nur geringe Unterschiede der Schallgeschwindigkeit längs und quer zur Schichtung auf (maximal 2%) und somit auch einen annähernd gleichen dynamischen E-Modul in beiden Richtungen. Die Streuung beider, Ultraschallgeschwindigkeit und dynamischer E-Modul, sind mit $V < 4\%$ relativ gering.

Aus der Ermittlung der Resonanzfrequenz der Mörtel- und Sandsteinprismen kann die Querdehnzahl μ bestimmt werden. Die Ergebnisse sind in Anhang 4.3-1 bis 4.3-2 zusammengestellt. Die Querdehnzahl der gefestigten Sandsteine steigt, die elastische Querdehnzahl der gefestigten Mörtel wird hingegen geringer. Die Bestimmung der Querdehnzahl μ ist mittels der Resonanzfrequenzmethode sehr ungenau. Ein Hinweis darauf ist der hohe Variationskoeffizient von bis zu 75%. Beim roten Wesersandstein konnte die Querdehnzahl μ aufgrund der ausgeprägten Anisotropie gar nicht mittels der Resonanzfrequenzmessung bestimmt werden. Aufgrund dieser Untersuchungsergebnisse erweist sich die Bestimmung der Querdehnzahl mithilfe der Resonanzfrequenzmethode als ungeeignet, siehe auch Kapitel 4.4.3.

5.5 Statischer E-Modul der Sandsteine

Der statische E-Modul wurde nur bei den Sandsteinen bestimmt, weil der Mörtel aufgrund der geringen Festigkeit (MG I) schon bei der unteren Prüfspannung zerbrach, Ziegel wurden aufgrund der Probekörpergeometrie nicht untersucht. Abbildung 5.6 enthält die Steigerung des statischen E-Moduls unter Druckbeanspruchung nach Festigung bei Sandsteinen.

Bei den mit "T" gefestigten Sandsteinen ist die Steigerung des statischen E-Moduls im Verhältnis zu mit "S" gefestigten Sandsteinen geringer.

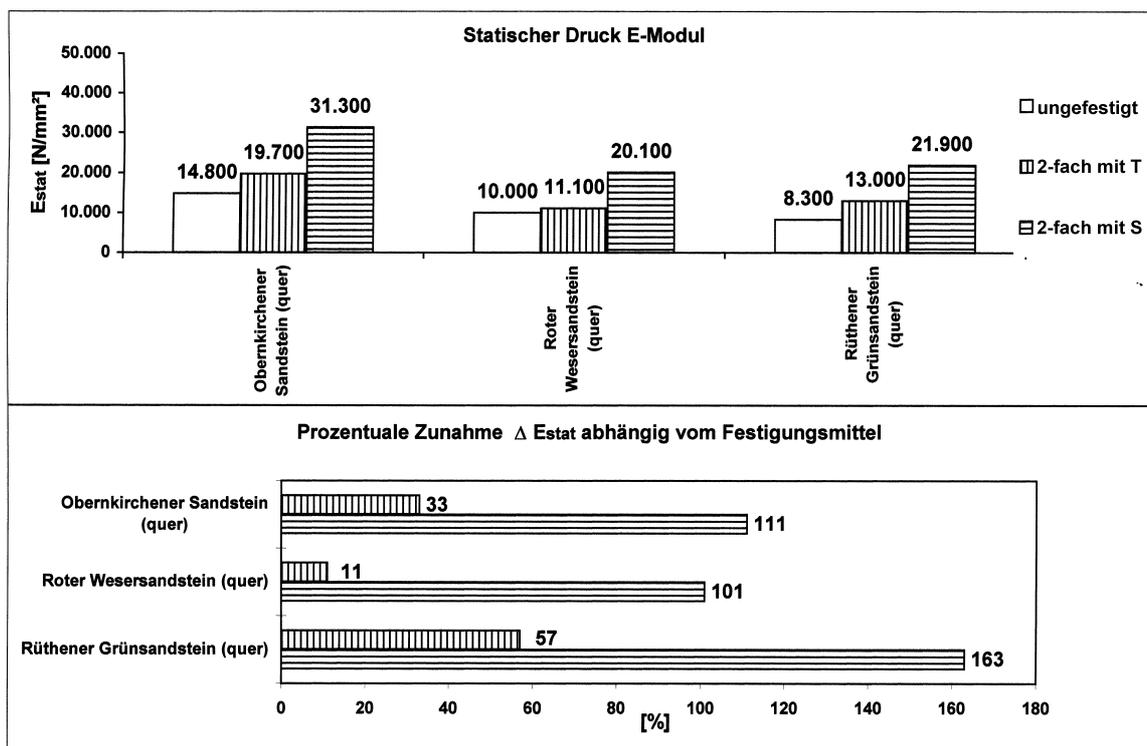


Abbildung 5.6: Statischer E-Modul E_{stat} ungefestigter und gefestigter Sandsteine, Mittelwerte aus Tabelle 4.17

Alle 2-fach gefestigten Sandsteine mit "S" weisen große Steigerungen des statischen E-Moduls von über 100% auf. Bei den ungefestigten Sandsteinen waren die statischen E-Moduln bei allen Sandsteinen längs und quer zur Schichtung annähernd gleich groß, der Unterschied war kleiner als 5%. Bei den Rüthener Grünsandsteinen traten jedoch große Schwankungen auf (V bis zu 23%). Die mit "S" gefestigten roten Wesersandsteine wiesen längs zur Schichtung einen um ca. 40% höheren statischen E-Modul auf als quer zur Schichtung.

5.6 Gesamtporosität sowie Wasseraufnahme der Ziegel, Mörtel und Sandsteine

Die Gesamtporosität konnte aufgrund fehlender Apparatur nicht im eigenen Labor durchgeführt werden. An den ungefestigten Materialien, außer am Mörtel, wurde dieser Parameter an der Universität Hannover bestimmt.

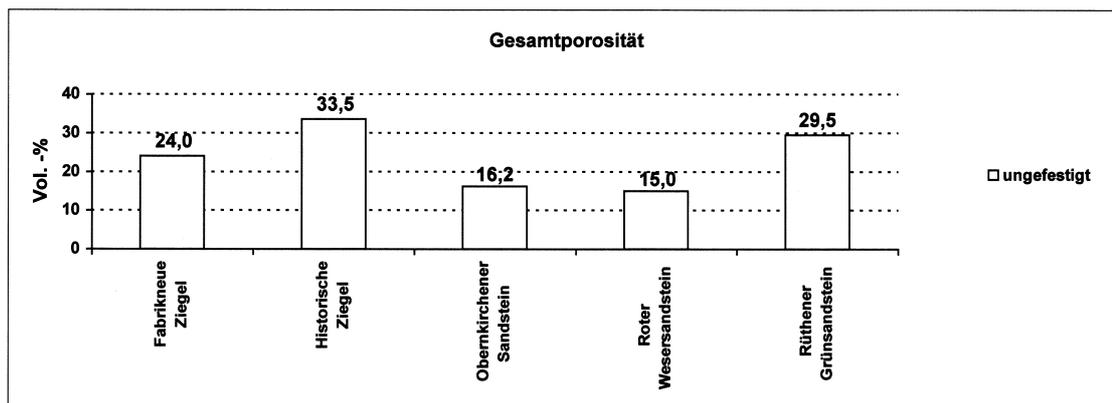


Abbildung 5.7: Gesamtporosität ungefestigter Ziegel und Sandsteine, Mittelwerte aus Tabell 4.7 und 4.18

Wie Sattler [102] bereits feststellte, nimmt die Gesamtporosität gefestigter Materialien tendenziell ab. Die Folgen der Festigung auf die Gesamtporosität konnte anhand eigener Untersuchungen nicht festgestellt werden. Die Reduzierung der Wasseraufnahme nach Festigung ist in Abbildung 5.8 dargestellt.

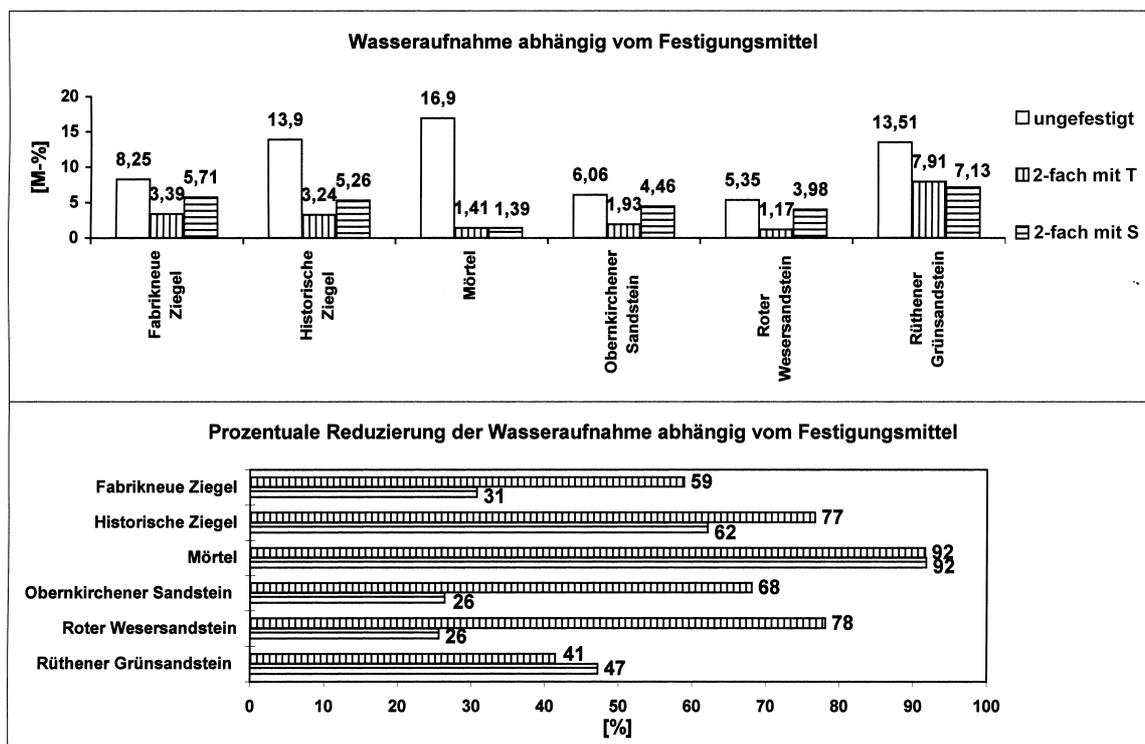


Abbildung 5.8: Wasseraufnahme ungefestigter und gefestigter Ziegel, Mörtel und Sandsteine, Mittelwerte aus Tabelle 4.9, 4.18 und 4.26

Da der Festiger "T" festigend und hydrophobierend wirkt, ist die Reduzierung der Wasseraufnahme bei den mit "T" gefestigten Materialien höher. Grundsätzlich gilt jedoch, je höher die Gesamtporosität, desto höher die Wasseraufnahme. Bei den mit "T" gefestigten Ziegeln, Mörtel und Rühthener Grünsandstein lag der Variationskoeffizient $12\% < V < 20\%$, bei historischen Ziegeln sogar bis $V = 50\%$. Bei den beiden anderen Sandsteinen war der Variationskoeffizient $V < 10\%$, die Wasseraufnahme also nur mit geringen Streuungen behaftet.

5.7 Frost-Tau-Wechsel der Ziegel, Mörtel und Sandsteine

Der Frost-Tau-Wechsel Versuch wurde bei allen Materialien nach 70 Zyklen abgebrochen. Alle ungefestigten Materialien wiesen gegenüber den gefestigten Materialien ein deutlich schlechteres (d.h. früherer Verwitterungsbeginn) Frost-Tau-Wechsel Verhalten auf. Tendenziell wiesen die mit "T" gefestigten Materialien frühere Gefügestörungen in Form von netzartigen Rissen bis hin zur völligen Zerstörung als die mit "S" gefestigten Materialien auf. Die historischen Ziegel waren spätestens nach 27 Frost-Tau-Wechseln zerstört, bei mit "T" gefestigten historischen Ziegeln waren drei von fünf Ziegeln nach 27-30 Wechseln zerstört. Die restlichen beiden wiesen erst nach 70 Wechseln netzartige Risse auf. Während die fabrikneuen ungefestigten Ziegel nach 40-60 Wechseln zerstört waren, zeigten die mit "S" gefestigten Ziegel nach 70 Wechseln optisch keine Schäden, jedoch die mit "T" gefestigten Ziegel wiesen ab dem 25-ten Wechsel netzartige Risse auf, blieben aber bis zum 70. Wechsel unzerstört. Bei den Mörtelproben bewirkt die Festigung mit "S" wie auch mit "T" eine deutliche Erhöhung der Widerstandsfähigkeit gegenüber Frost-Tau-Wechseln. Die ungefestigten Mörtel waren nach 5 Frost-Tau-Wechseln zerstört, hingegen zeigten die mit "S" gefestigten Mörtel erst ab dem 60. Frost-Tau-Wechsel erste Risse, die mit "T" gefestigten Mörteln ab dem 45. Wechsel. Alle Sandsteine, ob gefestigt oder ungefestigt waren nach 70 Frost-Tau-Wechseln nicht zerstört, die ungefestigten Rühthener Sandsteine waren aber optisch erkennbar grobporig und stark ausgewaschen.

Die Ultraschallgeschwindigkeit sinkt bei allen Materialien nach einer Frost-Tau-Wechsel Behandlung ab und die Wasseraufnahme nimmt zu, vergleiche Tabellen 4.9 und 4.20. Dies ist möglicherweise ein Indiz für den durch den Kristallisationsdruck des gefrorenen Wassers erweiterten Porenraum.

Der Masseverlust nach 70 Frost-Tau-Wechseln ist bei den mit "S" gefestigten Ziegeln und Sandsteinen gegenüber den ungefestigten und mit "T" gefestigten Ziegeln und Sandsteinen am größten, vergleiche Tabellen 4.10 und 4.21.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die mit "S" gefestigten Materialien den größten Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel aufwiesen. Insbesondere bei Mörteln bewirkt die Festigung mit "S" bzw. "T" eine signifikante Verbesserung der Verwitterungsbeständigkeit gegenüber ungefestigten Mörteln.

5.8 Versuche an ungefestigten und gefestigten RILEM-Körpern

5.8.1 Bruchspannungen der RILEM-Körper

Die Festigung erfolgte zweifach im Streichverfahren auf beiden Längsseiten der RILEM-Körper, der Verbrauch betrug je Festigung ca. 4-5 l/m², siehe Kapitel 3.4.1. Die Mittelwerte der Bruchspannung der mit Mörtelgruppe I und Ziegeln bzw. Sandsteinen aufgemauerten RILEM-Körper ist in Abbildung 5.9 dargestellt. Die angegebenen Werte für die Bruchspannung beinhalten bereits den Formfaktor $f=0,85$ aufgrund der Biegeschlankheit der RILEM-Körper $h/d \approx 3,5$ und die Umrechnung auf eine einheitliche Mörteldruckfestigkeit MG I, siehe Kapitel 4.5.1 und 4.5.2.

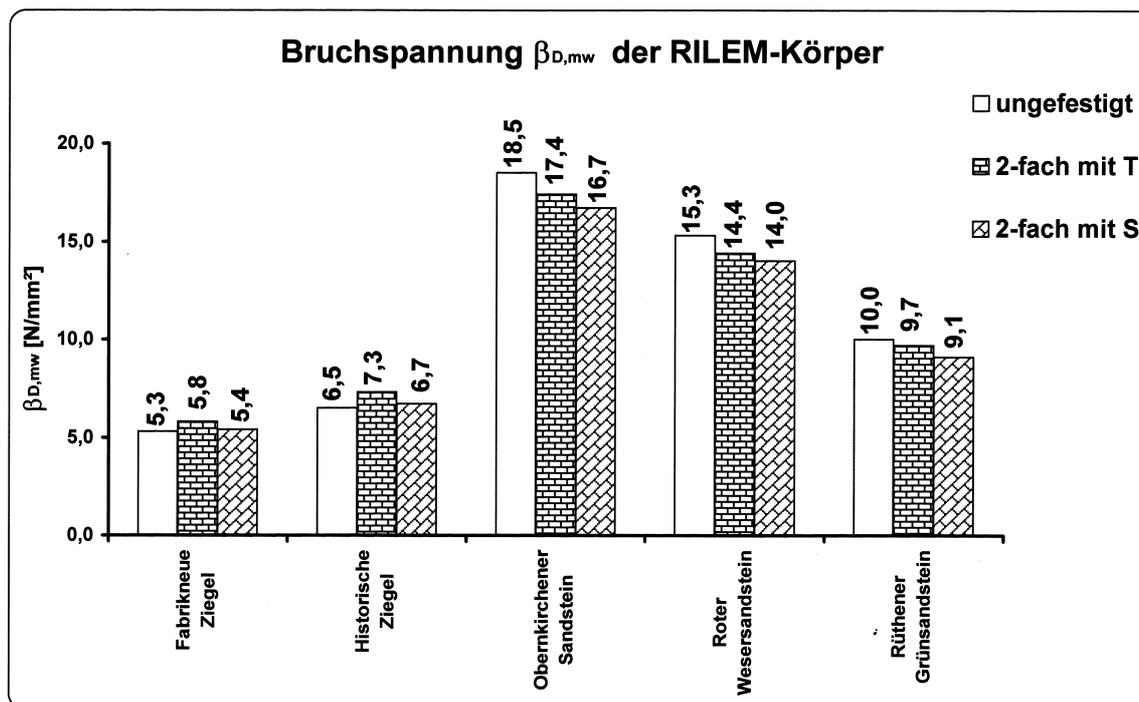


Abbildung 5.9: Bruchspannung der RILEM-Körper ungefestigt und 2-fach im Streichverfahren mit "S" bzw. "T" gefestigt, Mittelwerte aus Anhang 4.4-1 bis 4.4-7

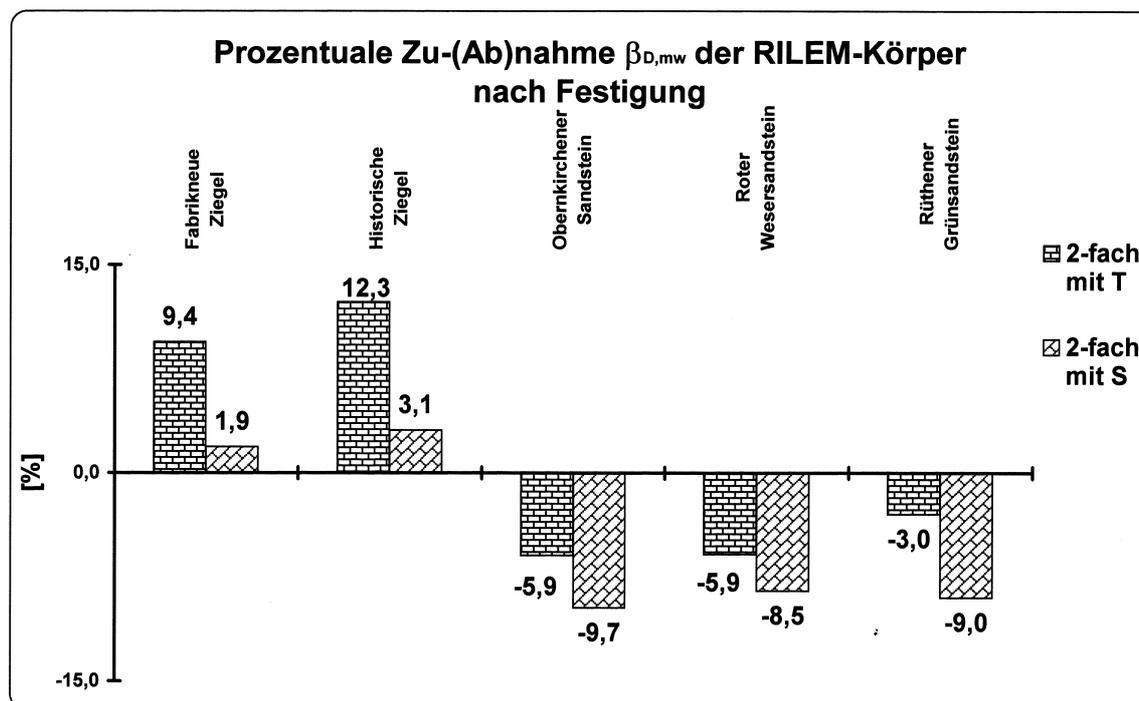


Abbildung 5.10: Prozentuale Zu-(Ab)nahme der Bruchspannung der RILEM-Körper nach Festigung mit "S" bzw. "T"

Die Bruchspannung der RILEM-Körper, gemauert aus fabrikneuen und historischen Ziegeln, steigt nach der Festigung geringfügig an. Bei den RILEM-Körpern aus historischen Ziegeln ist bei Auswertung der Versuchsergebnisse zu berücksichtigen, daß der Variationskoeffizient von über 30% auf große Streuungen hinweist. Die Erhöhung der Bruchspannung an RILEM-Körpern aus historischen Ziegeln von 12% muß nicht auf die Festigung zurückzuführen sein, sondern könnte auch in einer höheren Steindruckfes-

tigkeit im Rahmen größerer Streuungen bei historischen Ziegel begründet sein. Die nur geringe Erhöhung der Bruchspannung nach der Festigung wird in der geringen Eindringtiefe des Steinfestigers in Stein und Mörtel von 1cm bis maximal 1,5 cm bei einer insgesamt Dicke des Mauerwerkes von 11,5cm (fabrikneue Ziegel) bzw. 12cm (historische Ziegel) gesehen. Folglich sollte für eine Erhöhung der Tragfähigkeit des Mauerwerkes die Eindringtiefe des Steinfestigers erhöht werden. Dies könnte beispielsweise durch Setzen von sogenannten Verpreßpackern in Stein und Mörtel erfolgen. Bei vollständiger Durchtränkung von Stein und Mörtel ist, wie diese Versuche generell ergaben, eine wesentlich höhere Mauerwerksfestigkeit erreichbar, da die Einzelkomponenten Stein und Mörtel bei Volltränkung mit "S" Festigkeitssteigerungen von 30% bei Steinen bzw. 350% bei Mörteln erreichen, siehe Kapitel 5.3.

Bei der Auswertung der Bruchspannung der RILEM-Körper aus Sandsteinen muß berücksichtigt werden, daß aufgrund der geringen Menge des zur Verfügung stehenden Steinmaterials nur je drei RILEM-Körper (ungefestigt, gefestigt mit "S", gefestigt mit "T") hergestellt und geprüft werden konnten. Tendenziell ist eine bis zu maximal 10% verminderte Bruchspannung der mit "S" gefestigten RILEM-Körper und eine bis zu 6% verminderte Bruchspannung der mit "T" gefestigten RILEM-Körper erkennbar, vergleiche Abbildung 5.10. In Kapitel 4.5.2 wurde bereits beschrieben, daß die äußere Zone der mit "S" gefestigten Sandsteinkörper bis in ca. 1cm Tiefe großflächig abplatzte, was zu einer Schwächung des Querschnittes und somit insgesamt zu einer geringeren Mauerwerkstragfähigkeit führte. Forderung hieraus ist, daß bei der Festigung von Mauerwerk eine zu hohe Festigkeit und damit verbundene Steifigkeit der äußeren Schale unbedingt vermieden werden muß, um Abplatzungen entgegenzuwirken.

5.8.2 Auftreten des 1. Risses an den RILEM-Körpern

Der erste "sichtbare" Riss trat bei den RILEM-Körpern aus den jeweiligen Steinmaterialien unterschiedlich auf, wie folgende Zusammenstellung zeigt:

Fabrikneue Vollziegel	ungefestigt bei	0,87 bis 0,99 $\beta_{D,mw}$ i.M 0,96 $\beta_{D,mw}$
	gefestigt "S" bei	0,85 bis 0,98 $\beta_{D,mw}$ i.M 0,92 $\beta_{D,mw}$
	gefestigt "T" bei	0,85 bis 0,98 $\beta_{D,mw}$ i.M 0,94 $\beta_{D,mw}$
Historische Vollziegel	ungefestigt bei	0,73 bis 0,99 $\beta_{D,mw}$ i.M 0,87 $\beta_{D,mw}$
	gefestigt "S" bei	0,81 bis 0,84 $\beta_{D,mw}$ i.M 0,83 $\beta_{D,mw}$
	gefestigt "T" bei	0,80 bis 0,95 $\beta_{D,mw}$ i.M 0,90 $\beta_{D,mw}$
Obernkirchener Sandstein	ungefestigt bei	0,58 bis 0,72 $\beta_{D,mw}$ i.M 0,66 $\beta_{D,mw}$
	gefestigt "S" bei	0,52 bis 0,67 $\beta_{D,mw}$ i.M 0,60 $\beta_{D,mw}$
	gefestigt "T" bei	0,42 bis 0,56 $\beta_{D,mw}$ i.M 0,49 $\beta_{D,mw}$
Roter Wesersandstein	ungefestigt bei	0,66 bis 0,88 $\beta_{D,mw}$ i.M 0,79 $\beta_{D,mw}$
	gefestigt "S" bei	0,75 bis 0,94 $\beta_{D,mw}$ i.M 0,86 $\beta_{D,mw}$
	gefestigt "T" bei	0,82 bis 0,93 $\beta_{D,mw}$ i.M 0,89 $\beta_{D,mw}$
Rüthener Grünsandstein	ungefestigt bei	0,92 bis 0,95 $\beta_{D,mw}$ i.M 0,94 $\beta_{D,mw}$
	gefestigt "S" bei	0,69 bis 0,97 $\beta_{D,mw}$ i.M 0,87 $\beta_{D,mw}$
	gefestigt "T" bei	0,63 bis 0,98 $\beta_{D,mw}$ i.M 0,76 $\beta_{D,mw}$

Bei den fabrikneuen und historischen Ziegeln sind keine für den Festiger signifikanten Unterschiede festzustellen. Bei den gefestigten RILEM-Körpern wäre aufgrund der geringeren Querdehnung des gefestigten Mörtels ein größeres Verhältnis $\beta_{RiB}/\beta_{D,mw}$ zu

erwarten. Vermutlich ist aufgrund der geringen Eindringtiefe des Steinfestigers in den Mörtel kein Einfluß auf das Verhältnis $\beta_{\text{RiB}}/\beta_{\text{D,mw}}$ festzustellen.

Bei den Sandsteinen verhält sich der Verhältniswert $\beta_{\text{RiB}}/\beta_{\text{D,mw}}$ reziprok zur Festigkeit der RILEM-Körper. Bei den härtesten Sandsteinen (Obernkirchener) in Verbindung mit Mörtelgruppe I führt die hohe Querdehnung des Mörtels zur früheren Rissbildung. Bei den gefestigten Sandsteinkörpern ist keine eindeutige Tendenz feststellbar. Während bei RILEM-Körpern aus Obernkirchener Sandstein bzw. Rüthener Grünsandstein der Verhältniswert $\beta_{\text{RiB}}/\beta_{\text{D,mw}}$ nach einer Festigung sinkt, steigt er beim roten Wesersandstein etwas an.

5.8.3 Einfluß der Mörtel- und Steindruckfestigkeit

Mit steigender Stein- und Mörtelfestigkeit nimmt die Wanddruckfestigkeit in der Regel zu. Zur rechnerischen Bestimmung der Tragfähigkeit von Mauerwerk aus Ziegeln sind aufgrund von Versuchen Rechenansätze z.B. von *Mann* [77] oder *Metje* [86] ermittelt worden, vergl. Kapitel 2.1.1.1. Zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Stein-Mörtel- und Mauerwerksfestigkeit werden Ausgleichsrechnungen gemäß Gleichung (2.1) verwendet:

$$\beta_{\text{D,mw}} = a \cdot \beta_{\text{D,st}}^b \cdot \beta_{\text{D,mö}}^c$$

mit

$\beta_{\text{D,mw}}$ [N/mm ²]	Druckfestigkeit von Mauerwerk,
$\beta_{\text{D,st}}$ [N/mm ²]	mittlere Steinfestigkeit nach Normprüfung,
$\beta_{\text{D,mö}}$ [N/mm ²]	mittlere Mörtelfestigkeit nach Normprüfung,
a,b,c [-]	durch Ausgleichsrechnung bestimmte Koeffizienten.

Die empirischen Ansätze zur Bestimmung der Mauerwerkstragfähigkeit nach *Mann* [77] und *Metje* [86] beziehen sich auf eine Prüfkörperschlankheit von $h/d=5$, siehe Gleichungen (2.1a), (2.1c) und (2.2), Kapitel 2.1.1.1.

Mann: $\beta_{\text{D,mw}} = 0,83 \cdot \beta_{\text{D,st}}^{0,66} \cdot \beta_{\text{D,mö}}^{0,18}$ für alle Steinarten

Metje: $\beta_{\text{D,mw}} = 0,75 \cdot \beta_{\text{D,st}}^{0,55} \cdot \beta_{\text{D,mö}}^{0,26}$ für Vollziegel

EC 6: $\beta_{\text{D,mw}} = 0,60 \cdot \beta_{\text{D,st}}^{0,65} \cdot \beta_{\text{D,mö}}^{0,25}$ für Einsteinauwerk und Vollziegel

Die Ergebnisse eigener Ausgleichsrechnungen sind in folgender Tabelle 5.2 zusammengestellt. Die RILEM-Körper wiesen eine Schlankheit von $h/d \approx 3,5$ auf. Als Steindruckfestigkeit der Sandsteine wurde die Druckfestigkeit nach Untersuchungen gemäß DIN 52 105 [27] an Würfeln mit 5 cm Seitenlänge angesetzt, siehe Anhang 4.1.

Tabelle 5.2: Koeffizienten zur Bestimmung der Festigkeit der RILEM-Körper gemäß Gleichung (2.1)

Steinart	Anzahl der Versuche	Regressionskoeffizienten			Bestimmtheitsmaß
	<i>n</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>r</i> ²
Fabrikneue Vollziegel, ungefestigt	25	0,98	0,78	0,37	0,44
Sandsteine, ungefestigt	11	1,34	0,60	0,07	0,92

Die Ergebnisse in Tabelle 5.2 lassen folgende Tendenzen erkennen: Der Einfluß der Stein- und Mörtelfestigkeit ist bei Vollziegeln und Sandsteinen unterschiedlich groß. Bei Vollziegeln ist der Einfluß der Mörtelfestigkeit größer als bei Sandsteinen. Aufgrund der geringen Anzahl der durchgeführten Mauerwerksversuche an Sandstein-Körpern sind die Ergebnisse trotz des guten Bestimmtheitsmaßes zurückhaltend zu bewerten. Die RILEM-Druckfestigkeit an ungefestigten RILEM-Körpern aus fabrikneuen Vollziegeln war größer, als dies nach der empirischen Formel von *Mann* bzw. *Metje* zu erwarten wäre. Rechnerisch ergeben sich für die mit fabrikneuen Ziegeln der Steinfestigkeitsklasse 8 und Mörtelgruppe I aufgemauerten ungefestigten RILEM-Körper im Mittel folgende Festigkeiten:

- *Mann* (Gl. 2.1a) $\beta_{D,mw} = 3,8 \text{ N/mm}^2$
- *Metje* (Gl. 2.1c) $\beta_{D,mw} = 2,7 \text{ N/mm}^2$
- eigener Ansatz nach Tabelle 5.2 $\beta_{D,mw} = 5,9 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,85 = 5,0 \text{ N/mm}^2$

Der Faktor 0,85 berücksichtigt, wie bereits erläutert, die geringere Prüfkörperschlankheit der geprüften RILEM-Körper ($h/d \approx 3,5$) gegenüber der Prüfkörperschlankheit bei *Mann* und *Metje* mit $h/d=5$. Die höhere Mauerwerksfestigkeit, festgestellt in eigenen Versuchen, könnte auf die geringere Prüfkörperschlankheit zurückzuführen sein, die dann mit dem Faktor 0,85 nicht ausreichend berücksichtigt wäre. Ferner wurden die empirischen Ansätze von *Metje* und *Mann* für Mauerwerk ab Mörtelgruppe II ermittelt. *Metje* [86] stellte fest, daß sich die Druckfestigkeit der in der Stahlschalung hergestellten Mörtelprismen wesentlich von der Druckfestigkeit des Mörtels in der Lagerfuge unterscheiden kann, in [86] heißt es: „...die sich im Mauerwerk einstellende Festigkeit wird wesentlich von der Steinart und dem Feuchtigkeitszustand der Steine bei der Verarbeitung beeinflusst“. Eine Erhöhung der Druckfestigkeit des hier verwendeten Mörtels MG I in der Lagerfuge und somit eine Erhöhung der Mauerwerkstragfähigkeit wäre denkbar. Auch das Ziegelformat hat Einfluß auf die Tragfähigkeit von Mauerwerkskörpern [54], weil dickere Wände größere Eigenspannungen und somit kleinere Festigkeiten aufweisen.

Ausgleichsrechnungen für die gefestigten RILEM-Körper ergaben keinen befriedigenden Zusammenhang zwischen Stein- Mörtel- und Mauerwerksfestigkeit. Die Bestimmtheitsmaße der ermittelten Ausgleichsgeraden lagen zwischen 0,05 und 0,27. Die Ausgleichsgeraden waren somit unbrauchbar. Die Ermittlung einer Ausgleichsgeraden für gefestigte RILEM-Körper ist wegen der geringen Eindringtiefe des Festigers problematisch und läßt keine Aussage über die Gesamtfestigkeit des Steines bzw. Mörtels zu. Um das Tragverhalten dennoch theoretisch zu beschreiben, werden in Kapitel 6 Näherungsberechnungen mit Hilfe der Finiten Elemente durchgeführt.

Für RILEM-Körper, hergestellt aus historischen Ziegeln, konnte aufgrund der großen Schwankungsbreite der Druckfestigkeit historischer Ziegel (festgestellt mittels Ultraschall vor jeder Prüfung der RILEM-Körper) kein Rechenansatz gefunden werden. In [46] wurde ermittelt, daß bei Streuungen der Druckfestigkeiten der Einzelsteine über 40% erhöhte Abweichungen zwischen der Berechnung nach *Mann* und experimentellen Ergebnissen an RILEM-Körpern auftraten. Die mittels Ultraschall ermittelten Streuungen der historischen Ziegel waren auch hier größer als 40%.

5.8.4 Verformungsverhalten der RILEM-Körper

Die Spannungs-Dehnungs-Linien aller RILEM-Körper sind in Anhang 4.5 dargestellt. Für die numerische Beschreibung des Verlaufes der Spannungs-Dehnungs-Linie wurden geeignete Rechenansätze gesucht. Die in [66] von *Kirtschig* aufgrund von Versuchsergebnissen getroffene Annahme, eine Parabel 2. Grades für den Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Linie anzusetzen, stimmte mit den Versuchsergebnissen recht gut überein und schien somit geeignet.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon - \frac{E^2}{b_{mw}} \cdot \varepsilon^2 \quad (5.1)$$

Bei den in dieser Arbeit durchgeführten Versuchen wurden die Mauerwerkskörper stufenlos über den Bruch hinaus belastet, wobei die Spannungen und zugehörigen Dehnungen kontinuierlich aufgezeichnet wurden. Der statische E-Modul bei einem Drittel der Bruchlast konnte aus der zugehörigen Dehnung errechnet werden. Als eigener Ansatz zur Berechnung des Verlaufes der Spannungs-Dehnungs-Linie wurde verwendet:

$$\sigma \text{ [N/mm}^2\text{]} = a \cdot \varepsilon - \frac{a^2}{b} \cdot \varepsilon^2 \quad \text{mit } \varepsilon \text{ in [mm/m]} \quad (5.2)$$

Für die ungefestigten RILEM-Körper aus fabrikkneuen Ziegeln erwies sich der Ansatz nach Gleichung 5.2 zur Berechnung des Verlaufes der Spannungs-Dehnungs-Linie mit einem Bestimmtheitsmaß $r^2 = 0,99$ als hervorragend geeignet. Die beiden Regressionskoeffizienten a und b entsprechen näherungsweise:

- a dem empirisch ermittelten E-Modul des RILEM-Körpers in kN/mm^2 bei einem Drittel der Bruchlast und
- b dem vierfachen der RILEM-Druckfestigkeit in N/mm^2 .

Exemplarisch ist in folgender Abbildung 5.11 eine aus Versuch ermittelte Spannungs-Dehnungs-Linie der Spannungs-Dehnungs-Linie nach obigem Ansatz, Gleichung 5.2, gegenübergestellt.

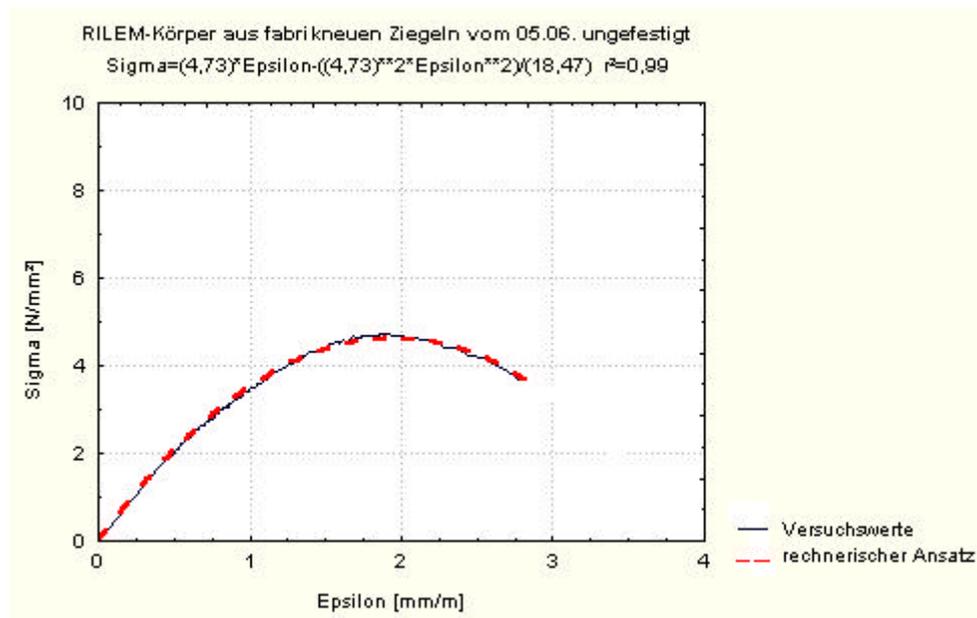


Abbildung 5.11: Versuchstechnisch und rechnerisch nach Gleichung (5.2) ermittelte Spannungs-Dehnungs-Linie

Da die E-Moduli der RILEM-Körper und deren Druckfestigkeiten aufgrund unterschiedlicher Mörteldruckfestigkeiten schwankten (E-Modul $V \approx 32\%$, Druckfestigkeit $V \approx 21\%$, vergl. Kapitel 4.5.1 und Anhang 4.4) kann aufgrund der durchgeführten Versuche zahlenmäßig kein pauschaler Ansatz angegeben werden. Die Regressionskoeffizienten a und b schwankten somit unter Berücksichtigung aller Mauerwerkskörper analog zu E-Modul und Druckfestigkeit der RILEM-Körper. Im Mittel ergab sich folgende Gleichung für ungefestigte RILEM-Körper aus fabrikkneuen Ziegeln, vergl. Anhang 5.1-1:

$$\sigma \text{ [N/mm}^2\text{]} = 5,75 \cdot \varepsilon - \frac{5,75^2}{26,48} \cdot \varepsilon^2 \quad (5.3)$$

Erwartungsgemäß nahm der Regressionskoeffizient a mit steigender Mörteldruckfestigkeit zu, das heißt, daß die Steigung der Spannungs-Dehnungs-Linie steiler verlief.

Die mit „S“ gefestigten RILEM-Körper aus fabrikneuen Ziegeln weisen in der Anfangsphase im Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Linie einen stärker gekrümmten Bereich auf. Der Ansatz nach Gleichung (5.2) ist mit Bestimmtheitsmaßen zwischen $r^2 = 0,92$ und $r^2 = 0,99$ immer noch als eng zu bezeichnen. Dennoch erwies sich hier folgender Ansatz als geeigneter:

$$\sigma \text{ [N/mm}^2\text{]} = a \cdot \varepsilon^b \quad (5.4)$$

In den Abbildung 5.12 und 5.13 sind beispielhaft für ein mit „S“ gefestigtes Mauerwerk die durch Versuch und rechnerischen Ansatz ermittelten Spannungs-Dehnungs-Linien nach Gleichung (5.2) bzw. (5.4) gegenübergestellt. Da die E-Moduli der RILEM-Körper und deren Druckfestigkeiten aufgrund unterschiedlicher Mörteldruckfestigkeiten schwankten (E-Modul $V \approx 22\%$, Druckfestigkeit $V \approx 19\%$, Kapitel 4.5.1 und Anhang 4.4) kann kein zahlenmäßig pauschaler Ansatz aufgrund der durchgeführten Versuche angegeben werden. Im Mittel ergab sich folgende Gleichung für die mit „S“ gefestigten RILEM-Körper aus fabrikneuen Ziegeln, siehe Anhang 5.1-3:

$$\sigma \text{ [N/mm}^2\text{]} = 4,67 \cdot \varepsilon^{0,51} \quad (5.5)$$

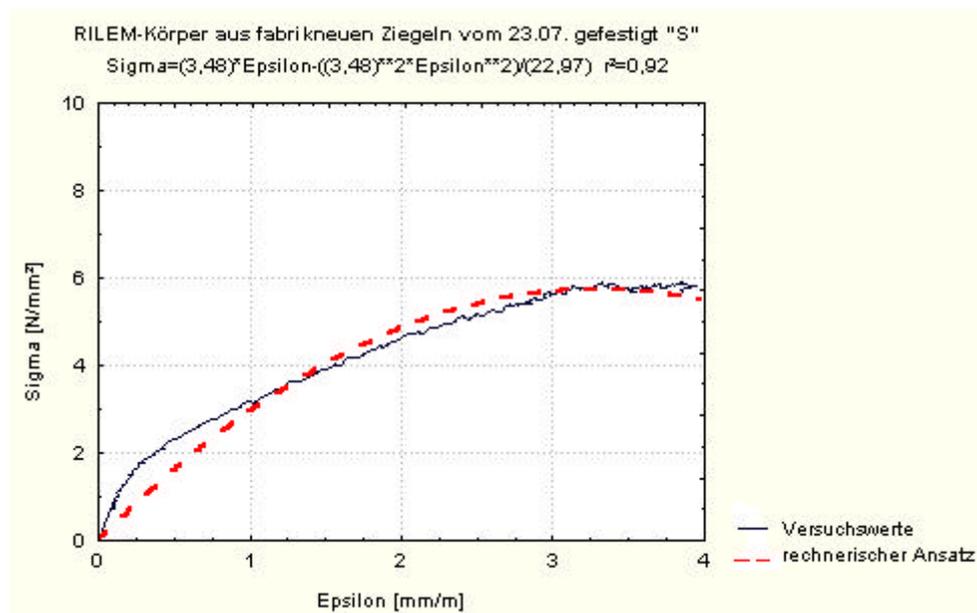


Abbildung 5.12: Versuchstechnisch und rechnerisch nach Gleichung (5.2) ermittelte Spannungs-Dehnungs-Linie

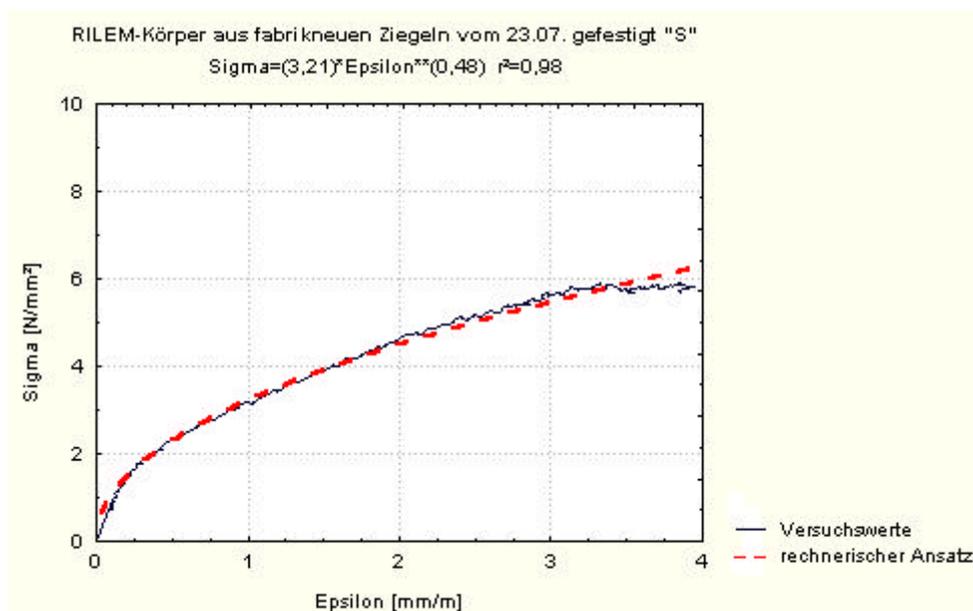


Abbildung 5.13: Versuchstechnisch und rechnerisch nach Gleichung (5.4) ermittelte Spannungs-Dehnungs-Linie

Der Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Linie der mit "T" gefestigten RILEM-Körper wies nicht den für mit "S" gefestigten Körpern typischen gekrümmten Anfangsverlauf auf. Der Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Linie kann deshalb für diese Fälle rechnerisch mit Gleichung (5.2) (Bestimmtheitsmaße zwischen $r^2 = 0,94$ und $r^2 = 0,99$) am besten beschrieben werden. Im Mittel lautet diese ähnlich wie Gleichung (5.3), siehe Anhang 5.1-2:

$$\sigma \text{ [N/mm}^2\text{]} = 6,51 \cdot \varepsilon - \frac{6,51^2}{28,93} \cdot \varepsilon^2 \quad (5.6)$$

Da die Mörtelfestigkeiten der mit "T" gefestigten RILEM-Körper zwischen 2,1 N/mm² und 0,94 N/mm² schwankten, ist der Variationskoeffizient für den Regressionskoeffizienten $a=6,51$ hoch ($V = 48\%$), siehe Anhang 5.1-2. Tendenziell steigt der Regressionskoeffizient a mit zunehmender Mörteldruckfestigkeit. Auch der Regressionskoeffizient b steigt mit zunehmender Mörteldruckfestigkeit, ist jedoch insgesamt geringer von der Mörteldruckfestigkeit beeinflusst ($V = 18\%$).

Die rechnerische Ausgleichskurve für ungefestigte und gefestigte RILEM-Körper aus historischen Ziegeln ist mit Gleichung (5.2) zu ermitteln. Da die Druckfestigkeiten der einzelnen historischen Ziegelsteine und somit auch die RILEM-Körper stark schwanken, unterliegen auch die Mittelwerte der Regressionskoeffizienten a und b erheblichen Schwankungen (ungefestigt: $V = 76\%$ für a bzw. $V = 41\%$ für b , gefestigt "S": $V = 12\%$ für a bzw. $V = 2\%$ für b , gefestigt "T": $V = 28\%$ für a bzw. $V = 13\%$ für b), siehe Anhang 5.1-4. Die einzelnen Ausgleichskurven der RILEM-Körper lassen sich aber mit einem hohen Bestimmtheitsmaß (zwischen $r^2 = 0,97$ und $r^2 = 0,99$, siehe Anhang 5.1-4) gemäß Gleichung (5.2) bestimmen. Der Regressionskoeffizient a folgt dabei aber nicht dem bei ungefestigten fabrikanneuen Ziegeln ermittelten Zusammenhang ($a = E$ -Modul in kN/mm²). Der Regressionskoeffizient b entspricht aber wie auch bei den fabrikanneuen Ziegeln ungefähr der 4-fachen RILEM-Druckfestigkeit in N/mm². Im Mittel ergeben sich folgende Ausgleichsfunktionen für RILEM-Körper aus historischen Ziegeln, siehe Anhang 5.1-4:

- ungefestigt: $\sigma \text{ [N/mm}^2\text{]} = 9,76 \cdot \varepsilon - \frac{9,76^2}{32,37} \cdot \varepsilon^2$ (5.7)

- mit "T" gefestigt: $\sigma \text{ [N/mm}^2\text{]} = 11,85 \cdot \varepsilon - \frac{11,85^2}{36} \cdot \varepsilon^2$ (5.8)

- mit "S" gefestigt: $\sigma \text{ [N/mm}^2\text{]} = 13,55 \cdot \varepsilon - \frac{13,55^2}{33,98} \cdot \varepsilon^2$ (5.9)

Die Spannungs-Dehnungs-Linien aller RILEM-Körper aus Sandsteinen wiesen in der Anfangsphase eine starke Krümmung auf. Bei der Ermittlung von Ausgleichskurven erwies sich Gleichung (5.4) als am besten geeignet, einen engen Zusammenhang (Bestimmtheitsmaße zwischen $r^2 = 0,98$ und $r^2 = 0,99$) zwischen Versuchswerten und rechnerischem Ansatz herzustellen. Im Mittel ergaben sich folgende Ausgleichsfunktionen:

Obernkirchener Sandstein, siehe Anhang 5.1-5:

- ungefestigt: $\sigma \text{ [N/mm}^2\text{]} = 6,81 \cdot \varepsilon^{0,77}$ (5.10)

- mit "T" gefestigt: $\sigma \text{ [N/mm}^2\text{]} = 7,70 \cdot \varepsilon^{0,68}$ (5.11)

- mit "S" gefestigt: $\sigma \text{ [N/mm}^2\text{]} = 9,28 \cdot \varepsilon^{0,58}$ (5.12)

Roter Wesersandstein, siehe Anhang 5.1-6:

- ungefestigt: $\sigma \text{ [N/mm}^2\text{]} = 6,27 \cdot \varepsilon^{0,69}$ (5.13)

- mit "T" gefestigt: $\sigma \text{ [N/mm}^2\text{]} = 7,76 \cdot \varepsilon^{0,59}$ (5.14)

- mit "S" gefestigt: $\sigma \text{ [N/mm}^2\text{]} = 6,17 \cdot \varepsilon^{0,63}$ (5.15)

Rüthener Grünsandstein, siehe Anhang 5.1-7:

- ungefestigt: $\sigma \text{ [N/mm}^2\text{]} = 5,78 \cdot \varepsilon^{0,70}$ (5.16)

- mit "T" gefestigt: $\sigma \text{ [N/mm}^2\text{]} = 4,98 \cdot \varepsilon^{0,88}$ (5.17)

- mit "S" gefestigt: $\sigma \text{ [N/mm}^2\text{]} = 5,74 \cdot \varepsilon^{0,60}$ (5.18)

Die Variationskoeffizienten für die Regressionskoeffizienten a und b waren für die ungefestigten und gefestigten RILEM-Körper aus Sandsteinen $V \leq 10\%$, mit Ausnahme des mit "T" gefestigten Rüthener Grünsandsteins (für a: $V = 31\%$, für b: $V = 22\%$), siehe Anhang 5.1-5 bis 5.1-7. Da je Festigungszustand (ungefestigt, mit "T" gefestigt, mit "S" gefestigt) nur je drei Mauerwerkskörper geprüft wurden, sind die vorgenannten Ergebnisse nur als Anhaltswerte zu betrachten.

Die für die mit "S" gefestigten RILEM-Körper aus fabrikneuen Ziegeln und aus Sandsteinen verwendeten Ansätze gemäß Gleichung (5.5) und (5.10) bis (5.18) erfassen aber weder die Bruchlast, noch den Spannungs-Dehnungs-Verlauf nach Erreichen der maximalen Kraft. Die Bruchspannung kann mit ausreichender Genauigkeit gemäß Gleichung (5.2) ermittelt werden, wobei zu berücksichtigen ist, daß der Spannungs-Dehnungs-Verlauf der Sandsteine *nach* Erreichen der Bruchlast in der Regel steil abfällt, siehe Ergebnisse in Anhang 4.5, und für diesen Bereich *kein* allgemeingültiger Rechenansatz angegeben werden kann. Die entsprechenden Koeffizienten *aller* RILEM-Körper gemäß den Gleichungen 5.2 und 5.4 sind Anhang 5.1 zu entnehmen.

5.8.5 Verformungsmodul der RILEM-Körper

Der Elastizitätsmodul E_{stat} wird als Sekantenmodul aus der Spannung σ bei einem Drittel der Druckfestigkeit $\beta_{D,mw}$ und der bei dieser Spannung aufgetretenen mittleren Deh-

nung \bar{e} (Mittelwert aller vier Meßstrecken) bei einmaliger Belastung berechnet, vergl. Gleichung (4.4) in Kapitel 4.5.1:

$$E = \frac{b_{D,mw}}{3 \cdot \bar{e}}$$

Im folgenden soll insbesondere auf die Unterschiede der E-Moduli in Abhängigkeit der Verfestigung eingegangen werden, sowie auf den Vergleich mit in der Literatur angegebenen E-Modul Werten. In Tabelle 5.3 sind die Mittelwerte, aus Anhang 4.4-1 bis 4.4-7, der E-Moduli angegeben, sowie Verhältniszerte gefestigt/ungefestigt. Alle RILEM-Körper sind mit Mörtelgruppe MG I gemauert. Die Steindruckfestigkeiten der Sandsteine sind an Würfeln 5x5x5 cm³ ermittelt [27], die der Ziegel gemäß DIN 105 [20] angesetzt worden.

Tabelle 5.3: Einfluß der Festigung auf die Verformungsmoduli E_{stat}

Steinart	$\beta_{D,st}$	Verformungsmodul E (Mittelwerte aus Anhang 4.4-1 bis 4.4-7)			Verhältnis der Verformungsmoduli	
		ungefestigt	mit "T" gefestigt	mit "S" gefestigt	gefestigt" T"/ ungefestigt	gefestigt" S"/ ungefestigt
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	-	-
Fabrikneue Ziegel	10	5.700	6.400	8.500	1,12	1,49
Historische Ziegel	13	11.600	17.000	16.400	1,46	1,41
Obern- kirchener Sandstein	94	6.800	8.100	11.600	1,19	1,70
Roter Wesersand- stein	85	6.200	9.300	7.000	1,5	1,13
Rüthener Grünsand- stein	37	6.800	5.800	8.500	0,85	1,25

Bei den Verhältniszerten muß berücksichtigt werden, daß die Mörtelfestigkeiten bei den einzelnen Versuchsvarianten nicht immer übereinstimmten. Bis auf den mit "T" gefestigten RILEM-Körper aus Rüthener Grünsandstein ist erwartungsgemäß der Verformungsmodul der gefestigten RILEM-Körper immer größer als bei ungefestigten Mauerwerkskörpern. Das der E-Modul des mit "T" gefestigten RILEM-Körpers aus Rüthener Grünsandstein niedriger ist als der des ungefestigten RILEM-Körpers überrascht insofern, als daß die Mörtelfestigkeit des mit "T" gefestigten Mauerwerkskörpers um 0,5 N/mm² höher lag als die Mörtelfestigkeit des ungefestigten Mauerwerkskörpers. Die Ursache könnte in der bei Sandsteinen höheren Materialstreuung liegen, oder an einem Materialfehler, z.B. unsauber hergestelltes Gemisch des mit Wasser verdünnten Steinfestigers (zuviel Wasser – zu wenig Festiger).

Bei den Ziegeln ist der Einfluß der Mörtelfestigkeit auf den E-Modul zu erkennen, siehe Anhang 4.4-1 bis 4.4-4. Je größer die Mörtelfestigkeit desto größer der Verformungsmodul. Eine Ausgleichsrechnung bezüglich Druckfestigkeit des Mörtels und E-Modul ergab für :

ungefestigtes Mauerwerk aus fabrikneuen Ziegeln:

$$E_{mw} [\text{N/mm}^2] = 2873 \cdot \beta_{D,m\ddot{o}} [\text{N/mm}^2] + 1648 \quad r^2 = 0,59 \quad (5.19)$$

ungefestigtes Mauerwerk aus historischen Ziegeln:

$$E_{mw} [\text{N/mm}^2] = 5127 \cdot \beta_{D,m\ddot{o}} [\text{N/mm}^2] + 2922 \quad r^2 = 0,61 \quad (5.20)$$

Für alle gefestigten Mauerwerkskörper und Mauerwerkskörper aus Sandsteinen konnte kein befriedigender Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit des Mörtels und E-Modul des Mauerwerks gefunden werden, das Bestimmtheitsmaß lag bei $r^2 < 0,2$.

Der Zusammenhang Mauerwerksfestigkeit – E-Modul lässt sich über eine Ausgleichsrechnung wie folgt bestimmen:

für ungefestigtes Mauerwerk aus fabrikneuen Ziegeln:

$$E_{mw} [\text{N/mm}^2] = 514 \cdot \beta_{D,mw}^{1,26} \quad r^2 = 0,69 \quad (5.21)$$

$$E_{mw} [\text{N/mm}^2] = 863 \cdot \beta_{D,mw} \quad r^2 = 0,66 \quad (5.22)$$

$$E_{mw} [\text{N/mm}^2] = 3,95 \cdot \beta_{D,st}^{3,39} \cdot \beta_{D,m\ddot{o}}^{0,68} \quad r^2 = 0,59 \quad (5.23)$$

und für ungefestigtes Mauerwerk aus historischen Ziegeln:

$$E_{mw} [\text{N/mm}^2] = 382 \cdot \beta_{D,mw}^{1,57} \quad r^2 = 0,92 \quad (5.24)$$

$$E_{mw} [\text{N/mm}^2] = 1475 \cdot \beta_{D,mw} \quad r^2 = 0,81 \quad (5.25)$$

Für alle gefestigten Mauerwerkskörper und Mauerwerkskörper aus Sandsteinen konnte kein befriedigender Zusammenhang, Bestimmtheitsmaß $r^2 < 0,2$, zwischen Mauerwerksfestigkeit und E-Modul des Mauerwerks gefunden werden.

Schubert faßt in [110] Untersuchungsergebnisse bezüglich der Abhängigkeit des E-Moduls von der Druckfestigkeit des Mauerwerks, der Mauersteine und des Mörtels zusammen. Für Mauerziegel ermittelte *Schubert* [110] folgende rechnerischen Ansätze:

$$E_{mw} [\text{N/mm}^2] = 471 \cdot \beta_{D,st}^{0,76} \cdot \beta_{D,m\ddot{o}}^{0,13} \quad r^2 = 0,80 \quad (5.26)$$

$$E_{mw} [\text{N/mm}^2] = 543 \cdot \beta_{D,mw}^{1,12} \quad r^2 = 0,90 \quad (5.27)$$

Der eigene rechnerische Ansatz nach Gleichung (5.21) stimmt gut mit dem Ansatz nach *Schubert* Gleichung (5.27) überein. Die Ansätze Gleichung (5.23) und (5.26) führen dagegen zu unterschiedlichen Ergebnissen. Der Ansatz nach *Schubert* Gleichung (5.26) führt zu ca. 50% verminderten rechnerischen E-Moduln als nach eigenem Ansatz, Gleichung (5.23).

Gemäß DIN 1053 Teil 1 [21] wird der E-Modul für Mauerwerk aus Mauerziegeln wie folgt bestimmt: $E = 3500 \cdot \sigma_0$, dies bedeutet für die hier verwendeten Mauerziegel Steinfestigkeitsklasse 8 und Mörtelgruppe MG I: $E = 3500 \cdot 0,6 = 2100 \text{ N/mm}^2$

Der im Versuch ermittelte mittlere E-Modul der ungefestigten RILEM-Körper aus fabrikneuen Ziegeln beträgt 5700 N/mm^2 , ist somit um das 2,7-fache größer als die Werte nach DIN 1053 Teil 1 [21].

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, daß die E-Moduli der gefestigten RILEM-Körper immer über den E-Moduli Werten der ungefestigten RILEM-Körper liegen. Die Steigerung des E-Moduls nach Festigung ist je nach verwendeter Steinart unterschiedlich, vergl. Tabelle 5.3, so daß kein pauschaler Wert für die Erhöhung des E-Moduls nach

einer Festigung angegeben werden kann. Unterschiedliche Mörtelfestigkeiten im Mauerwerkskörper führen ebenfalls zu erheblichen Schwankungen beim E-Modul.

5.9 Korrelationen

5.9.1 Dynamischer E-Modul ermittelt aus der Ultraschallgeschwindigkeit und der Resonanzfrequenz

Bei den Mörtel- und Sandsteinprismen wurde der dynamische E-Modul sowohl aus der Ultraschalllaufzeit, als auch aus der Resonanzfrequenz bestimmt. Wie bereits in Kapitel 4.2.3 erläutert, wird aufgrund der Probekörpergeometrie bei Ziegeln nur der dynamische E-Modul aus der Ultraschallmessung bestimmt. Die Abbildung 5.14 und Abbildung 5.15 zeigen den engen Zusammenhang zwischen dynamischem E-Modul aus der Ultraschall- bzw. Resonanzfrequenzmessung. Tendenziell liegt der dynamische E-Modul aus der Resonanzfrequenzmessung immer unter dem Wert des dynamischen E-Moduls aus der Ultraschallmessung, da bei der Ultraschallmessung die Longitudinalwelle, bei der Resonanzfrequenzmessung hingegen die Biege- und Torsionswelle gemessen werden. Eine quantitative Übereinstimmung der Einzelwerte kann daher nicht erwartet werden. Da die Ultraschallmethode am bestehenden Bauwerk relativ einfach anwendbar ist, wird bei der Auswertung verschiedenster Korrelationen in den folgenden Kapiteln nur die Ultraschallmethode berücksichtigt.

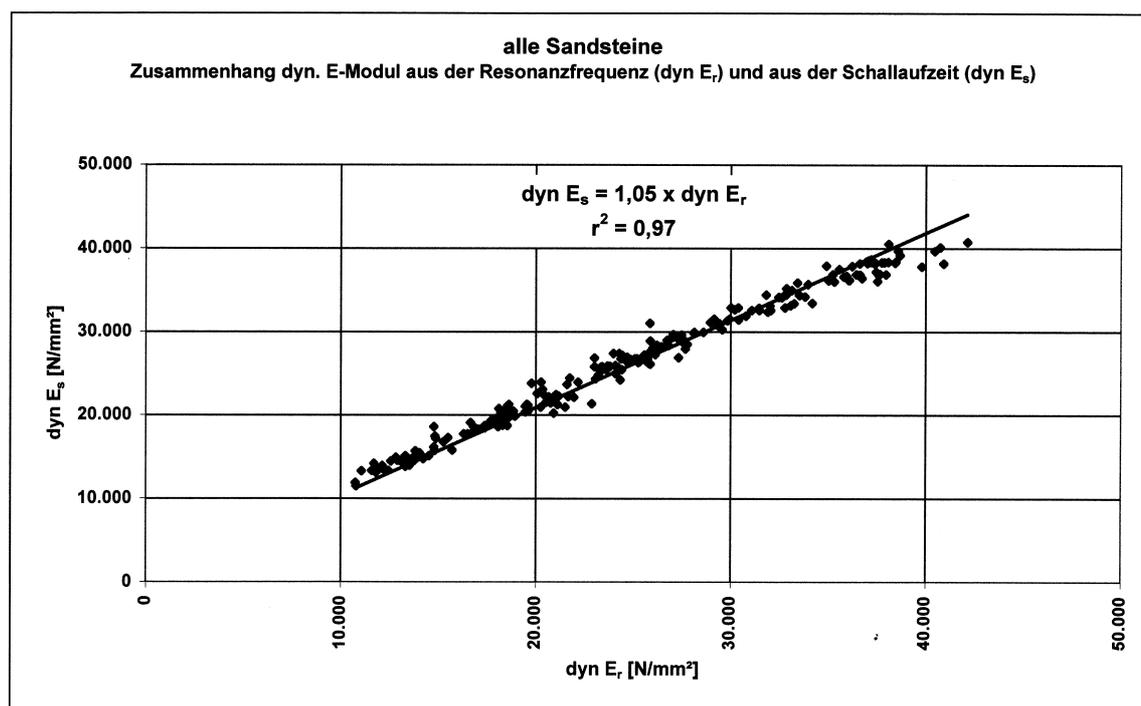


Abbildung 5.14: Zusammenhang zwischen dem dynamischen E-Modul aufgrund der Ultraschalllaufzeit- (dyn E_s) bzw. Resonanzfrequenzmessung (dyn E_r) bei Sandsteinen

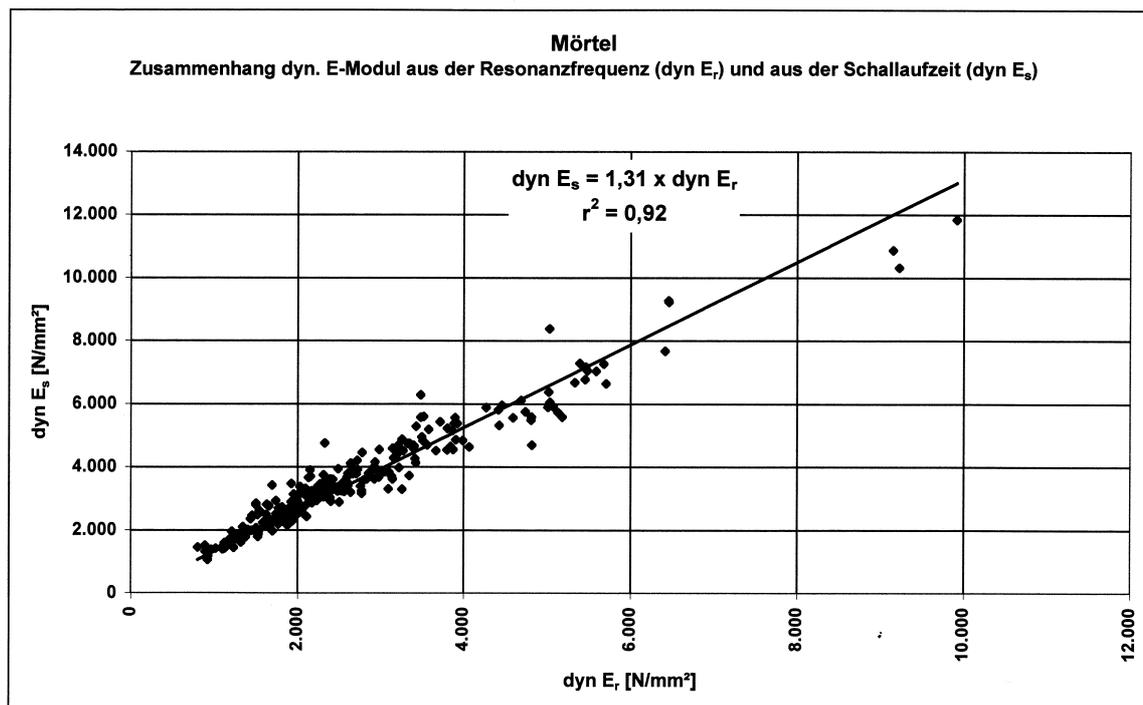


Abbildung 5.15: Zusammenhang zwischen dem dynamischen E-Modul aufgrund der Ultraschalllaufzeit- (dyn E_s) bzw. Resonanzfrequenzmessung (dyn E_r) bei Mörtelprismen

5.9.2 Korrelationen zwischen Ultraschallgeschwindigkeit und Druckfestigkeit

Die zerstörenden Eingriffe zur notwendigen Vor- und Nachuntersuchung im Rahmen von Instandsetzungsmaßnahmen historischer Bausubstanz sind so gering wie möglich zu halten. Im folgenden werden für alle untersuchten Materialien mögliche Korrelationen zwischen der Ultraschallgeschwindigkeit v und der Druckfestigkeit β_D angegeben, mit dem Ziel auch an bestehenden Bauwerken großflächig und zerstörungsfrei eine Aussage über die vorhandenen Druckfestigkeiten treffen zu können. Um die Probenentnahme am Bauwerk vor und nach einer Festigung möglichst gering zu halten, wäre es vorteilhaft, wenn man von der Ausgleichsgeraden ungefestigter Probekörper auf Eigenschaften gefestigter Probekörper schließen könnte, um so auf eine nochmalige Probenentnahme am gefestigten Bauwerk nach der Instandsetzung verzichten zu können. Im folgenden sind Korrelationen Schallgeschwindigkeit – Druckfestigkeit bei unterschiedlichen Festigungen (ungefestigt, mit "S" gefestigt, mit "T" gefestigt) ermittelt worden.

a) Fabrikneue Ziegel

Zwischen der Druckfestigkeit und der Ultraschallgeschwindigkeit bestehen folgende Korrelationen:

$$\text{ungefestigt:} \quad \beta_{D,st} [\text{N/mm}^2] = 5,03 v [\text{km/s}] - 1,02 \quad r^2 = 0,92 \quad (5.28)$$

$$\text{mit "S" gefestigt:} \quad \beta_{D,st} [\text{N/mm}^2] = 4,55 v [\text{km/s}] - 1,71 \quad r^2 = 0,69 \quad (5.29)$$

$$\text{mit "T" gefestigt:} \quad \beta_{D,st} [\text{N/mm}^2] = 5,08 v [\text{km/s}] - 2,48 \quad r^2 = 0,63 \quad (5.30)$$

$$\text{ungefestigt und gefestigt:} \quad \beta_{D,st} [\text{N/mm}^2] = 2,98 v [\text{km/s}] + 3,34 \quad r^2 = 0,86 \quad (5.31)$$

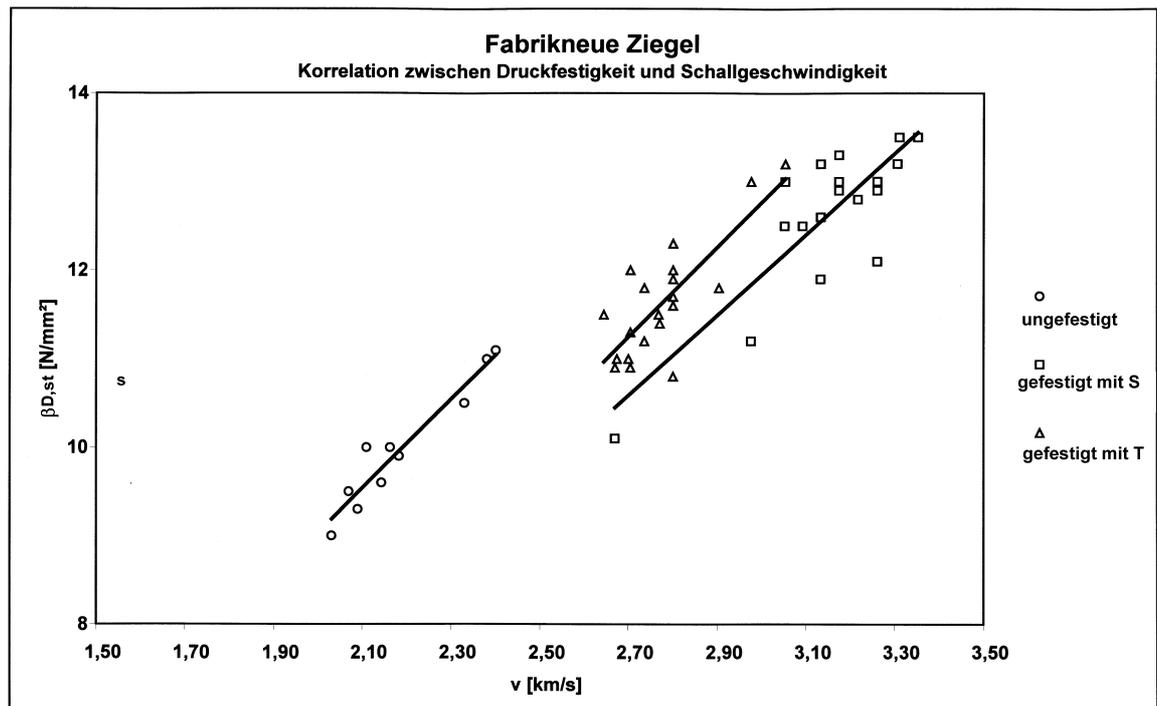


Abbildung 5.16: Korrelation zwischen Druckfestigkeit und Schallgeschwindigkeit bei fabrikneuen Ziegeln

Die Korrelation aller ermittelten Werte (ungefestigt und gefestigt, nach Gl. (5.31)) der Druckfestigkeit und der Schallgeschwindigkeit kann jedoch nur als Anhalt für eine mögliche Druckfestigkeitssteigerung nach einer Festigung dienen.

b) Historische Ziegel

Zwischen der Druckfestigkeit und der Ultraschallgeschwindigkeit bestehen folgende Korrelationen:

$$\text{ungefestigt:} \quad \beta_{D,st} [\text{N/mm}^2] = 13,45 v [\text{km/s}] - 8,64 \quad r^2 = 0,98 \quad (5.32)$$

$$\text{mit "S" gefestigt:} \quad \beta_{D,st} [\text{N/mm}^2] = 10,27 v [\text{km/s}] - 5,27 \quad r^2 = 0,70 \quad (5.33)$$

$$\text{mit "T" gefestigt:} \quad \beta_{D,st} [\text{N/mm}^2] = 6,25 v [\text{km/s}] + 1,71 \quad r^2 = 0,58 \quad (5.34)$$

$$\text{ungefestigt und gefestigt:} \quad \beta_{D,st} [\text{N/mm}^2] = 9,85 v [\text{km/s}] - 4,25 \quad r^2 = 0,84 \quad (5.35)$$

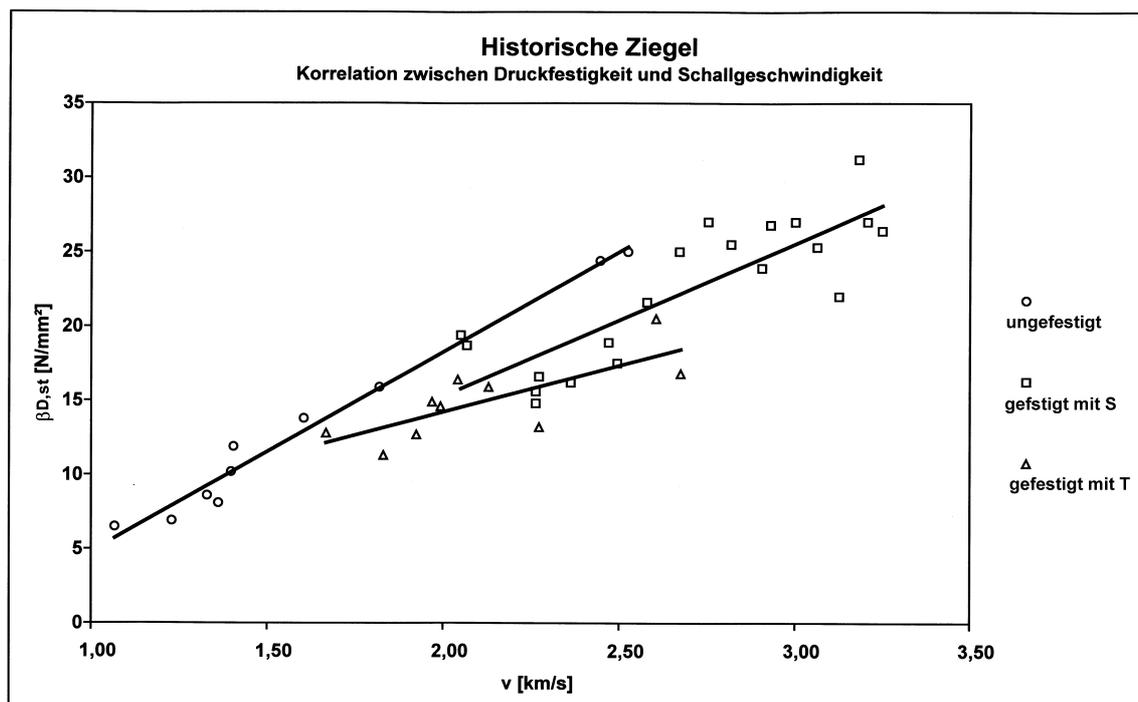


Abbildung 5.17: Korrelation zwischen Druckfestigkeit und Schallgeschwindigkeit bei historischen Ziegeln

Bei den ungefestigten Ziegeln besteht ein relativ enger Zusammenhang zwischen der Schallgeschwindigkeit und der Druckfestigkeit, siehe Gleichungen (5.28) und (5.32). Die Gleichungen für historische Ziegel können jedoch ebenfalls nur zur Abschätzung der Tragfähigkeitserhöhung nach einer Festigung herangezogen werden.

c) Mörtel

Zwischen der Druckfestigkeit und der Ultraschallgeschwindigkeit bestehen folgende Korrelationen:

ungefestigt: $\beta_{D,m\ddot{o}}$ [N/mm²] = 1,57 v [km/s] – 0,76 $r^2 = 0,36$ (5.36)

mit "S" gefestigt: $\beta_{D,m\ddot{o}}$ [N/mm²] = 5,20 v [km/s] – 1,46 $r^2 = 0,51$ (5.37)

mit "T" gefestigt: $\beta_{D,m\ddot{o}}$ [N/mm²] = 3,53 v [km/s] – 3,44 $r^2 = 0,63$ (5.38)

Bei den Mörteln wird bei Betrachtung des Zusammenhangs zwischen Schallgeschwindigkeit und Druckfestigkeit deutlich, daß die Ausgleichsgerade der mit "S" gefestigten Mörtel deutlich über der Ausgleichsgeraden für ungefestigte Mörtel liegt und eine andere Steigung aufweist, siehe Abbildung 5.18. Dies deutet darauf hin, daß die Steigerung der Schallgeschwindigkeit auch durch andere Faktoren (z.B. Rohdichte) beeinflusst wird. Eine Ausgleichsgerade für ungefestigte und gefestigte Mörtel kann hier ebenfalls nicht angegeben werden. Aus der Steigerung der Schallgeschwindigkeit v nach Festigung kann hier nicht auf die Erhöhung der Druckfestigkeit des gefestigten Mörtels geschlossen werden. Hierzu bedarf es weiterer Probenentnahmen des gefestigten Mörtels, zwecks Aufstellung einer Ausgleichsgeraden.

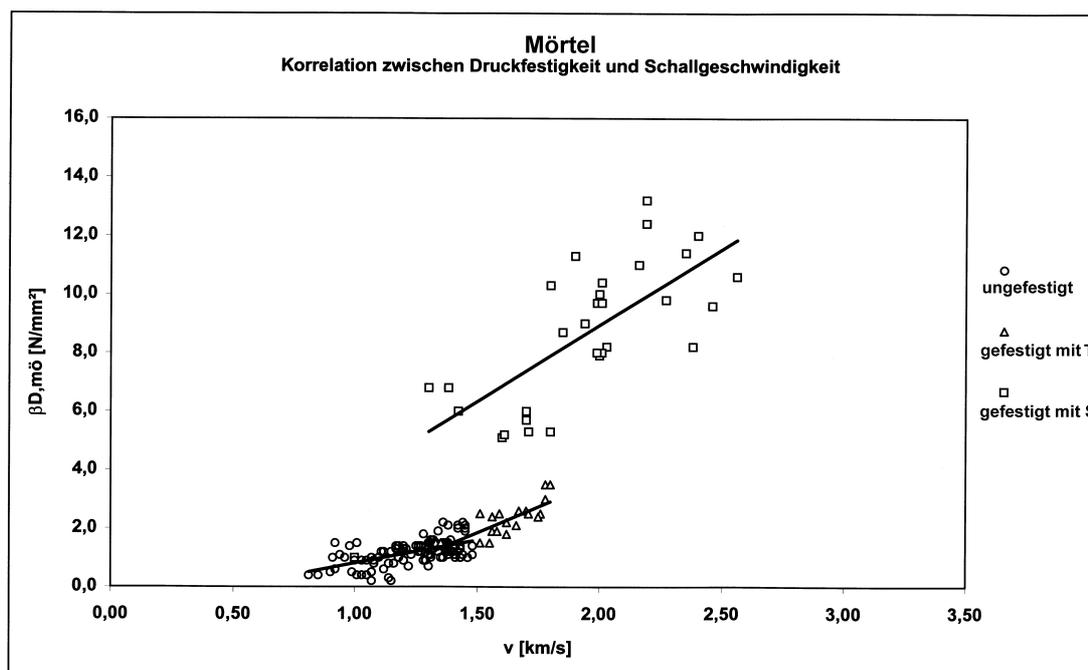


Abbildung 5.18: Korrelation zwischen Druckfestigkeit und Schallgeschwindigkeit bei Mörteln

d) Obernkirchener Sandstein:

Die Korrelation Ultraschallgeschwindigkeit – Druckfestigkeit konnte bei den drei Sandsteinen nicht ermittelt werden.

Obwohl die Ultraschallgeschwindigkeit nach der Festigung ansteigt, z.B. von $v = 3,0$ km/s bei ungefestigten Prismen auf bis zu $v = 4,2$ km/s bei mit "S" gefestigten Prismen, steigt die Druckfestigkeit des Obernkirchener Sandsteins nur von $\beta_{D,st} = 92$ N/mm² (ungefestigt) auf höchstens $\beta_{D,st} = 113$ N/mm² (gefestigt) an. Bei Streuungen der Druckfestigkeit von $V = \pm 10\%$ kann keine verlässliche Korrelation zwischen Ultraschallgeschwindigkeit und Druckfestigkeit erwartet werden.

e) Roter Wesersandstein

Die beim Obernkirchener Sandstein festgestellte Tendenz der schlechten Korrelation zwischen Ultraschallgeschwindigkeit und Druckfestigkeit gilt auch beim roten Wesersandstein. Die Ultraschallgeschwindigkeit der ungefestigten Prismen von $v = 2,6$ km/s (quer zur Schichtung) bzw. $v = 3,0$ km/s (längs zur Schichtung) erhöht sich nach Festigung mit "S" auf bis zu $v = 3,5$ km/s bzw. $v = 4,0$ km/s. Die Druckfestigkeit steigt dabei um maximal 12% (längs von $\beta_{D,st} = 86$ N/mm² auf $\beta_{D,st} = 96$ N/mm²) bei Streuungen von ungefähr $V = \pm 10\%$.

f) Rühthener Grünsandstein

Beim Rühthener Grünsandstein läßt sich trotz erheblicher Streuungen ein Zusammenhang zwischen Ultraschallgeschwindigkeit und Druckfestigkeit angeben.

ungefestigt und gefestigt: $\beta_{D,st} [\text{N/mm}^2] = 14,91 \cdot v [\text{km/s}] - 0,97 \quad r^2 = 0,55 \quad (5.39)$

Diese Gleichung kann wiederum nur als Anhalt dienen, da der Zusammenhang nicht sehr eng ist ($r^2=0,55$). Für die einzelnen Zustände, ob ungefestigt bzw. mit "S" oder "T" gefestigt, können keine Ausgleichsgeraden ermittelt werden. Die Bestimmtheitsmaße liegen hier unter $r^2 = 0,3$, die Wertepaare gruppieren sich „punktwolkenartig“, siehe Abbildung 5.19.

Beim Rühthener Grünsandstein steigt die Ultraschallgeschwindigkeit von $v \approx 2,6$ km/s auf $v \approx 3,6$ km/s nach Festigung an. Die Druckfestigkeit steigt von ungefestigt $\beta_{D,st} = 37$ N/mm² auf gefestigt bis zu $\beta_{D,st} = 58$ N/mm² an. Die Streuungen der Druckfestigkeiten liegen bei $V < 20\%$.

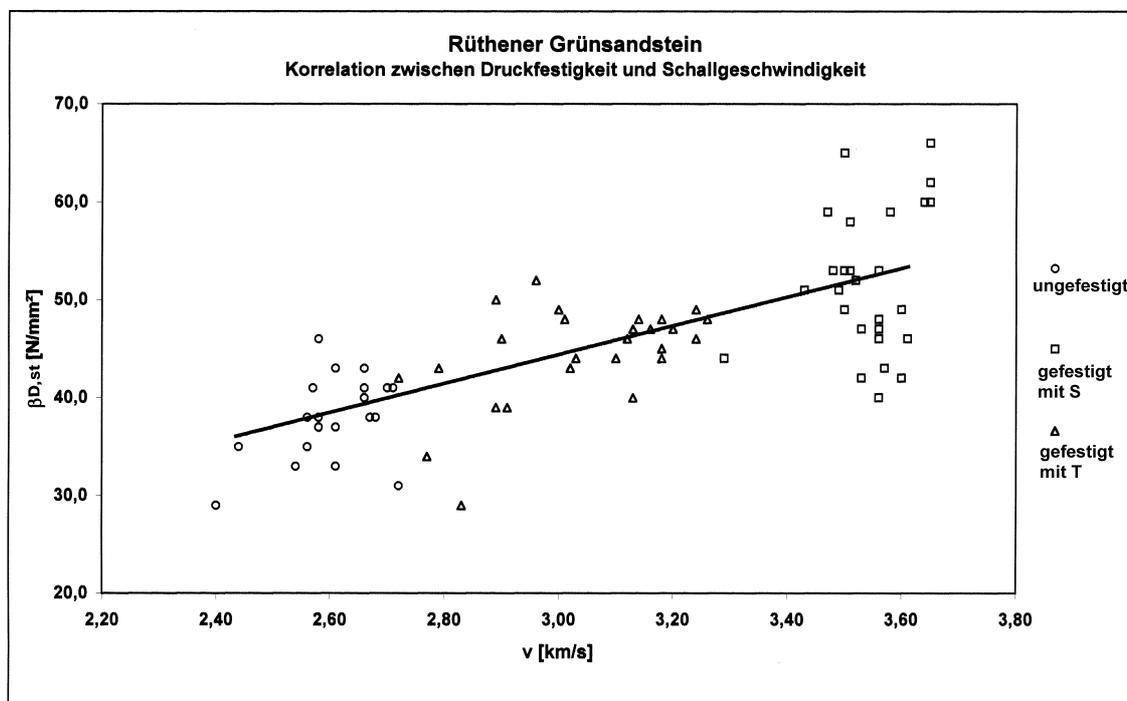


Abbildung 5.19: Korrelation zwischen Druckfestigkeit und Schallgeschwindigkeit im ungefestigten und gefestigten Zustand beim Rühthener Grünsandstein

Schlußfolgerung: Das angestrebte Ziel, von der Ultraschallgeschwindigkeit auf die Druckfestigkeit bzw. die Erhöhung der Druckfestigkeit nach Festigung zu schließen, konnte bei den hier untersuchten Steinen und Mörteln nur bedingt erreicht werden. Bei ungefestigten und gefestigten Ziegeln, vergl. Gleichungen (5.31) und (5.35) gibt die Schallgeschwindigkeit gute Anhaltswerte für die zu erwartende oder vorhandene Druckfestigkeit.

Die Ausgleichsgeraden mit "S" bzw. mit "T" gefestigter gegenüber ungefestigter Mörtel unterscheiden sich so sehr, siehe Abbildung 5.18, daß von der Schallgeschwindigkeit auf die Druckfestigkeit nicht geschlossen werden sollte.

Für Sandsteine kann ebenfalls kein für alle Steine gültiger Zusammenhang angegeben werden. Korrelationen können allenfalls bei einer Sandsteinart erwartet werden. Der rote Wesersandstein weist beispielsweise bei einer Druckfestigkeit von im Mittel $\beta_{D,st} = 86$ N/mm² dieselbe Schallgeschwindigkeit $v = 2,6$ km/s auf wie der Rühthener Grünsandstein, der im Mittel eine Druckfestigkeit von $\beta_{D,st} = 37$ N/mm² aufweist. Grundsätzlich ist aber innerhalb einer Steinart mit steigender Schallgeschwindigkeit auch die Druckfestigkeit höher. Von der Schallgeschwindigkeit auf die Druckfestigkeit vor und nach Festigung schließen zu können, gelang mit einem Bestimmtheitsmaß von $r^2 = 0,55$ nur beim Rühthener Grünsandstein.

5.9.3 Korrelationen zwischen Schallgeschwindigkeit und Biegezugfestigkeit

Die Prüfung der Biegezugfestigkeit wurde an ungefestigten und gefestigten Mörtel- und Sandsteinprismen durchgeführt.

a) Mörtel

Zwischen der Biegezugfestigkeit und der Ultraschallgeschwindigkeit bestehen folgende Korrelationen:

$$\text{ungefestigt: } \beta_{bz,m\ddot{o}} \text{ [N/mm}^2\text{]} = 0,68 \cdot v \text{ [km/s]} - 0,43 \quad r^2 = 0,58 \quad (5.40)$$

$$\text{mit "S" gefestigt: } \beta_{bz,m\ddot{o}} \text{ [N/mm}^2\text{]} = 2,15 \cdot v \text{ [km/s]} - 2,00 \quad r^2 = 0,65 \quad (5.41)$$

$$\text{mit "T" gefestigt: } \beta_{bz,m\ddot{o}} \text{ [N/mm}^2\text{]} = 1,66 \cdot v \text{ [km/s]} - 1,62 \quad r^2 = 0,35 \quad (5.42)$$

Bei den mit „T“ gefestigten Mörteln war die Korrelation wegen des Bestimmtheitsmaßes von $r^2=0,35$ unbefriedigend. Wie bereits bei der Korrelation Druckfestigkeit – Schallgeschwindigkeit festgestellt, kann auch in diesen Fällen keine gemeinsame Ausgleichsgerade für alle ungefestigten und gefestigten Mörtel angegeben werden, siehe Abbildung 5.20.

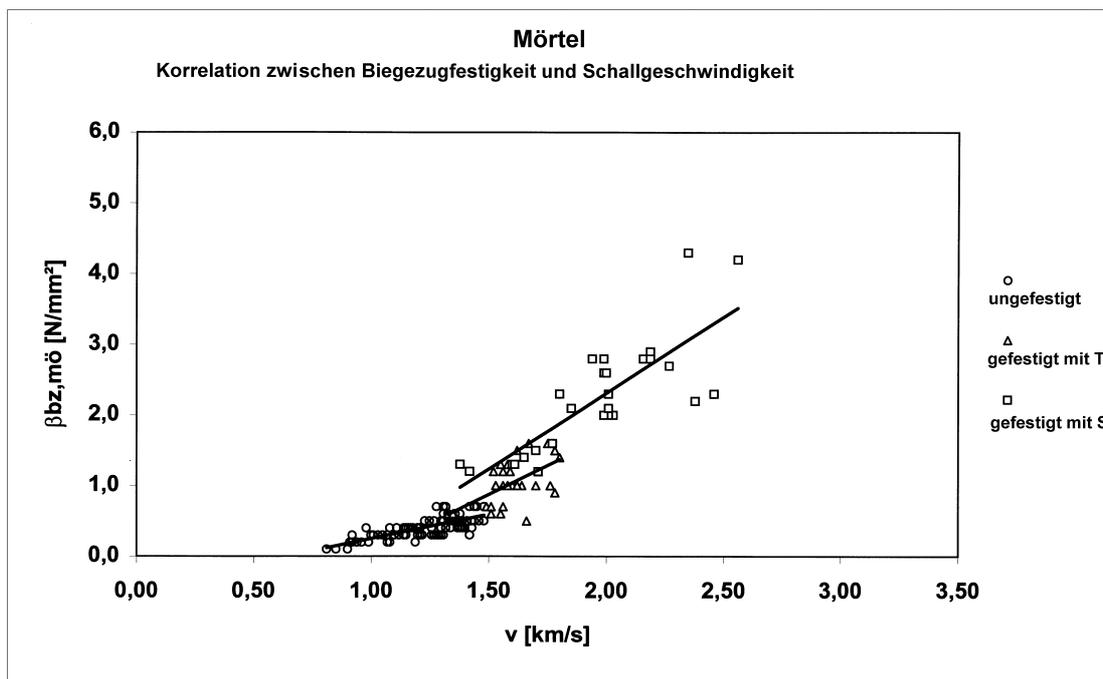


Abbildung 5.20: Korrelation zwischen Biegezugfestigkeit und Schallgeschwindigkeit bei Mörteln

b) Obernkirchener Sandstein

Zwischen der Biegezugfestigkeit und der Ultraschallgeschwindigkeit bestehen folgende Korrelationen:

ungefestigt und mit "S" gefestigt: keine Korrelation möglich

mit "T" gefestigt: $\beta_{bz,m\ddot{o}} [N/mm^2] = 8,93 \cdot v [km/s] - 23,64$ $r^2 = 0,55$ (5.43)

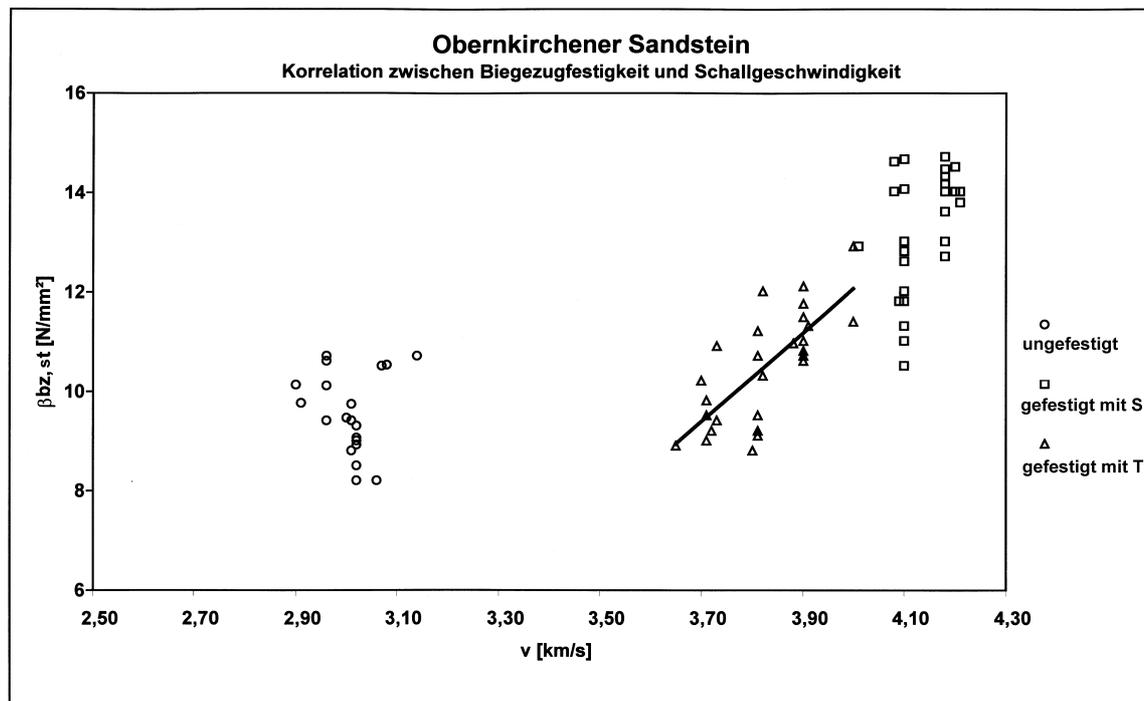


Abbildung 5.21: Korrelation zwischen Biegezugfestigkeit und Schallgeschwindigkeit beim Obernkirchener Sandstein

Die Beziehung Schallgeschwindigkeit – Biegezugfestigkeit kann nicht als eng bezeichnet werden. Die ermittelten "Punktwolken" können allenfalls als Anhalt für die Korrelation Schallgeschwindigkeit – Biegezugfestigkeit angesehen werden.

c) Roter Wesersandstein

Zwischen der Biegezugfestigkeit und der Ultraschallgeschwindigkeit bestehen folgende Korrelationen:

$$\text{ungefestigt: } \beta_{\text{bz,st}} [\text{N/mm}^2] = 7,17 \cdot v [\text{km/s}] - 10,95 \quad r^2 = 0,88 \quad (5.44)$$

$$\text{mit "S" gefestigt: } \beta_{\text{bz,st}} [\text{N/mm}^2] = 8,29 \cdot v [\text{km/s}] - 18,99 \quad r^2 = 0,89 \quad (5.45)$$

$$\text{mit "T" gefestigt: } \beta_{\text{bz,st}} [\text{N/mm}^2] = 8,25 \cdot v [\text{km/s}] - 16,88 \quad r^2 = 0,69 \quad (5.46)$$

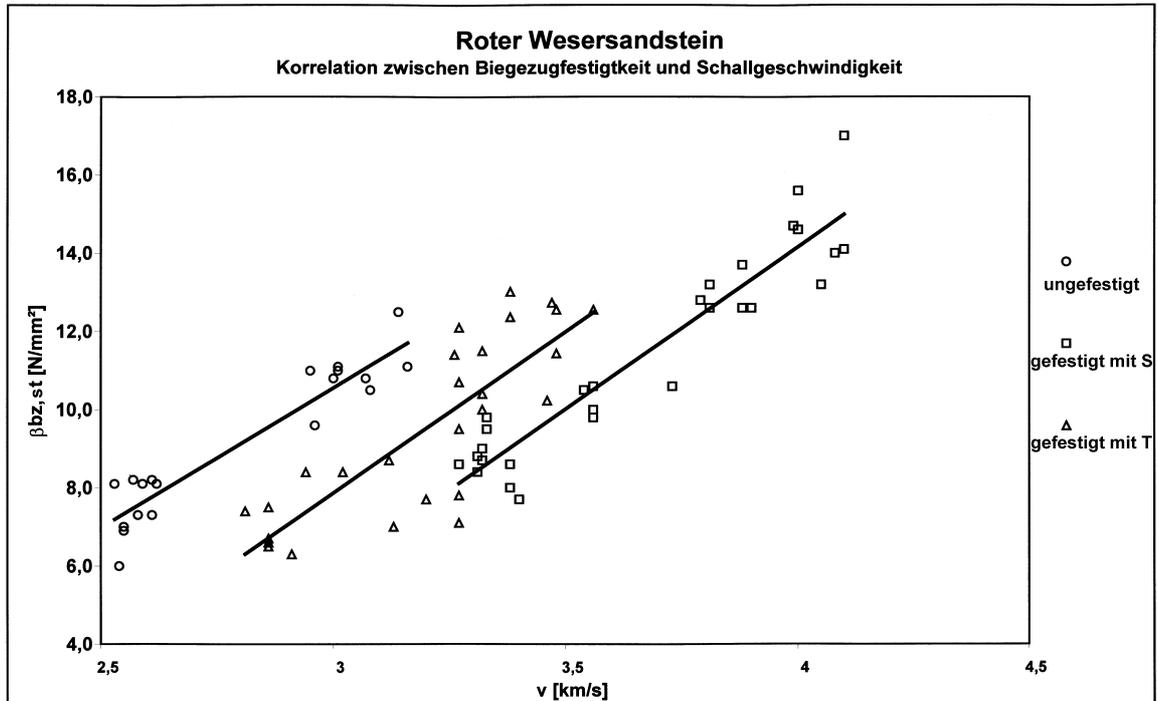


Abbildung 5.22: Korrelation zwischen Biegezugfestigkeit und Schallgeschwindigkeit beim roten Wesersandstein

Wie bereits früher ausgeführt, ist der rote Wesersandstein ein Stein mit ausgeprägter Anisotropie. Die Biegezugfestigkeit und die Schallgeschwindigkeit längs und quer zur Schichtung sind erkennbar unterschiedlich. Die Biegezugfestigkeit ist längs zur Schichtung um $\Delta\beta_{\text{bz,st}} \approx 3 \text{ N/mm}^2$ kleiner als quer zur Schichtung und die Schallgeschwindigkeit längs zur Schichtung um $\Delta v \approx 0,4 \text{ km/s}$ geringer als quer zur Schichtung. Durch diese materialspezifische Anisotropie ergeben sich Ausgleichsgeraden mit relativ hohen Bestimmtheitsmaßen. Betrachtet man nur die Korrelation einer Schichtungsrichtung, so würden sich ebenso wie beim Obernkirchener Sandstein nur schlechte Korrelationen Schallgeschwindigkeit – Biegezugfestigkeit einstellen. Eine gemeinsame Ausgleichsgerade für ungefestigte – gefestigte rote Wesersandsteine kann auch hier nicht angegeben werden, siehe Abbildung 5.22.

d) Rühener Grünsandstein

Zwischen der Biegezugfestigkeit und der Ultraschallgeschwindigkeit bestehen folgende Korrelationen:

$$\text{ungefestigt und gefestigt: } \beta_{\text{bz,st}} [\text{N/mm}^2] = 3,62 \cdot v [\text{km/s}] - 5,76 \quad r^2 = 0,80 \quad (5.47)$$

$$\text{ungefestigt: } \beta_{\text{bz,st}} [\text{N/mm}^2] = 3,19 \cdot v [\text{km/s}] - 4,16 \quad r^2 = 0,15 \quad (5.48)$$

$$\text{mit "S" gefestigt: } \beta_{\text{bz,st}} [\text{N/mm}^2] = 6,08 \cdot v [\text{km/s}] - 14,20 \quad r^2 = 0,66 \quad (5.49)$$

$$\text{mit "T" gefestigt: } \beta_{\text{bz,st}} [\text{N/mm}^2] = 3,72 \cdot v [\text{km/s}] - 6,71 \quad r^2 = 0,53 \quad (5.50)$$

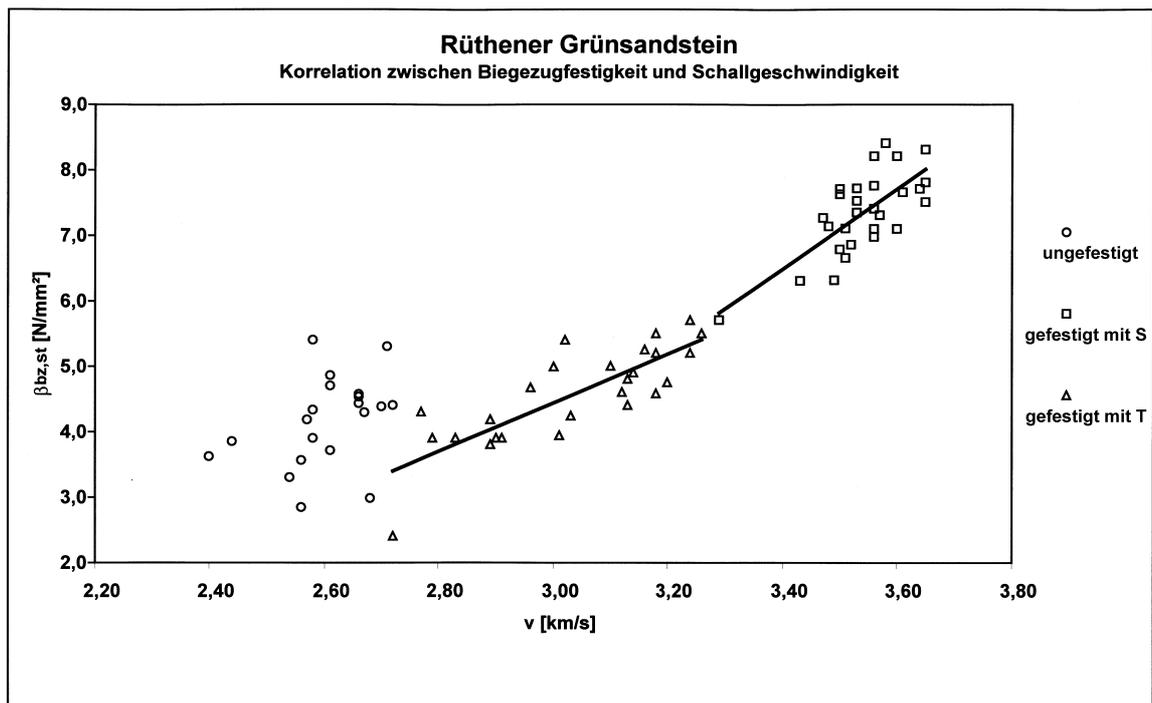


Abbildung 5.23: Korrelation zwischen Biegezugfestigkeit und Schallgeschwindigkeit beim Rühener Grünsandstein

Beim Rühener Grünsandstein kann für die einzelnen Zustände ungesteigert bzw. gefestigt der Zusammenhang Biegezugfestigkeit – Schallgeschwindigkeit nicht als eng bezeichnet werden, siehe Gleichungen (5.48) bis (5.50). Die Biegezugfestigkeiten schwanken beispielsweise bei ungesteigerten Rühener Grünsandsteinen bei annähernd gleicher Schallgeschwindigkeit von $v = 2,6$ km/s um bis zu $\Delta\beta_{\text{bz,st}} \approx \pm 1,2$ N/mm². Die Ausgleichsgerade nach Gleichung (5.47) kann demzufolge allenfalls eine grobe Abschätzung der Biegezugfestigkeit mittels Schallgeschwindigkeit sein.

Schlußfolgerung: Analog zu den Untersuchungsergebnissen der Druckfestigkeit in Kapitel 5.9.2 ist auch bei der Korrelation Schallgeschwindigkeit – Biegezugfestigkeit kein hinreichend guter Zusammenhang feststellbar. Die Ausgleichsgeraden der ungesteigerten und gefestigten Mörtel, siehe Abbildung 5.20, unterscheiden sich derart, daß kein allgemeingültiger Zusammenhang Schallgeschwindigkeit - Biegezugfestigkeit angegeben werden kann.

Für Sandsteine kann ebenfalls kein für alle Steine gültiger Zusammenhang Ultraschallgeschwindigkeit – Biegezugfestigkeit angegeben werden. Korrelationen können allenfalls innerhalb einer Sandsteinart ermittelt werden. Der rote Wesersandstein weist aufgrund seiner materialspezifischen Anisotropie den besten Zusammenhang, siehe Gleichungen (5.44) bis (5.46) Ultraschallgeschwindigkeit – Biegezugfestigkeit auf.

5.9.4 Korrelationen zwischen Druckfestigkeit und dynamischem E-Modul

Der für die folgenden Korrelationen verwendete dynamische E-Modul wurde aus der materialspezifischen Ultraschalllaufzeit ermittelt. Da nach Kapitel 5.9.1 zwischen dynamischem E-Modul, ermittelt aus Schalllaufzeit bzw. ermittelt aus Resonanzfrequenz, ein sehr enger Zusammenhang besteht, wurde auf Korrelationen zum dynamischen E-Modul ermittelt mittels Resonanzfrequenz verzichtet, da prinzipiell keine unterschiedlichen Ergebnisse zu erwarten waren.

a) Fabrikneue Ziegel

Bei fabrikneuen Ziegeln haben die Untersuchungen folgende Regressionen ergeben:

ungefestigt und gefestigt:

$$\beta_{D,st} \text{ [N/mm}^2\text{]} = 0,0003 E_{st,dyn} \text{ [N/mm}^2\text{]} + 7,67 \quad r^2 = 0,85 \quad (5.51)$$

$$\text{ungefestigt: } \beta_{D,st} \text{ [N/mm}^2\text{]} = 0,0007 E_{st,dyn} \text{ [N/mm}^2\text{]} + 4,69 \quad r^2 = 0,91 \quad (5.52)$$

$$\text{mit "S" gefestigt: } \beta_{D,st} \text{ [N/mm}^2\text{]} = 0,0004 E_{st,dyn} \text{ [N/mm}^2\text{]} + 5,51 \quad r^2 = 0,69 \quad (5.53)$$

$$\text{mit "T" gefestigt: } \beta_{D,st} \text{ [N/mm}^2\text{]} = 0,0005 E_{st,dyn} \text{ [N/mm}^2\text{]} + 5,13 \quad r^2 = 0,63 \quad (5.54)$$

Die Korrelation aller ermittelten Werte, ungefestigte und gefestigte Ziegel, der Druckfestigkeit und des dynamischen E-Moduls kann bei den sich ergebenden Bestimmtheitsmaßen als "gut" bezeichnet werden.

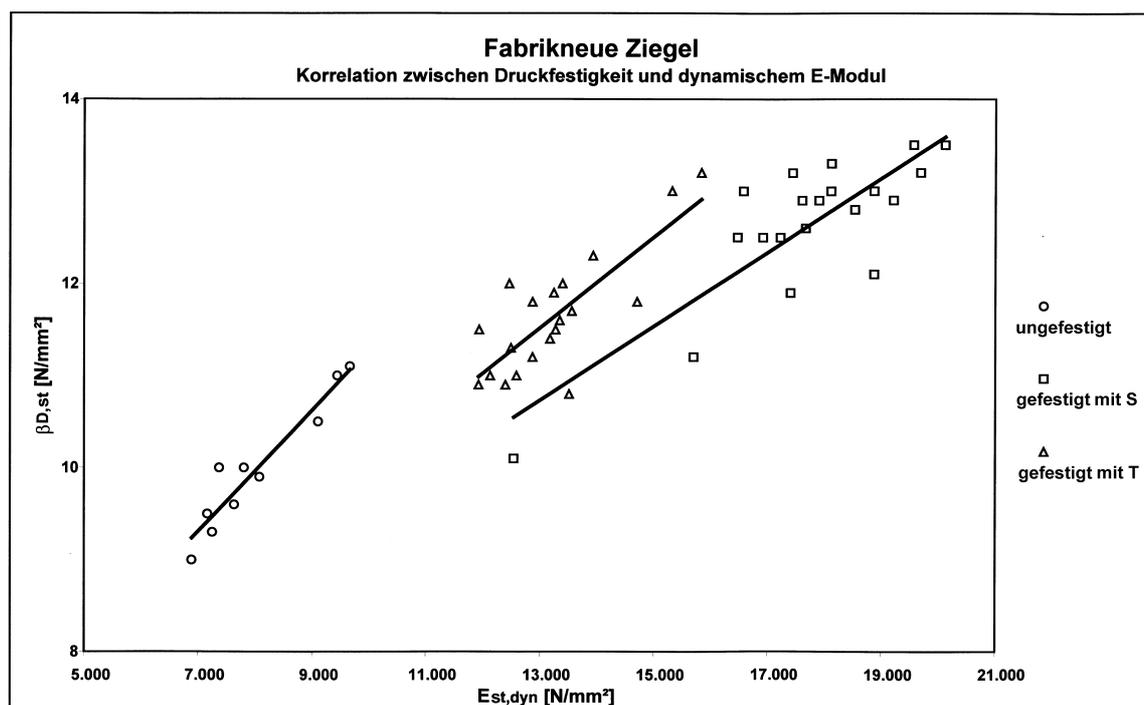


Abbildung 5.24: Korrelation zwischen Druckfestigkeit und dynamischem E-Modul bei fabrikneuen Ziegeln

b) Historische Ziegel

Bei historischen Ziegeln haben die Untersuchungen folgende Regressionen ergeben:

ungefestigt und gefestigt:

$$\beta_{D,st} \text{ [N/mm}^2\text{]} = 0,0012 E_{st,dyn} \text{ [N/mm}^2\text{]} + 6,47 \quad r^2 = 0,85 \quad (5.55)$$

$$\text{ungefestigt: } \beta_{D,st} \text{ [N/mm}^2\text{]} = 0,0021 E_{st,dyn} \text{ [N/mm}^2\text{]} + 3,20 \quad r^2 = 0,96 \quad (5.56)$$

$$\text{mit "S" gefestigt: } \beta_{D,st} \text{ [N/mm}^2\text{]} = 0,0011 E_{st,dyn} \text{ [N/mm}^2\text{]} + 7,81 \quad r^2 = 0,76 \quad (5.57)$$

mit "T" gefestigt: $\beta_{D,st} [\text{N/mm}^2] = 0,0008 E_{st,dyn} [\text{N/mm}^2] + 8,79 \quad r^2 = 0,59 \quad (5.58)$

Bei den historischen Ziegeln besteht im ungefestigten Zustand ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen dynamischem E-Modul und der Druckfestigkeit (Gl. (5.56)). Die ermittelte Gleichung (5.55) kann zur Abschätzung der Korrelation Druckfestigkeit aufgrund eines bekannten dynamischen E-Moduls bei ungefestigten und gefestigten Ziegeln herangezogen werden.

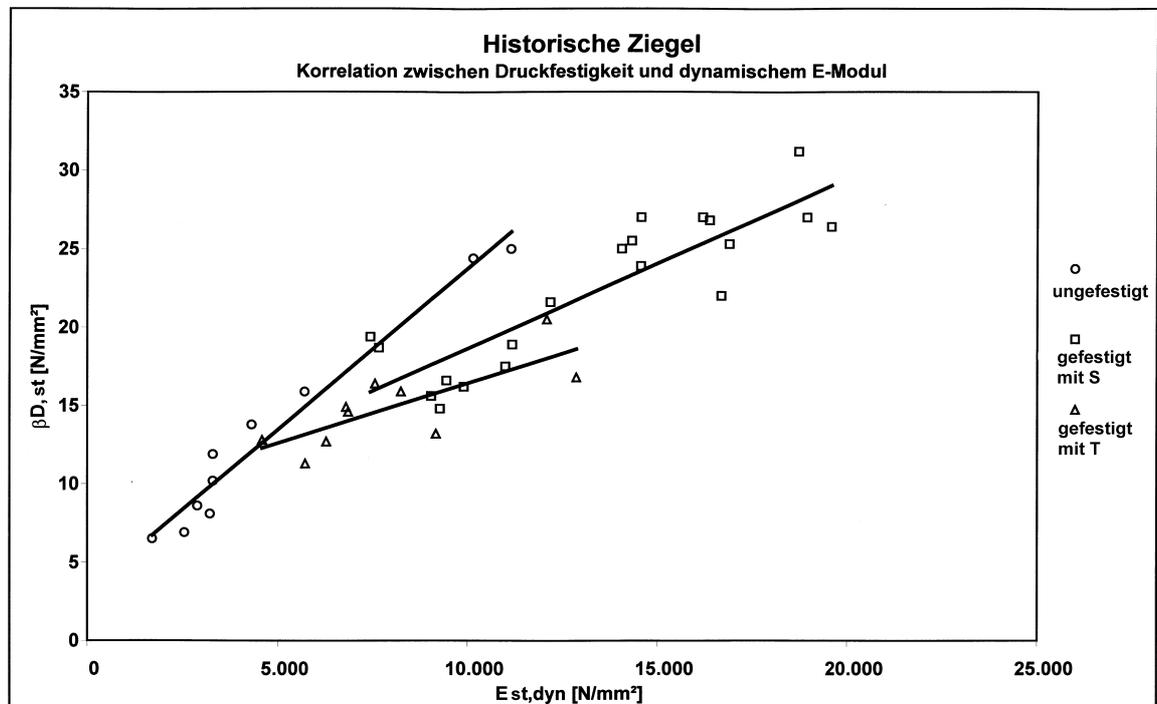


Abbildung 5.25: Korrelation zwischen Druckfestigkeit und dynamischem E-Modul bei historischen Ziegeln

c) Mörtel

Bei Mörteln haben die Untersuchungen folgende Regressionen ergeben:

ungefestigt: $\beta_{D,mö} [\text{N/mm}^2] = 0,0004 E_{mö,dyn} [\text{N/mm}^2] + 0,17 \quad r^2 = 0,38 \quad (5.59)$

mit "S" gefestigt: $\beta_{D,mö} [\text{N/mm}^2] = 0,0008 E_{mö,dyn} [\text{N/mm}^2] + 2,78 \quad r^2 = 0,67 \quad (5.60)$

mit "T" gefestigt: $\beta_{D,mö} [\text{N/mm}^2] = 0,0008 E_{mö,dyn} [\text{N/mm}^2] - 1,36 \quad r^2 = 0,70 \quad (5.61)$

Bei den Mörteln wird bei Betrachtung des Zusammenhangs dynamischer E-Modul – Druckfestigkeit deutlich, daß die Bezugsgerade der mit "S" gefestigten Mörtel über der Bezugsgeraden für ungefestigte Mörtel liegt. Eine gemeinsame Bezugsgerade für ungefestigte und gefestigte Mörtel kann wegen des geringen Bestimmtheitsmaßes wiederum nicht angegeben werden.

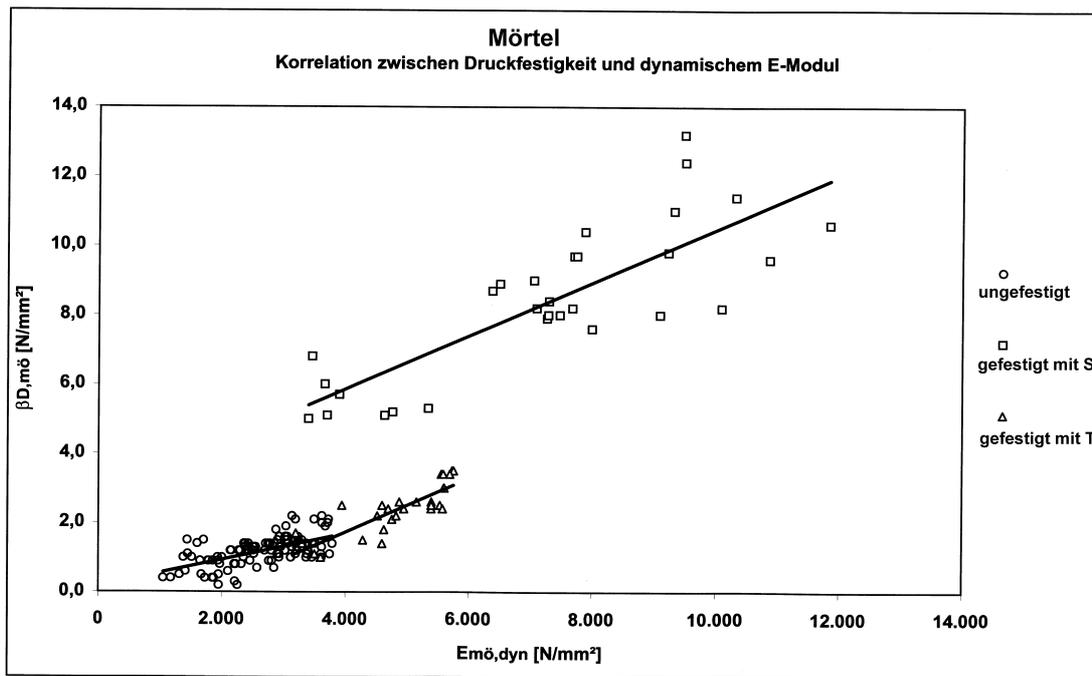


Abbildung 5.26: Korrelation zwischen Druckfestigkeit und dynamischem E-Modul bei Mörtelprismen

d) Rühthener Grünsandstein

ungefestigt und gefestigt:

$$\beta_{D,st} [N/mm^2] = 0,0011 E_{st,dyn} [N/mm^2] + 24,08 \quad r^2 = 0,56 \quad (5.62)$$

Diese Korrelation kann wiederum nur als Anhalt dienen, da der Zusammenhang nicht gut ist (Bestimmtheitsmaß $r^2=0,56$). Für die einzelnen Zustände ungefestigt bzw. mit "S" oder "T" gefestigt kann keine Bezugsgerade ermittelt werden, da sich die Versuchswerte wiederum jeweils „punktwolkenartig“ gruppieren, siehe Abbildung 5.27.

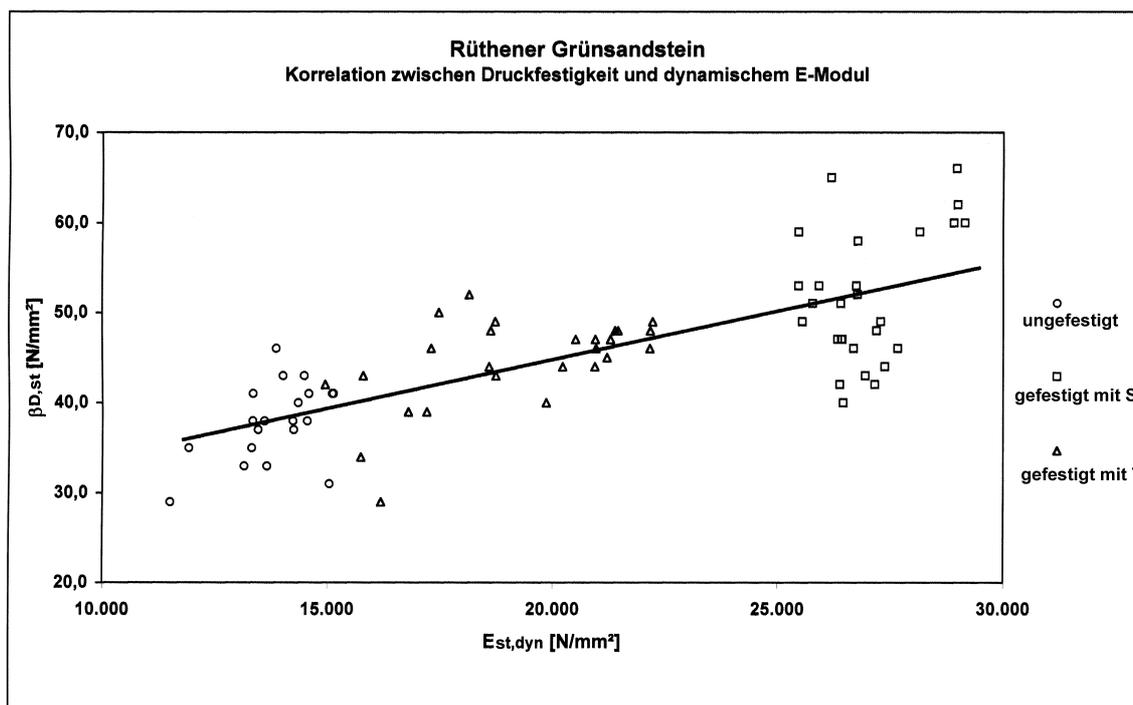


Abbildung 5.27: Korrelation zwischen Druckfestigkeit und dynamischem E-Modul beim Rühthener Grünsandstein

Die Korrelation zwischen dynamischem E-Modul – Druckfestigkeit führte bei den übrigen Sandsteinen zu keinen befriedigenden Ergebnissen. Die Bestimmtheitsmaße lagen unter 0,3. Da dies bereits für die Beziehung Schallgeschwindigkeit – Druckfestigkeit in Kapitel 5.9.2 festgestellt wurde, war auch kein befriedigende Zusammenhang zwischen dynamischem E-Modul und Druckfestigkeit bei den Sandsteinen zu erwarten.

Schlußfolgerung: Lediglich beim Rühthener Grünsandstein konnte eine Bezugsgerade zwischen dynamischem E-Modul und Druckfestigkeit ermittelt werden. In der Tendenz entsprechen die Ergebnisse der Korrelation dynamischer E-Modul – Druckfestigkeit der Korrelation Schallgeschwindigkeit – Druckfestigkeit, da der dynamische E-Modul selbst ja aus der Schallgeschwindigkeit ermittelt wurde, siehe Kapitel 5.9.2.

5.9.5 Korrelationen zwischen dynamischem und statischem Elastizitätsmodul

Der statische E-Modul wurde ausschließlich an Sandsteinprismen unter Druckbeanspruchung ermittelt, siehe hierzu Kapitel 4.3.4. Ziel der Gegenüberstellung von statischem und dynamischen E-Modul ist es, mit Hilfe einer Korrelation beider Werte vom einfacher zu bestimmenden dynamischen E-Modul auf den statischen E-Modul zu schließen. Da der dynamische E-Modul der Tangentenmodul im Ursprung der Spannungs-Dehnungs-Linie ist, der statische E-Modul, entsprechend dem Hook'schen Gesetz als Steigung der Spannungs-Dehnungs-Linie, bei einem Drittel der Festigkeit bestimmt wird, folgt, daß der dynamische E-Modul stets größer als der statische E-Modul sein muß. Als dynamischer E-Modul wurde der aus der Schalllaufzeit ermittelte E-Modul angesetzt.

a) Obernkirchener Sandstein

Bei Obernkirchener Sandsteinen haben die Untersuchungen folgende Regressionen ergeben:

ungefestigt und gefestigt: $E_{st,stat} [N/mm^2] = 0,75 E_{st,dyn} [N/mm^2]$ $r^2 = 0,79$ (5.63)

ungefestigt: keine Korrelation möglich

mit "S" gefestigt: $E_{st,stat} [N/mm^2] = 0,75 E_{st,dyn} [N/mm^2]$ $r^2 = 0,79$ (5.64)

mit "T" gefestigt: $E_{st,stat} [N/mm^2] = 0,64 E_{st,dyn} [N/mm^2]$ $r^2 = 0,76$ (5.65)

Die Korrelationen der ermittelten Werte mit Ausnahme von ungefestigten Obernkirchener Sandsteinen können bei den sich ergebenden Bestimmtheitsmaßen der Gleichungen (5.63) bis (5.65) als Anhaltswert verwendet werden, vom einfacher zu bestimmenden dynamischem E-Modul auf den statischen E-Modul zu schließen.

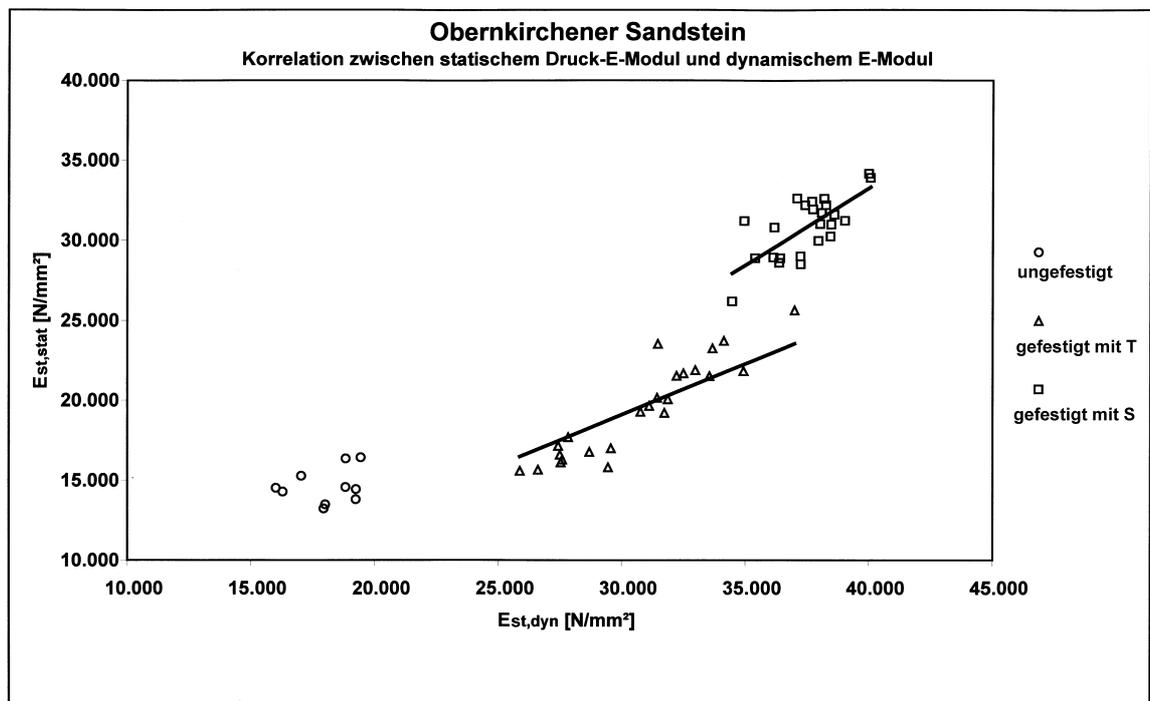


Abbildung 5.28: Korrelation zwischen statischem und dynamischem E-Modul beim Obernkirchener Sandstein

b) Roter Wesersandstein

Bei roten Wesersandsteinen haben die Untersuchungen folgende Regressionen ergeben:

ungefestigt und gefestigt:

$$E_{st,stat} \text{ [N/mm}^2\text{]} = 0,60 E_{st,dyn} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad r^2 = 0,76 \quad (5.66)$$

ungefestigt: $E_{st,stat} \text{ [N/mm}^2\text{]} = 0,21 E_{st,dyn} \text{ [N/mm}^2\text{]} + 7.087 \quad r^2 = 0,58 \quad (5.67)$

mit "S" gefestigt: $E_{st,stat} \text{ [N/mm}^2\text{]} = 0,67 E_{st,dyn} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad r^2 = 0,82 \quad (5.68)$

mit "T" gefestigt: $E_{st,stat} \text{ [N/mm}^2\text{]} = 0,55 E_{st,dyn} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad r^2 = 0,81 \quad (5.69)$

Die Korrelationen der ermittelten Werte mit Ausnahme von ungefestigten roten Wesersandsteinen können bei den sich ergebenden Bestimmtheitsmaßen, siehe Gleichungen (5.66) und (5.68) bis (5.69) als Anhaltswerte verwendet werden.

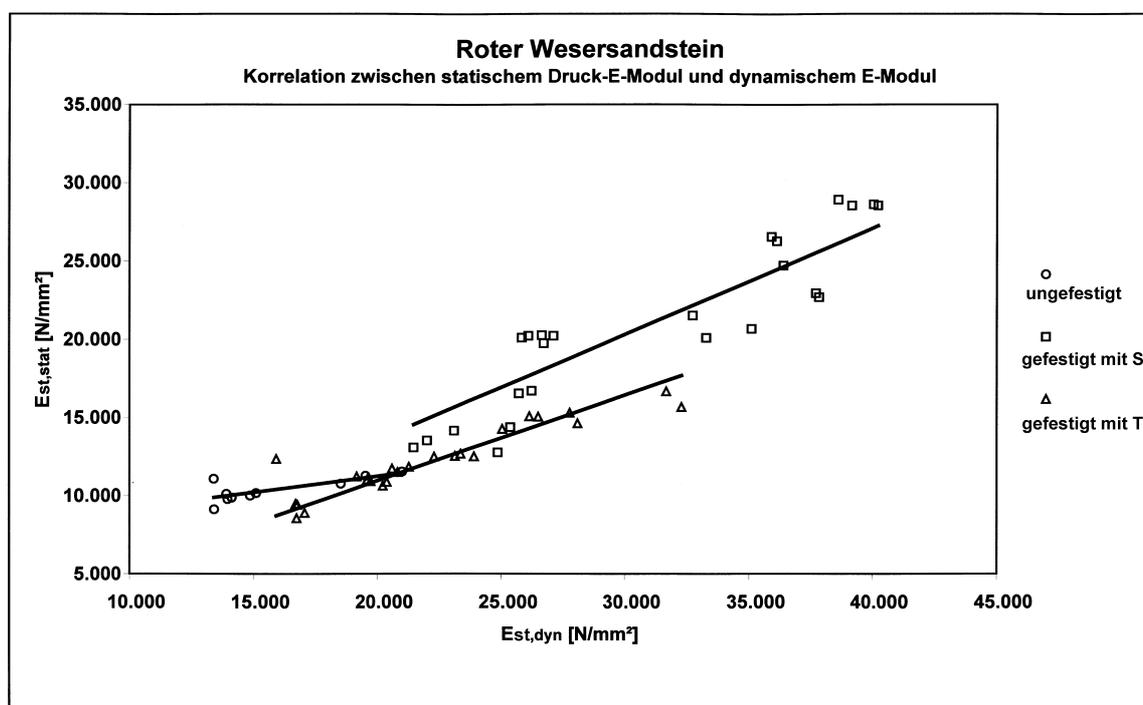


Abbildung 5.29: Korrelation zwischen statischem und dynamischem E-Modul beim roten Wesersandstein

c) Rühthener Grünsandstein

Bei Rühthener Grünsandsteinen haben die Untersuchungen folgende Regressionen ergeben:

ungefestigt und gefestigt: $E_{st,stat} \text{ [N/mm}^2\text{]} = 0,83 E_{st,dyn} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad r^2 = 0,75 \quad (5.70)$

ungefestigt: $E_{st,stat} \text{ [N/mm}^2\text{]} = 0,80 E_{st,dyn} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad r^2 = 0,29 \quad (5.71)$

mit "S" gefestigt: $E_{st,stat} \text{ [N/mm}^2\text{]} = 0,94 E_{st,dyn} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad r^2 = 0,60 \quad (5.72)$

mit "T" gefestigt: $E_{st,stat} \text{ [N/mm}^2\text{]} = 0,65 E_{st,dyn} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad r^2 = 0,58 \quad (5.73)$

Die Korrelationen aller ermittelten Werte mit Ausnahme von ungefestigtem Material können bei den sich ergebenden Bestimmtheitsmaßen für den Rühthener Grünsandsteinen als Anhalt verwendet werden, vergl. Gleichungen (5.70) und (5.72) bis (5.73).

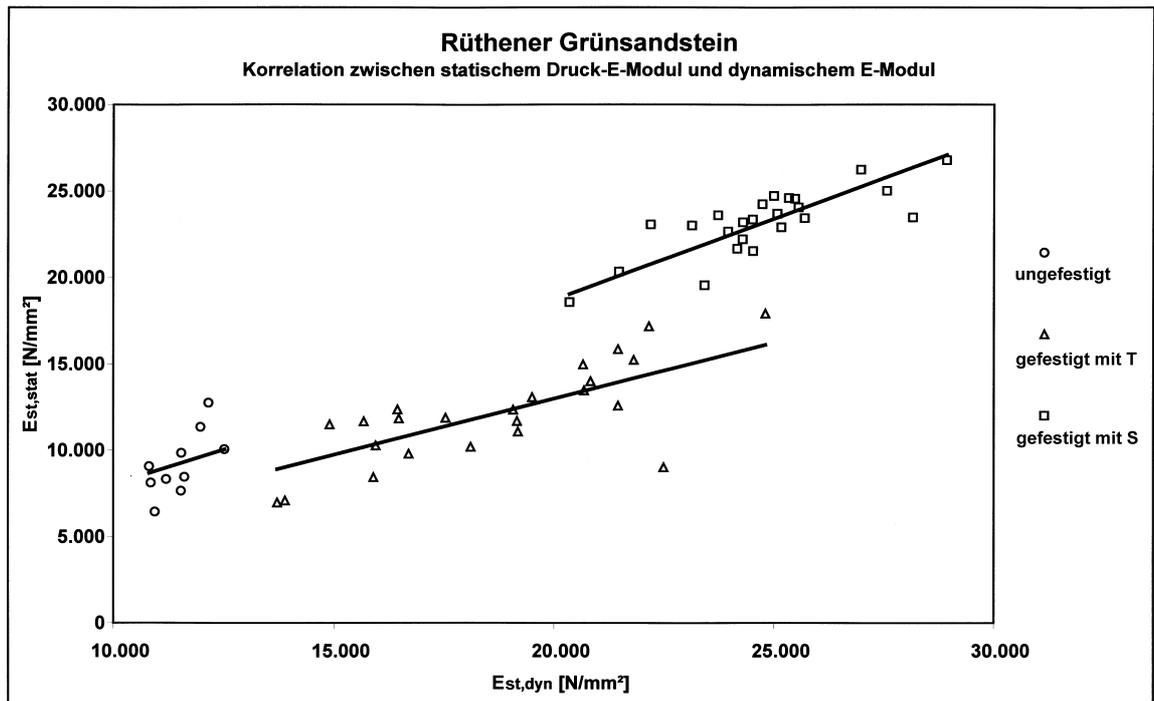


Abbildung 5.30: Korrelation zwischen statischem und dynamischem E-Modul beim Rüthener Grünsandstein

Schlußfolgerung: Der statische E-Modul kann bei Sandsteinen näherungsweise aus dem dynamischen E-Modul ermittelt werden. *Ein* einheitlicher Ansatz für *alle* Sandsteine kann nicht angegeben werden. Für die hier untersuchten drei unterschiedlichen Sandsteine konnte festgestellt werden, daß der statische E-Modul das 0,6- bis 0,8-fache des dynamischen E-Modul beträgt.

5.9.6 Korrelationen zwischen Schallgeschwindigkeit und Rohdichte

Für die einzelnen Materialien wurde schließlich auch noch die Abhängigkeit zwischen der Schallgeschwindigkeit und der Rohdichte untersucht. Eine Korrelation für *alle* Sandsteine konnte bei Bestimmtheitsmaßen r^2 kleiner 0,2 nicht gefunden werden, was die materialspezifischen und nicht zu verallgemeinernden Materialeigenschaften bei Sandsteinen verdeutlicht. Innerhalb einer Materialgruppe konnte aber dennoch eine signifikante Erhöhung der Rohdichte nach einer Festigung anhand der Erhöhung der Schallgeschwindigkeit festgestellt werden.

a) Fabrikneue Ziegel

ungefestigt und gefestigt: $\rho \text{ [g/cm}^3\text{]} = 0,11 v \text{ [km/s]} + 1,43$ $r^2 = 0,67$ (5.74)

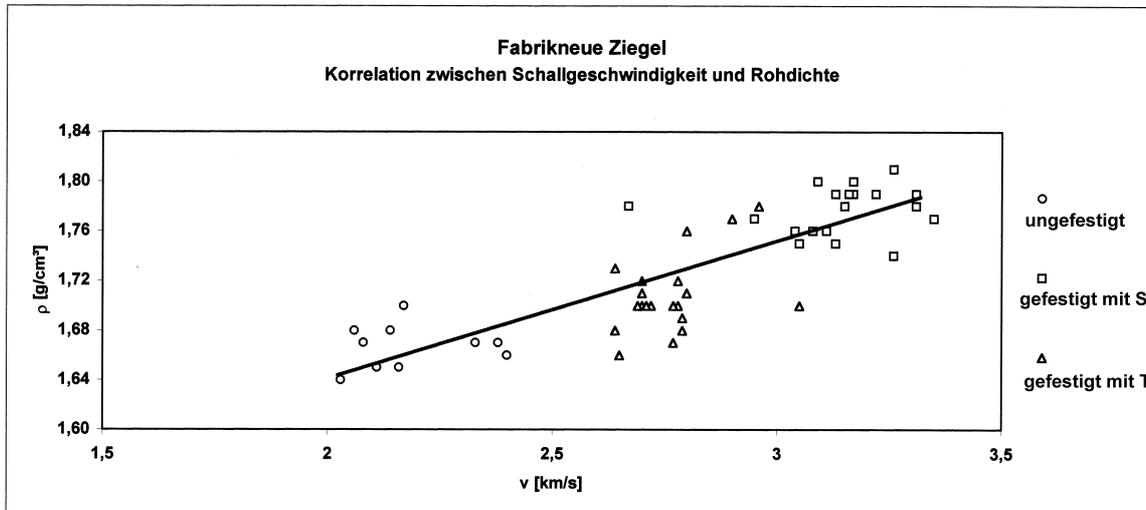


Abbildung 5.31: Korrelation zwischen Schallgeschwindigkeit und Rohdichte bei fabrikneuen Ziegeln

b) Historische Ziegel

ungefestigt und gefestigt: $\rho \text{ [g/cm}^3\text{]} = 0,096 v \text{ [km/s]} + 1,55$ $r^2 = 0,48$ (5.75)

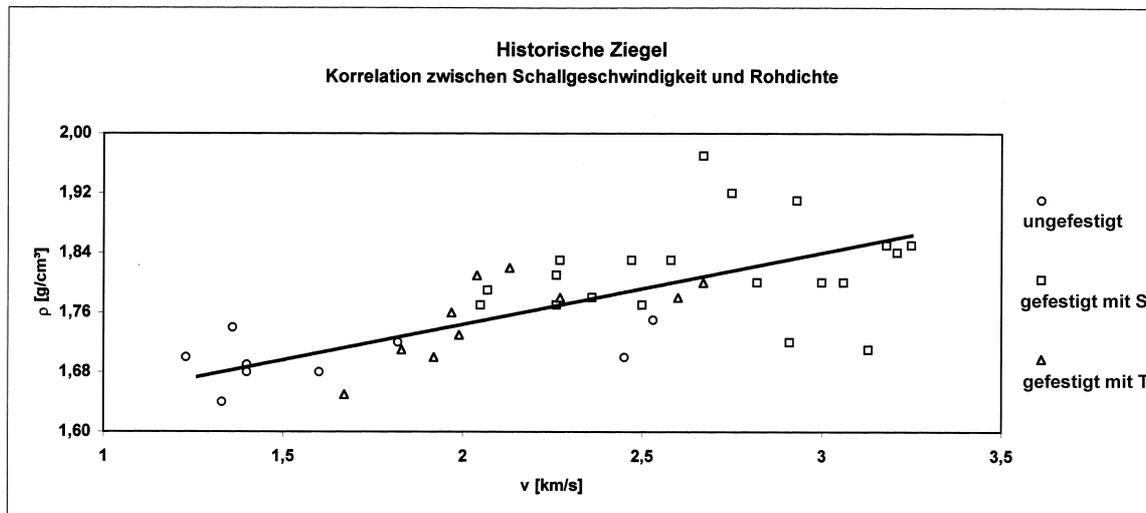


Abbildung 5.32: Korrelation zwischen Schallgeschwindigkeit und Rohdichte bei historischen Ziegeln

c) Mörtel

ungefestigt und gefestigt: $\rho \text{ [g/cm}^3\text{]} = 0,17 v \text{ [km/s]} + 1,51$ $r^2 = 0,60$ (5.76)

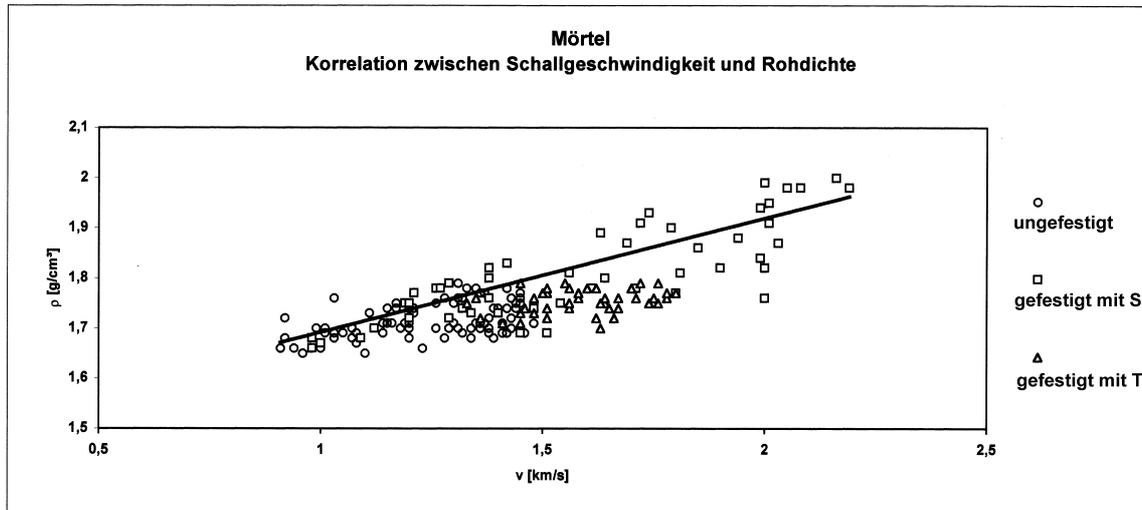


Abbildung 5.33: Korrelation zwischen Schallgeschwindigkeit und Rohdichte bei Mörteln

d) Obernkirchener Sandstein

ungefestigt und gefestigt: $\rho \text{ [g/cm}^3\text{]} = 0,04 v \text{ [km/s]} + 1,99$ $r^2 = 0,53$ (5.77)

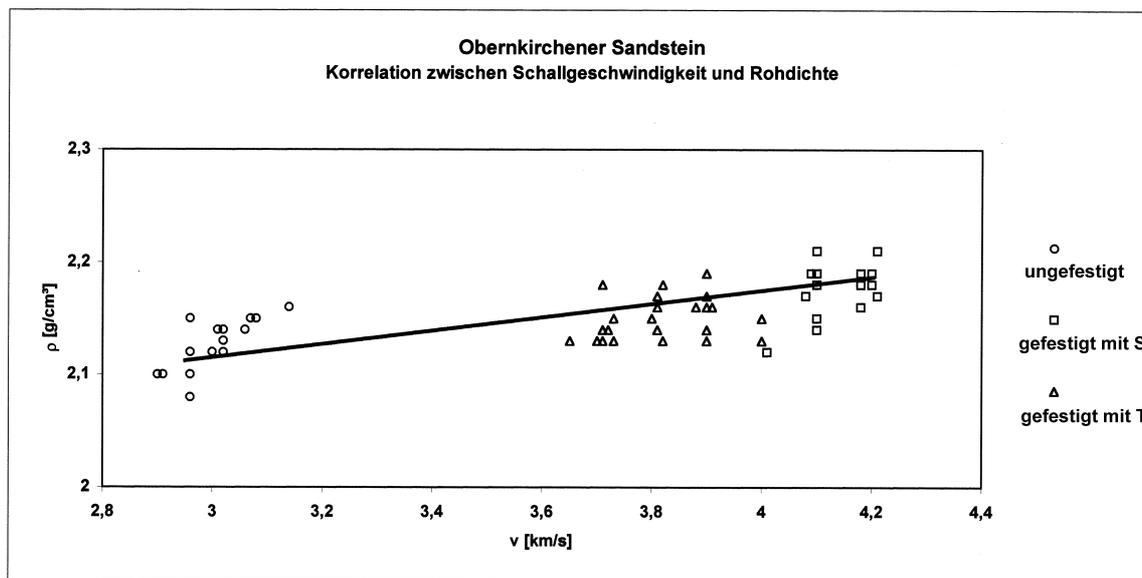


Abbildung 5.34: Korrelation zwischen Schallgeschwindigkeit und Rohdichte beim Obernkirchener Sandstein

e) Roter Wesersandstein

ungefestigt und gefestigt: $\rho \text{ [g/cm}^3\text{]} = 0,07 v \text{ [km/s]} + 2,08$ $r^2 = 0,27$ (5.78)

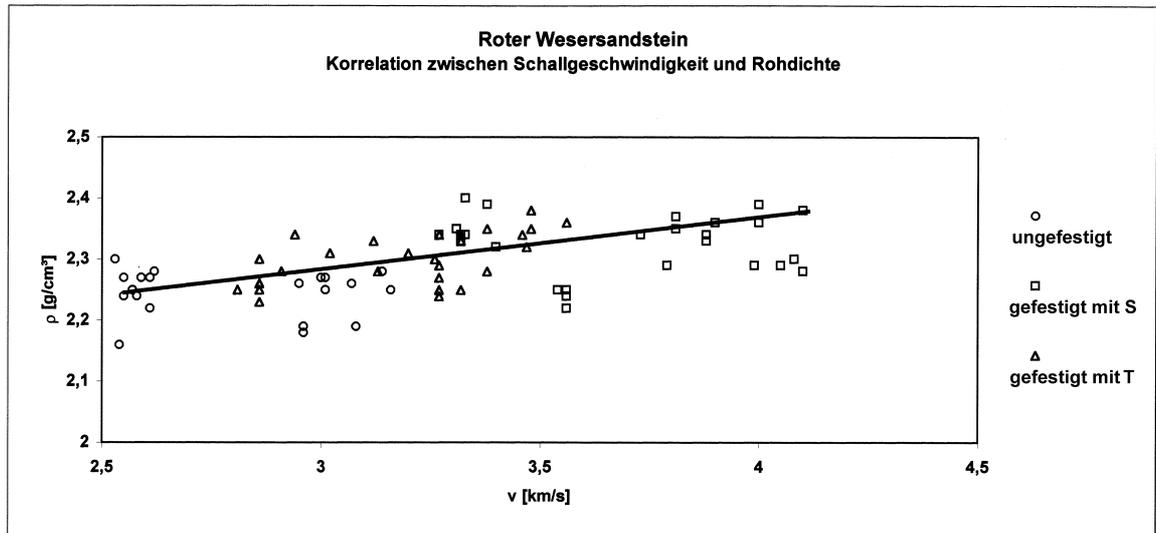


Abbildung 5.35: Korrelation zwischen Schallgeschwindigkeit und Rohdichte beim roten Wesersandstein

f) Rühener Grünsandstein

ungefestigt und gefestigt: $\rho \text{ [g/cm}^3\text{]} = 0,11 v \text{ [km/s]} + 1,75$ $r^2 = 0,63$ (5.79)

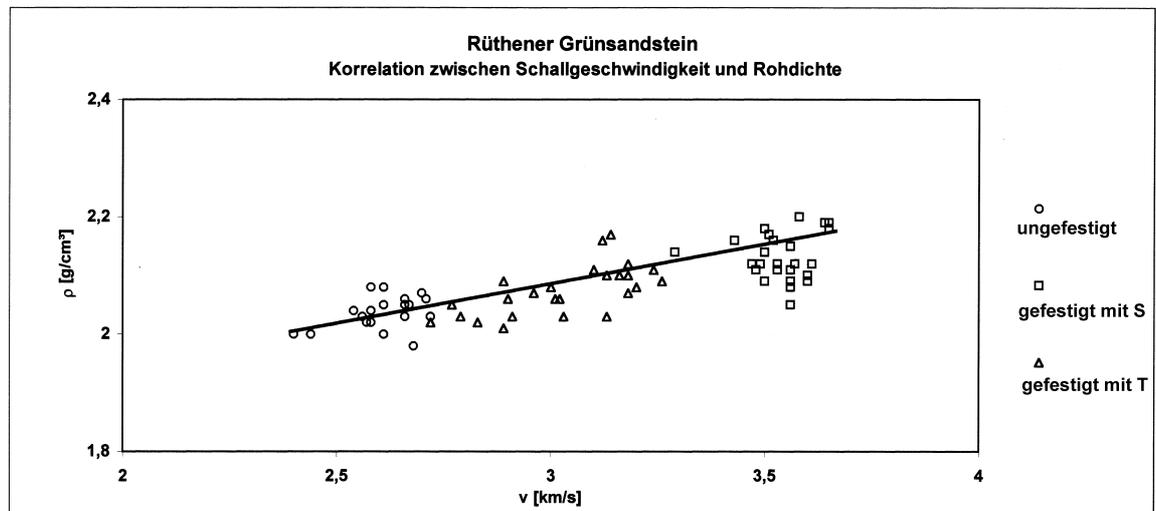


Abbildung 5.36: Korrelation zwischen Schallgeschwindigkeit und Rohdichte beim Rühener Grünsandstein

5.9.7 Zusammenfassung der untersuchten Korrelationen

Mit den vorstehend untersuchten Korrelationen wurde im Hinblick auf möglichst großflächige, substanzschonende Untersuchungen am bestehenden Bauwerk das Ziel verfolgt, mit Hilfe zerstörungsfreier Messungen der Ultraschallgeschwindigkeit auf physikalisch-mechanische Gesteins- bzw. Mörtel Eigenschaften zu schließen.

Zusammenfassend wird festgestellt:

- **Allgemeines**

Für die drei untersuchten Sandsteine können allgemein keine Zusammenhänge angegeben werden, da jeder der drei Sandsteine materialspezifische Unterschiede aufweist.

Die mit "T" gefestigten Materialien zeigen im Gegensatz zu den mit "S" gefestigten Materialien eine geringere Erhöhungen der mechanischen Eigenschaften auf.

Die linearen Bezugsgeraden der untersuchten Ziegel, Sandsteine und Mörtel ergaben innerhalb *eines* Materials häufig unterschiedliche Steigungen, je nachdem, ob das Material ungefestigt oder gefestigt war. Das bedeutet, daß in der Regel leider keine Bezugsgerade mit einem ausreichend hohen Bestimmtheitsmaß, $r^2 \geq 0,8$, gefunden werden konnte, um von der ursprünglichen Materialeigenschaft auf die gefestigte Materialeigenschaft schließen zu können.

- **Korrelation Ultraschallgeschwindigkeit – Druckfestigkeit**

Bestimmt man eine Bezugsgerade aufgrund weniger ungefestigter Bohrkerne, um so nach einer Festigung anhand der gestiegenen Ultraschallgeschwindigkeit die veränderte Druckfestigkeit zu bestimmen, so würde dies z.B. bei Ziegeln zu einer Überschätzung der Tragfähigkeit nach der Festigung führen. Im Falle der Ziegel läge der Fehler zwischen 15% und 20%. Als Anhalt bezüglich der Steigerung der Druckfestigkeit bei gefestigten Ziegeln wäre die Ausgleichsgerade ungefestigter Ziegel dennoch brauchbar. Die Bezugsgeraden Ultraschallgeschwindigkeit – Druckfestigkeit, Abbildung 5.16 und Abbildung 5.17, der Ziegel wiesen von allen untersuchten Materialien das höchste Bestimmtheitsmaß, $r^2 > 0,85$ auf, d.h. die beste Eignung, um von der Ultraschallgeschwindigkeit auf die Druckfestigkeit zu schließen.

Bei den untersuchten Mörteln ist die unterschiedliche Steigung der Ausgleichsgeraden je nach Zustand, ob ungefestigt oder gefestigt, besonders ausgeprägt. Bei Mörteln würde man über die Bezugsgerade die mögliche Druckfestigkeitssteigerung der gefestigten Mörtel um über 100% unterschätzen, siehe Abbildung 5.18.

Ein Zusammenhang zwischen Ultraschallgeschwindigkeit und Druckfestigkeit konnte bei Sandsteinen nicht hergestellt werden. Eine mögliche Erklärung ist, daß für die Untersuchungen ausschließlich bruchfrische Sandsteine verwendet wurden, deren Druckfestigkeit mit Ausnahme des Rühthener Grünsandsteins keinen großen Streuungen unterliegen, z.B. beim Rühthener Grünsandstein $V = 16\%$, bei den übrigen Sandsteine $V < 10\%$

- **Korrelation Ultraschallgeschwindigkeit – Biegezugfestigkeit**

Die Biegezugfestigkeit wurde an Mörtel- und Sandsteinprismen untersucht. Wie bereits oben erwähnt, ist aufgrund unterschiedlicher Steigungen der Bezugsgeraden der Schluß von der ungefestigten Ausgleichsgeraden auf die Biegezugfestigkeit der gefestigten Materialien nicht möglich. Beim roten Wesersandstein, vergl. Abbildung 5.22, sind aufgrund der ausgeprägten Anisotropie Ausgleichsgeraden getrennt je nach Festigung bzw. für ungefestigtes Material ermittelbar. Von der ungefestigten Ausgleichsgerade auf die Biegezugfestigkeit beispielsweise der mit "S" gefestigten roten Wesersandsteine zu schließen, würde zu einer Überschätzung der Biegezugfestigkeit von bis zu 40% führen.

Beim Mörtel führt der Schluß von der Ausgleichsgeraden der ungefestigten Mörtel auf die mit "S" gefestigten Mörtel wie schon bei der Druckfestigkeit zu einer Unterschätzung der Biegezugfestigkeit von bis zu 100%, siehe Abbildung 5.20.

- **Korrelation Druckfestigkeit – dynamischer E-Modul**

Da der dynamische E-Modul aus der Ultraschallgeschwindigkeit bestimmt worden ist, gelten hier die bereits unter der Korrelation Ultraschallgeschwindigkeit – Druckfestigkeit beschriebenen Tendenzen.

- **Korrelation dynamischer E-Modul – statischer Druck-E-Modul**

Die bereits beschriebene Tendenz unterschiedlicher Steigungen der Bezugsgeraden bei ungefestigtem Material sowie nach Festigung mit "S" oder "T", ist bei der Korrelation dynamischer – statischer E-Modul "weniger" ausgeprägt, siehe Abbildung 5.28 bis Abbildung 5.30, d.h., daß Ausgleichsgeraden gemeinsam für ungefestigte und gefestigte Materialien als Anhaltswerte dienen können, um vom dynamischen E-Modul auf den aufwendiger zu bestimmenden statischen E-Modul zu schließen. Ausgleichsgeraden für die jeweils ungefestigten Sandsteine allein zu finden, war allerdings aufgrund einer "punktwolkenförmigen" Anordnung der Meßwerte, siehe z.B. Abbildung 5.28, kaum möglich, was wiederum auf die geringe Streuung der bruchfrischen Sandsteine zurückzuführen ist.

- **Korrelation Ultraschallgeschwindigkeit – Rohdichte**

Mit einem Bestimmtheitsmaß von $r^2 \approx 0,6$, mit Ausnahme des roten Wesersandsteins mit $r^2=0,27$, konnte für jedes einzelne Material für alle Festigkeitszustände eine gemeinsame Ausgleichsgeraden ermittelt werden, siehe Abbildungen 5.31 bis 5.36. Die Ultraschallgeschwindigkeit ist aufgrund der geringen Bestimmtheitsmaße nur für eine grobe Abschätzung hinsichtlich der Rohdichte geeignet. Für alle Sandsteine gemeinsam läßt sich kein allgemeingültiger Bezug Schallgeschwindigkeit – Rohdichte angeben, was das geringe Bestimmtheitsmaß von $r^2 = 0,2$ verdeutlicht.

5.10 Beurteilung der statistischen Auswertungen der Versuchsergebnisse

Statistik ist eine Zusammenfassung von Methoden, die uns erlauben, vernünftige optimale Entscheidungen im Falle von Ungewissheit zu treffen.

Im vorliegenden Kapitel 5 wurden Auswertungen über Korrelationsrechnungen durchgeführt, die Aufschluß geben sollten, ob zwischen den verschiedenen materialtechnischen Prüfgrößen Zusammenhänge bestehen.

Es sei hervorgehoben, daß man mit Schlußfolgerungen aus den Ergebnissen der in Kapitel 5 durchgeführten Berechnungen vorsichtig sein muß, da der Probenumfang in Verbindung mit den teilweise großen Streuungen endgültige Schlußfolgerungen nur begrenzt zuläßt. Beispielhaft sei die Ermittlung der Zusammenhänge zwischen der Mauerwerksdruckfestigkeit der RILEM-Prüfkörper und den Druckfestigkeiten der Ausgangsstoffe Mauersteine und Mauermörtel, siehe Kapitel 5.8.3, erwähnt. Die geringe Anzahl von Versuchskörpern in Verbindung mit den großen Streuungen verdeutlicht die Unsicherheit der Aussagen.

Die Frage nach dem optimalen Stichprobenumfang n ist keine statistische Frage, sondern eine technische Frage, die nur für den jeweiligen Einzelfall zu beantworten ist. Dabei ist die mögliche Anzahl an durchzuführenden Versuchen häufig eine Kostenfrage. Für aus der Statistik ableitbare Aussagen wird man in jedem Einzelfall den „Ingenieurverstand“ einsetzen müssen.

6 Parameterstudie mit der Methode der Finiten Elemente

Das unterschiedliche Querdehnverhalten von Stein und Mörtel im Verbundsystem Mauerwerk führt zu Zwangspannungen, die in der Regel im Bruchzustand zum Überschreiten der Steinzugfestigkeit und damit zu Rissen in den Ziegeln und schließlich zum Versagen des Mauerwerks führen. Die Parameterstudie mit der Methode der Finiten Elemente soll dazu dienen, Aussagen über die im Mauerwerk wirkenden Horizontalspannungen, die zum Überschreiten der Steinzugfestigkeit führen können, zu erhalten. Dabei sollen insbesondere die Änderung der Horizontalspannungen ungefestigter und gefestigter Mauerwerkskörper untersucht werden. Versuchstechnisch konnten die Mauerwerkskörper im Streichverfahren nur bis zu einer Tiefe von ca. 1cm gefestigt werden. Mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente soll eine Aussage zum Tragverhalten des Mauerwerks bei vollständiger Festigung über die gesamte Tiefe ermöglicht werden, bzw. eine Aussage über das Tragverhalten von Mauerwerk, bei dem lediglich der Mörtel, nicht jedoch die Steine gefestigt werden.

Der innere Spannungszustand eines fünf-schichtigen Mauerwerkskörpers nach Abbildung 6.1 wurde mit Hilfe des Finite Elemente Programms *MicroFe* der Firma mb Software bestimmt.

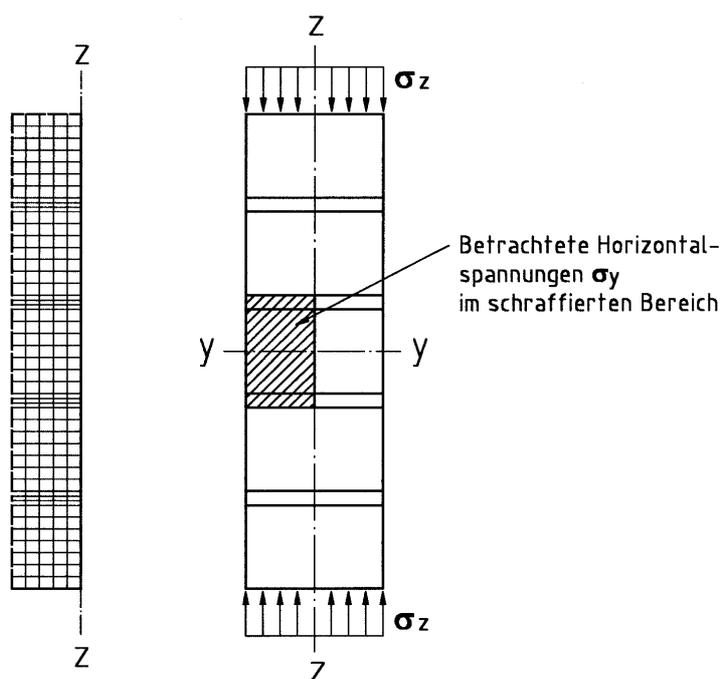


Abbildung 6.1: Querschnitt des numerisch untersuchten fünf-schichtigen Mauerwerkskörpers mit dargestellter Elementstruktur

Aus Symmetriegründen wurde die Berechnung auf den halben Querschnitt entlang der z-Achse beschränkt. Die Knoten der unteren Auflagerfläche sind in y- und z-Richtung gehalten, die Knoten in der Symmetrieachse sind lediglich in y-Richtung gehalten. Bei der Berechnung wurde sowohl für den Stein, als auch für den Mörtel ein homogenes und isotropes Material mit linearem Spannungsdehnungsverhalten angenommen. Für das Ziel, den qualitativen Unterschied der Horizontalspannungen ungefestigter und gefestigter Mauerwerkskörper bis zum ersten Riss zu ermitteln, war diese idealisierte Annahme ausreichend. Das in Abbildung 6.1 dargestellte System wurde als Scheibe mit einer konstanten Dicke $d=49\text{cm}$ (2 Steinlängen + Stoßfuge) berechnet. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Horizontalspannungen bei räumlicher Berechnung größer sind als bei einer Berechnung als Scheibe. Der durch die näherungsweise Berechnung mit

dem Scheibenspannungszustand entstandene Fehler ist für den qualitativen Verlauf der Scheibenspannungsverteilung jedoch unerheblich. Als Belastung wurde am Mauerwerkskopf eine gleichmäßig verteilte Last von 1 kN/m angesetzt.

Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln 4.2 bis 4.4 ausführlich beschrieben, wurden an den ungefestigten und gefestigten Einzelprüfkörpern wie Ziegel, Sandsteine und Mörtel einzelne Materialkennwerte empirisch bestimmt. Die Querdehnzahlen μ wurden mit Hilfe der Resonanzfrequenz an Sandsteinen und Mörteln bestimmt. Tendenziell sinkt die Querdehnzahl μ bei gefestigten Mörteln gegenüber ungefestigten Mörteln um 10 bis 20%, bei Sandsteinen ist genau der gegenteilige Effekt, Steigerung von μ nach Festigung um 20 bis 50%, zu beobachten, siehe Anhang 4.3. Da die Bestimmung der Querdehnzahl μ mittels Resonanzfrequenz hohen Schwankungen unterlag, wurde für μ für ungefestigte und gefestigte Materialien immer der an ungefestigten Materialien ermittelte Wert angesetzt. An Ziegeln konnte die elastische Querdehnzahl aufgrund der Probekörpergeometrie nicht bestimmt werden. Für Ziegel wurde $\mu = 0,2$ angenommen. Um abzuschätzen, welche Auswirkung der unveränderte Ansatz von μ für ungefestigte Materialien auf die Berechnung der Spannungen mit Hilfe der Finiten Elemente hat, werden im folgenden die Dehnungen von Stein und Mörtel bei unterschiedlichen Querdehnzahlen μ untersucht. Für zweidimensionale Scheiben gilt gemäß dem Hook'schen Gesetz:

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_y - \mu \cdot \sigma_z) \quad (6.1)$$

Mit der Annahme $\sigma_y = 0$ und $\sigma_{z,st} \cong \sigma_{z,mö}$ ergibt sich folgendes Verhältnis von Steindehnung zu Mörteldehnung:

$$\frac{e_{y,st}}{e_{y,mö}} = \frac{m_{st}}{m_{mö}} \cdot \frac{E_{mö}}{E_{st}} \quad (6.2)$$

Für die E-Modul-Werte werden in folgenden Berechnungen die *Verhältnismerte* entsprechend den in Versuchen ermittelten Werten für ungefestigte und zweifach gefestigte Materialien angesetzt, siehe Tabelle 6.1. Beispielhaft werden für ungefestigte und zweifach gefestigte Obernkirchener Sandsteine und Mörtel mit den mittels Ultraschallgeschwindigkeit ermittelten E-Modul-Werten, vergl. Tabellen 4.6, 4.16 und 4.25, bzw. mittels Resonanzfrequenz ermittelten Querdehnzahlen μ , siehe Anhang 4.3, die folgenden Verhältnisse Stein- zu Mörteldehnung, gemäß Gleichung (6.2), ermittelt:

E-Modul und μ für ungefestigten Stein und Mörtel:

$$\frac{e_{y,st}}{e_{y,mö}} = \frac{0,08}{0,1} \cdot \frac{1}{7} \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_{y,st} = 0,11 \cdot \varepsilon_{y,mö} \quad (6.3)$$

E-Modul und μ für Stein und Mörtel mit "S" gefestigt

$$\frac{e_{y,st}}{e_{y,mö}} = \frac{0,11}{0,08} \cdot \frac{1}{4,58} \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_{y,st} = 0,30 \cdot \varepsilon_{y,mö} \quad (6.4)$$

E-Modul für Stein und Mörtel mit "S" gefestigt, μ für ungefestigten Stein und Mörtel

$$\frac{e_{y,st}}{e_{y,mö}} = \frac{0,08}{0,1} \cdot \frac{1}{4,58} \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_{y,st} = 0,17 \cdot \varepsilon_{y,mö} \quad (6.5)$$

E-Modul und μ für Mörtel mit "S" gefestigt, E-Modul und μ für ungefestigte Steine

$$\frac{e_{y,st}}{e_{y,m\ddot{o}}} = \frac{0,08}{0,08} \cdot \frac{1}{2,25} \Rightarrow \varepsilon_{y,st} = 0,44 \cdot \varepsilon_{y,m\ddot{o}} \quad (6.6)$$

E-Modul für Mörtel mit "S" gefestigt, μ für ungefestigten Mörtel, E-Modul und μ für ungefestigte Steine

$$\frac{e_{y,st}}{e_{y,m\ddot{o}}} = \frac{0,08}{0,1} \cdot \frac{1}{2,25} \Rightarrow \varepsilon_{y,st} = 0,35 \cdot \varepsilon_{y,m\ddot{o}} \quad (6.7)$$

Das Querdehnverhalten von Stein und Mörtel ist für die Tragfähigkeit des Mauerwerks von wesentlicher Bedeutung. Je stärker sich die Querdehnung beider Materialien voneinander unterscheidet, desto größer ist der Festigkeitsabfall im Mauerwerk. Der Vergleich der Gleichungen (6.4) und (6.5), die sich nur in der Änderung der Querdehnzahl μ unterscheiden macht deutlich, daß der Ansatz von μ ungefestigter Materialien (Gleichung 6.5) ein auf der sicheren Seite liegendes Ergebnis liefert, da der Unterschied der Querdehnung von Stein und Mörtel steigt (Festigkeitsabfall). Den Gleichungen (6.6) und (6.7) ist die gleiche Tendenz zu entnehmen. Für den roten Wesersandstein, den Rühthener Grünsandstein und die Ziegel gelten sinngemäß die obigen für den Obernkirchener Sandstein rechnerisch hergeleiteten Überlegungen.

Als E-Modul wurde der mittels Ultraschall ermittelte dynamische E-Modul angesetzt. Für die gefestigten Steine und Mörtel wurden die E-Modulmittelwerte nach zweifacher Festigung angesetzt, siehe Tabellen 4.6, 4.16 und 4.25. Für verschiedene Materialkennwerte – Elastizitätsmoduln und Querdehnzahlen von Stein und Mörtel – wurden im Mauerwerkskörper wirkende Horizontal- und Vertikalspannungen bestimmt. Die größten Horizontalspannungen entstehen im Bereich der Querdehnungsbehinderung zwischen Mörtel und Stein. In nachfolgender Tabelle 6.1 werden die auf die Vertikalspannungen bezogenen maximalen Horizontalspannungen im Stein (mit Pfeil gekennzeichneten Bereich in Abbildung 6.1) bei unterschiedlichen Materialkennwerten miteinander verglichen. In folgende Grenzwertbetrachtungen werden ausschließlich mit "S" gefestigte Materialien einbezogen, da die Steigerung des E-Moduls der mit "T" gefestigten Materialien grundsätzlich niedriger war.

Tabelle 6.1: Zusammenstellung der mit FEM ermittelten bezogenen maximalen Horizontalspannung im Stein bei Variation der Verformungskennwerte von Mörtel und Stein

Nr.	Steinart	Elastizitätsmodul		Verhältnisswerte der Elastizitätsmoduli	Querdehnzahlen		bezogene maximale Horizontalspannungen im Stein	Bemerkung
		Stein E_{st}	Mörtel $E_{mö}$		Stein m_{st}	Mörtel $m_{mö}$		
-	-	N/mm ²	N/mm ²	-	-	-	(S_y/S_z) x 100	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Obernkirchener Sandstein	18.900	2.700	7,00	0,08	0,10	-1,85	ungefestigt
2		38.500	8.400	4,58	0,08	0,10	-1,65	alles gef.
3		18.900	8.400	2,25	0,08	0,10	-1,17	nur Mörtel gef.
4	Roter Wesersandstein	20.600	2.700	7,63	0,15	0,10	-1,67	ungefestigt
5		38.100	8.400	4,54	0,15	0,10	-1,32	alles gef.
6		20.600	8.400	2,45	0,15	0,10	-0,70	nur Mörtel gef.
7	Rüthener Grünsandstein	13.500	2.700	5,00	0,04	0,10	-1,86	ungefestigt
8		28.000	8.400	3,33	0,04	0,10	-1,67	alles gef.
9		13.500	8.400	1,61	0,04	0,10	-1,27	nur Mörtel gef.
10	Fabrikneue Ziegel	8.000	2.700	2,96	0,20	0,10	-0,66	ungefestigt
11		18.700	8.400	2,23	0,20	0,10	-0,22	alles gef.
12		8.000	8.400	1,25	0,20	0,10	1,72	nur Mörtel gef.

Die Werte der Spalten 3, 4, 6 und 7 ergeben sich aus eigenen Versuchen, siehe Tabellen 4.6, 4.16 und 4.25 sowie Anhang 4.3, an ungefestigten und mit "S" gefestigten Einzelprüfkörpern. In Spalte 9 ist der Zustand des RILEM-Körpers eingetragen (ungefestigt, alles gefestigt, d.h. Stein und Mörtel gefestigt, nur Mörtel gefestigt). Die bezogenen Horizontalspannungen (Spalte 8) nehmen mit steifer werdenden Mörteln (geringeres Verhältnis $E_{st}/E_{mö}$) ab, d.h., daß Mörtel, die ungefähr so steif sind wie die Mauersteine, ein günstiges Tragverhalten des Mauerwerks bewirken. Für die Erhöhung der Tragfähigkeit eines Mauerwerks mittels Steinfestigungsmittel bedeutet dies, daß die alleinige Festigung des Mörtels bereits zu einer Tragfähigkeitssteigerung führen würde. Voraussetzung ist allerdings, daß die gesamte Mörtelfuge durchtränkt ist, da die Festigung allein des äußeren Bereiches zu keiner Tragfähigkeitserhöhung führt, wie die Versuche in Kapitel 5.8 zeigen. Wird bei der Verfestigung lediglich der äußere Bereich verfestigt, so führt dies im Inneren zu einem Steifigkeitssprung, was dann unerwünschte Abplatzungen im äußeren Bereich verursachen kann. Die bezogenen Horizontalspannungen (Spalte 8) im Stein verringern sich rechnerisch im linear elastischen Bereich nach einer Festigung der Mörtelfuge bei:

- Obernkirchener Sandstein um 37%
- Roter Wesersandstein um 58%
- Rüthener Grünsandstein um 32%
- Fabrikneue Ziegel um über 100% (Druckspannung im Stein)

Ein Vergleich mit der errechneten Tragfähigkeitserhöhung nach dem Ansatz gemäß Gleichung (2.1)

$$\beta_{D,mw} = a \cdot \beta_{D,st}^b \cdot \beta_{D,m\ddot{o}}^c$$

zeigt, daß mit dieser Formel, die lediglich die Druckfestigkeit von Stein und Mörtel berücksichtigt, das Tragverhalten des Verbundsystems Mauerwerk im Hinblick auf das unterschiedliche Querdehnverhalten von Stein und Mörtel nur unzureichend wiedergibt. Dennoch hat sich diese Formel zur Abschätzung der Tragfähigkeit von Mauerwerk bewährt.

Mit den aus eigenen Versuchen ermittelten Regressionskoeffizienten $a - c$, siehe Kapitel 5.8.3, Tabelle 5.2, ergeben sich durch Festigung des Mörtels folgende Mauerwerksfestigkeiten (Druckfestigkeiten der gefestigten Mörtel siehe Tabelle 4.24, Druckfestigkeiten der Sandsteine siehe Anhang 4.1-1):

- Obernkirchener Sandstein $\beta_{D,mw} = 1,34 \cdot 94^{0,6} \cdot 9,1^{0,07} = 23,9 \text{ N/mm}^2$ (6.8)

- Roter Wesersandstein $\beta_{D,mw} = 1,34 \cdot 85^{0,6} \cdot 9,1^{0,07} = 22,5 \text{ N/mm}^2$ (6.9)

- Rüthener Grünsandstein $\beta_{D,mw} = 1,34 \cdot 37^{0,6} \cdot 9,1^{0,07} = 13,7 \text{ N/mm}^2$ (6.10)

- Fabrikneue Ziegel $\beta_{D,mw} = 0,98 \cdot 10^{0,78} \cdot 9,1^{0,37} = 13,4 \text{ N/mm}^2$ (6.11)

Für ungefestigte Mauerwerkskörper, d.h. mit $\beta_{D,m\ddot{o}} = 1,2 \text{ N/mm}^2$, ergeben sich analog zu den Gleichungen (6.8) bis (6.11) folgende Mauerwerksfestigkeiten:

- Obernkirchener Sandstein $\beta_{D,mw} = 20,7 \text{ N/mm}^2$

- Roter Wesersandstein $\beta_{D,mw} = 19,5 \text{ N/mm}^2$

- Rüthener Grünsandstein $\beta_{D,mw} = 11,8 \text{ N/mm}^2$

- Fabrikneue Ziegel $\beta_{D,mw} = 6,3 \text{ N/mm}^2$

Die oben ermittelte rechnerische Steigerung der Tragfähigkeit von Mauerwerk mit gefestigter Mörtelfuge, siehe Gleichungen (6.8) bis (6.11), gegenüber Mauerwerk mit ungefestigter Mörtelfuge beträgt demnach:

- Obernkirchener Sandstein 15%

- Roter Wesersandstein 15%

- Rüthener Grünsandstein 16%

- Fabrikneue Ziegel 100%

Die rechnerisch ermittelten Steigerungen der Tragfähigkeiten sind nicht mit den experimentell ermittelten Versuchsergebnissen dieser Arbeit zu vergleichen, da die Mörtelfuge und die Steine der Mauerwerkskörper im Versuch nur ca. bis in eine Tiefe von 1 cm verfestigt werden konnten. Die in diesem Kapitel rechnerisch ermittelten Tragfähigkeitssteigerungen bei völliger Durchtränkung von Stein und/oder Mörtel sind in weiterführenden Arbeiten noch experimentell zu verifizieren.

Die folgenden Abbildungen 6.2 bis 6.9 zeigen den rechnerisch mit der Methode der Finiten Elemente ermittelten Verlauf (Verhältnisse der E-Moduli und Querdehnzahlen gemäß Angaben in Tabelle 6.1) der Horizontalspannungen σ_y . Dargestellt ist jeweils der mittlere Stein des fünfschichtigen RILEM-Körpers und die angrenzenden Mörtelfugen (schraffierter Bereich in Abbildung 6.1). Der mittlere Stein wurde gewählt, weil an dieser Stelle die Querdehnungsbehinderung am geringsten ist. In den Abbildung 6.2 bis 6.9 sind jeweils drei Zustände der RILEM-Körper dargestellt:

- Stein und Mörtel ungefestigt

- Stein und Mörtel gefestigt

- nur Mörtel gefestigt

Der Verlauf der Horizontalspannungen ist jeweils in Steinmitte ("Mitte", Symmetrieachse $z - z$) und am äußeren Rand ("Außen") dargestellt.

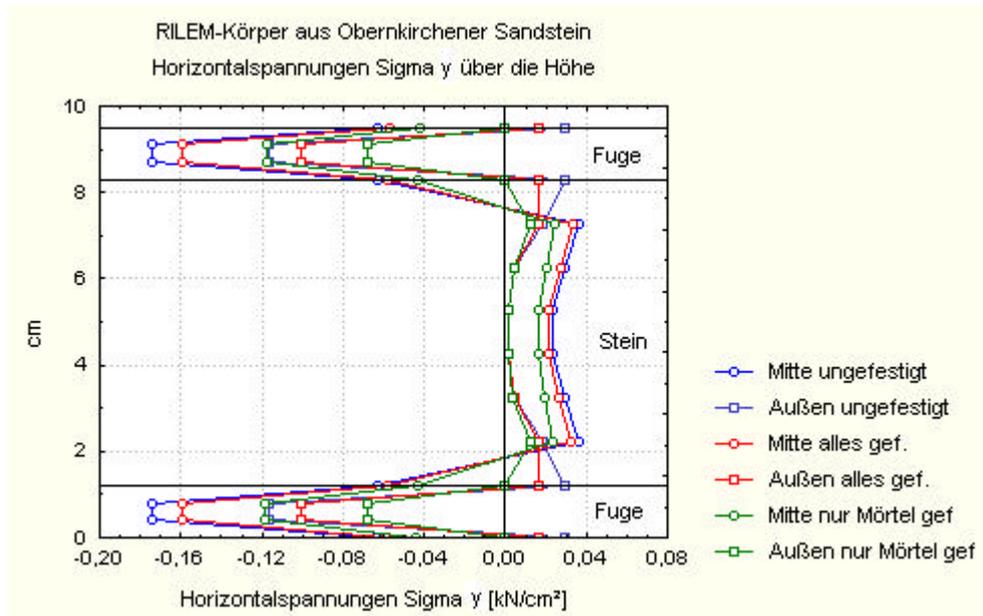


Abbildung 6.2: Horizontalspannungen s_y im mittleren Bereich eines fünf-schichtigen RILEM-Körpers aus Obernkirchener Sandstein

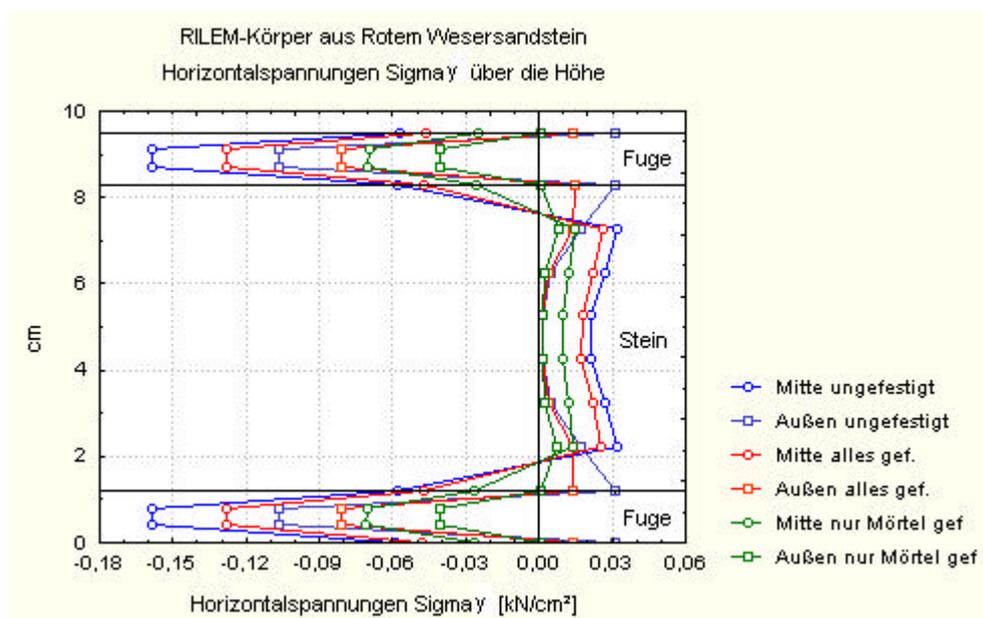


Abbildung 6.3: Horizontalspannungen s_y im mittleren Bereich eines fünf-schichtigen RILEM-Körpers aus rotem Wesersandstein

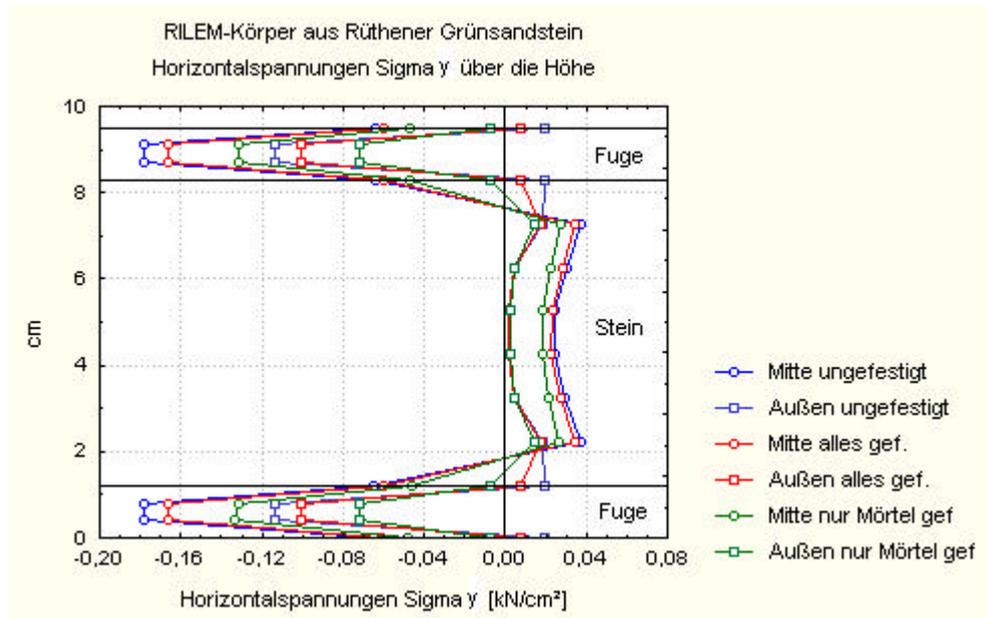


Abbildung 6.4: *Horizontalspannungen s_y im mittleren Bereich eines fünf-schichtigen RILEM-Körpers aus Rüthener Grün sandstein*

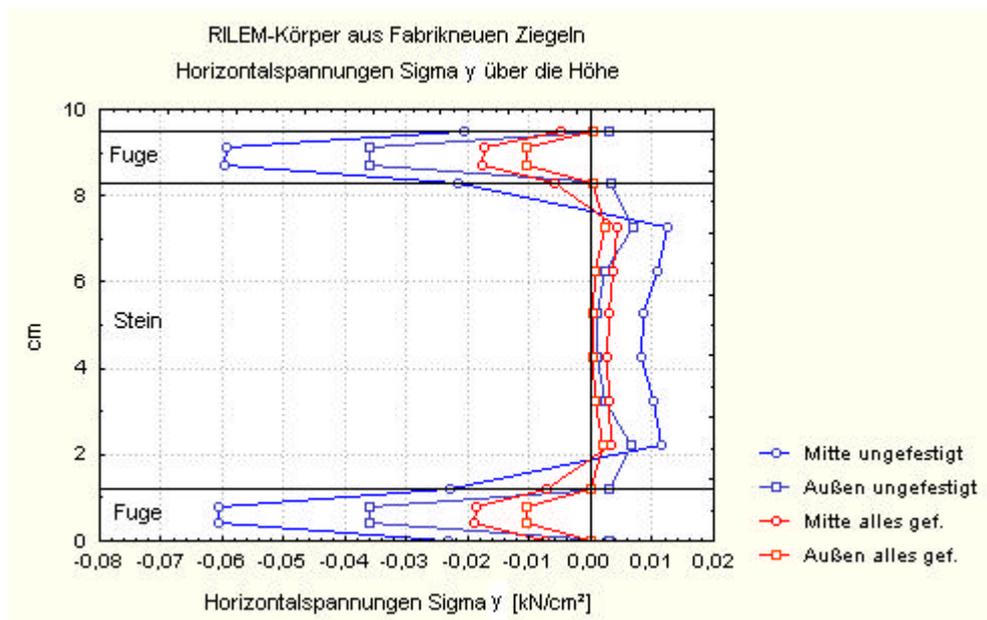


Abbildung 6.5: *Horizontalspannungen s_y im mittleren Bereich eines fünf-schichtigen RILEM-Körpers aus fabrikneuen Ziegeln*

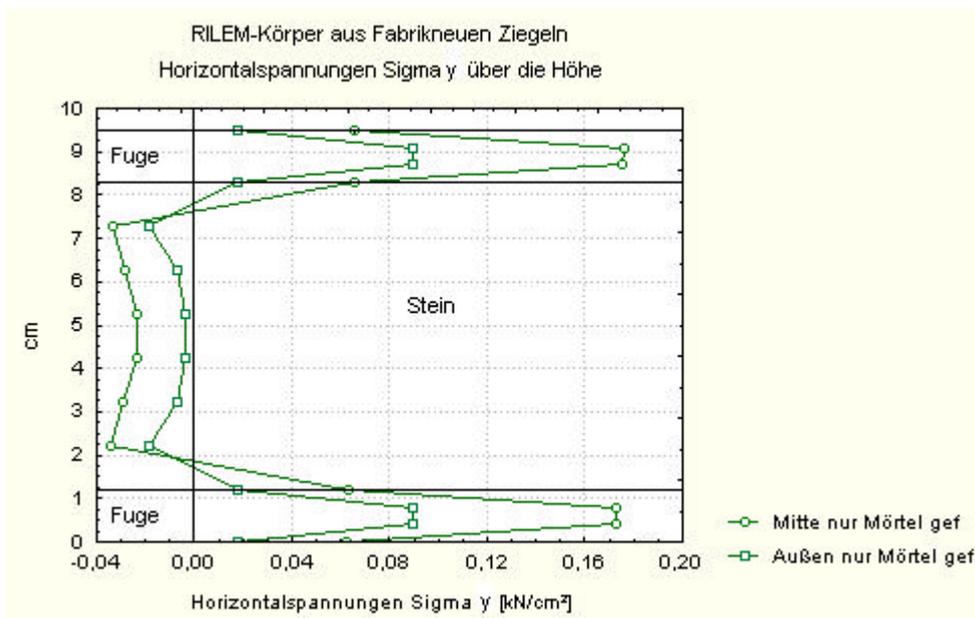


Abbildung 6.6: *Horizontalspannungen σ_y im mittleren Bereich eines fünf-schichtigen RILEM-Körpers aus fabrikneuen Ziegeln*

Die folgenden Abbildungen 6.8 und 6.9 zeigen die mittels FEM ermittelten Horizontalspannungen σ_y , dargestellt über die Breite des in Abbildung 6.7 gezeigten RILEM-Körpers. Für die Sandsteine ist exemplarisch der Verlauf der rechnerisch mittels FEM ermittelten Horizontalspannungen im Obernkirchener Sandsteins dargestellt. Unter Ausnutzung der Symmetrie sind die Horizontalspannungen des Steins in Achse A – A , die des Mörtels in Achse B – B vom äußeren Rand bis zur Symmetrieachse z – z, gemäß Abbildung 6.7, dargestellt.

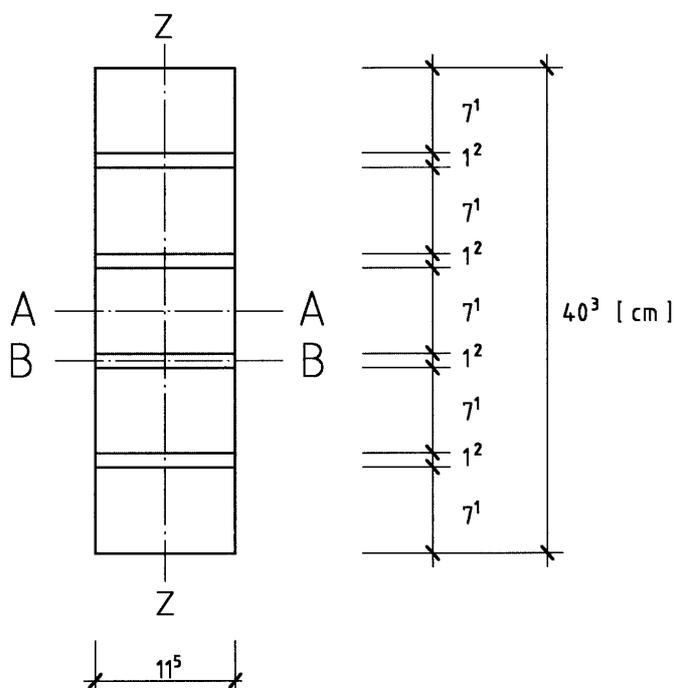


Abbildung 6.7: *Schnitte der numerisch untersuchten fünf-schichtigen Mauerwerkskörper*

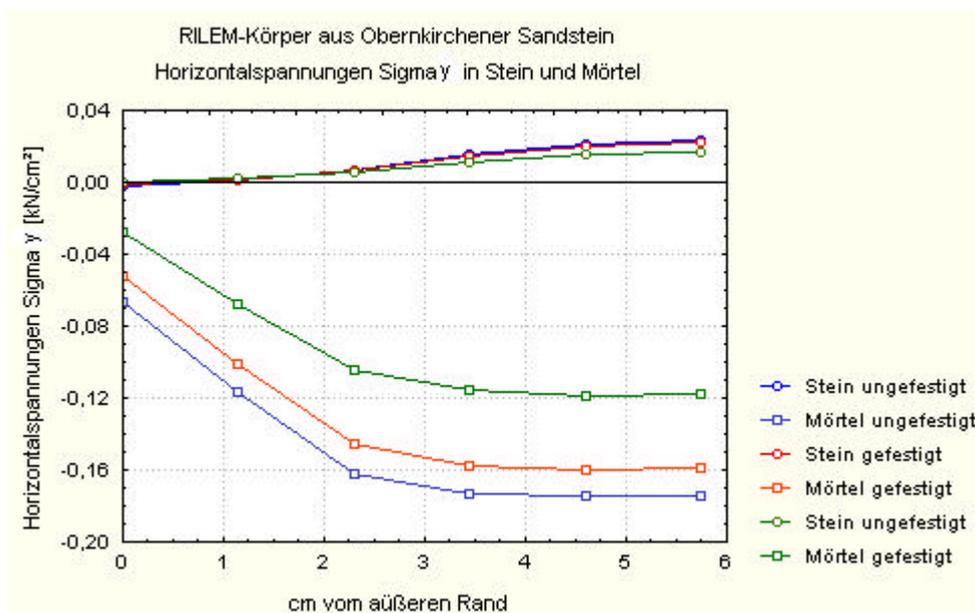


Abbildung 6.8: Horizontalspannungen s_y in den Achsen A – A (Stein) und B – B (Mörtel) an Mauerwerkskörpern aus Obernkirchener Sandstein

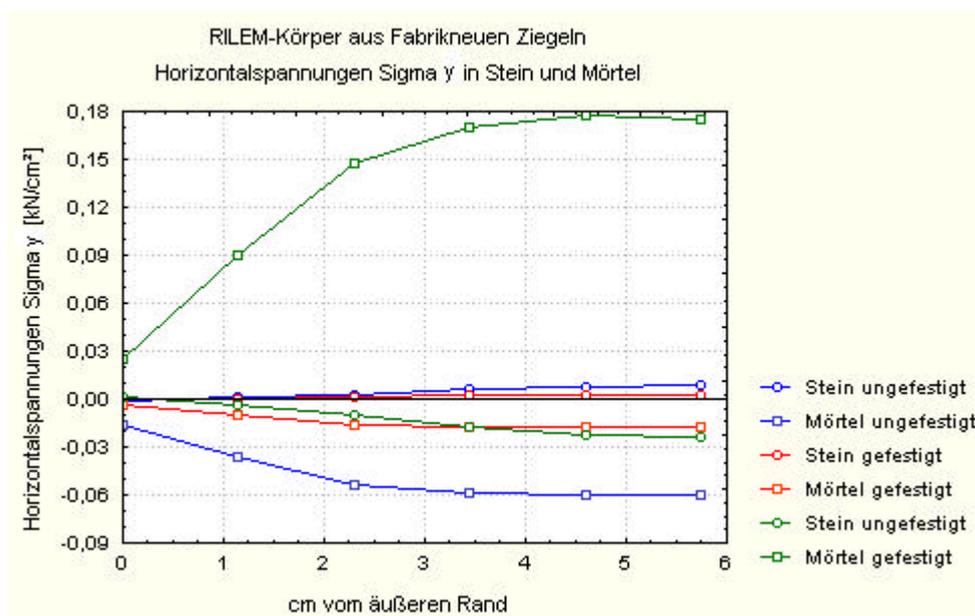


Abbildung 6.9: Horizontalspannungen s_y in den Achsen A – A (Stein) und B - B (Mörtel) an Mauerwerkskörpern aus fabrikneuen Ziegeln

Bei den fabrikneuen Ziegeln führt die Festigung nur des Mörtels zu Druckspannungen im Stein und Zugspannungen im Mörtel, d.h., die Mauerwerkstragfähigkeit wird erhöht. Querdruckspannungen im Stein bedeuten einen höheren Ausnutzungsgrad der Mauersteine. Tendenziell ist den Abbildungen 6.2 bis 6.9 zu entnehmen, daß durch die Festigung die Zugspannungen im Stein bzw. die Druckspannungen im Mörtel kleiner werden. Dieser Effekt ist bei RILEM-Körpern mit ausschließlich gefestigter Mörtelfuge am größten.

Führt die Festigung zu einer "steiferen" äußeren Schale, weil die Eindringtiefe nur gering ist, so besteht aufgrund des Steifigkeitssprungs im Inneren die Gefahr des Abplatzens der äußeren Zonen. Ein großer Steifigkeitssprung im Tiefenprofil eines Mauerwerkskörpers ist demnach unbedingt zu vermeiden.

Mit Hilfe der Methode der finiten Elemente wurde unter der Annahme linear elastischen Materialverhaltens festgestellt, daß bei gleichbleibender Belastung, die horizontale Spannung in Stein und Mörtel durch deren Festigung sinken. Das heißt, daß die Last bis zum Erreichen des ersten Risses bei gefestigtem Mauerwerk gesteigert werden kann. Das nichtlineare, plastische Materialverhalten bei zunehmender Belastung konnte mit Hilfe des zur Verfügung stehenden Programms nicht simuliert werden, so daß Absolutwerte bezüglich der Tragfähigkeitserhöhung durch Festigung in Verbindung mit weiteren Versuchen festgelegt werden sollten. Auch die Anwendbarkeit des Ansatzes der Gleichungen 6.8 bis 6.11 müßte an in die Tiefe vollständig gefestigten Mauerwerkskörpern untersucht werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Der zunehmende Verfall historischer Bauwerke stellt Architekten, Bauingenieure und Denkmalpfleger vor eine Vielzahl von Aufgaben. Aufgrund der Beanspruchung historischen Mauerwerks durch langfristige Nutzung und Belastung ist die Verstärkung bestehenden Mauerwerks häufig unvermeidlich. Verstärkungen sind so durchzuführen, daß das äußere Erscheinungsbild des Bauwerkes nicht verändert wird. Voruntersuchungen zur Abschätzung der Tragfähigkeit des bestehenden Mauerwerks sollte mit Rücksicht auf die historische Bausubstanz möglichst substanzschonend erfolgen.

Die Untersuchungen zur Erhöhung der Tragfähigkeit bestehenden Mauerwerks mittels Steinfestigungsmitteln und die anschließende zerstörungsarme/-freie Überprüfung der Festigung stand im Mittelpunkt dieser Arbeit. Die Untersuchungen wiesen folgende Schwerpunkte auf:

- Wirkung zweier unterschiedlicher Steinfestigungsmittel (Steinfestigungsmittel "S" mit ausschließlich festigender Wirkung auf der Basis von KSE, Steinfestigungsmittel "T" mit festigender und hydrophobierender Wirkung, ein wasserlösliches Konzentrat modifizierter Silane mit Alkylketten) auf mechanisch-physikalische Eigenschaften an folgenden Materialien:
Ziegel und zwar fabrikneue sowie historische unverwitterte Sandsteine (Obernkirchener Sandstein, Roter Wesersandstein, Rühthener Grünsandstein)
Mörtel (Mörtelgruppe MGI).
- Korrelation der gemessenen Ultraschallgeschwindigkeit v mit physikalisch mechanischen Eigenschaften der Steine und des Mörtels mit dem Ziel, eine Kalibrierkurve zu erstellen, anhand derer mittels der Ultraschallgeschwindigkeit von ungefestigte auf gefestigte Stein- bzw. Mörtel-eigenschaften geschlossen werden kann.
- Tragfähigkeitsversuche an ungefestigten und im Streichverfahren mit "S" bzw. "T" gefestigten RILEM-Körpern aus Ziegeln und Sandsteinen (s.o.) aufgemauert mit Mörtelgruppe MGI, um die Auswirkung der Festigung auf das Tragverhalten von Mauerwerk festzustellen.

Die Literaturlauswertung in **Kapitel 2** hat gezeigt, daß sich Steinfestigungsmittel auf der Basis von KSE im Hinblick auf die Verwitterungsbeständigkeit und die Dauerhaftigkeit bereits seit Jahren bewährt haben, für die festigende Wirkung auf die Standsicherheit bestehender Mauerwerkskörper jedoch keine Versuchsergebnisse vorliegen. Weiterhin konnten in der Literatur keinerlei Angaben über gefestigte Mörtel und den damit veränderten Eigenschaften gefunden werden. Angaben zur Untersuchung der Korrelation der zerstörungsfrei zu bestimmenden Ultraschallgeschwindigkeit v mit physikalisch mechanischen Gesteinseigenschaften sind in der Literatur für diverse Materialien zu finden, siehe Kapitel 2.1.6. Keine Angaben konnten aber hinsichtlich der "vorher – nachher" Untersuchung an ungefestigten und gefestigten Materialien gefunden werden, mit dem Ziel den Festigungserfolg (z.B. Steigerung der Druckfestigkeit) zerstörungsfrei mittels Ultraschall zu ermitteln.

Die Aufstellung des Versuchsprogramms wird in **Kapitel 3** beschrieben. Bei den Untersuchungen an Einzelprüfkörpern wurden fabrikneue und historische Ziegel, drei Sandsteinarten sowie Mörtel der Mörtelgruppe MGI einbezogen. Das Ziel, die Eigenschaften gefestigter Ziegel mit den Eigenschaften ungefestigter Ziegel (Nullproben) zu vergleichen, konnte aufgrund stark streuender Eigenschaftswerte historischer Ziegel nicht an diesen erreicht werden. Neben der Festigung historischer Ziegel wurden deswegen auch weniger streuende fabrikneue Ziegel gefestigt und untersucht. Als fabrikneue Zie-

gel wurden Ziegel der Festigkeitsklasse 8 gewählt, um die häufig geringe Festigkeit historischer Ziegel zu simulieren. Sandsteine wurden in das Versuchsprogramm mit einbezogen, weil zahlreiche historische Bauten aus Sandsteinmauerwerk erbaut sind. Mörtelgruppe MGI wurde im Hinblick auf die geringe Festigkeit des Mörtels in historischem Mauerwerk gewählt. Alle Einzelprüfkörper wurden bis zu dreifach im Festigungsmittel getränkt, um die Änderung von Kennwerten nach mehrfacher Festigung festzustellen.

Um die Auswirkung der Festigung auf bestehende Mauerwerkskörper zu untersuchen, wurden sowohl aus Ziegeln, als auch aus Sandsteinen RILEM-Körper mit Mörtelgruppe MG I aufgemauert und deren Druckfestigkeit und Verformung in ungefestigtem und zweifach im Streichverfahren gefestigtem Zustand untersucht. Die RILEM-Körper wurden über den Bruch hinaus belastet, um den Abfall der Spannungs-Dehnungs-Linie nach Erreichen der maximalen Last zu erfassen. Versuchsdurchführung und Prüfergebnisse sind **Kapitel 4** zu entnehmen.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse in **Kapitel 5** ließ folgende Tendenzen erkennen:

- Bezüglich des möglichen Mitteleintrages des Festigers bietet die Wasseraufnahme gute Anhaltspunkte. Eine geringe Wasseraufnahme läßt auf eine geringe Aufnahme des Festigers schließen und umgekehrt. Bei dichten Steinen, die sich im allgemeinen auf höherem Festigkeitsniveau befinden, ist eine geringere Eindringtiefe zu erwarten, als bei weniger festen Steinen. Durch bis zu dreifacher Volltränkung konnten alle Materialien vollständig durchtränkt und somit gefestigt werden.
- Durch mehrfache Festigung ist eine Steigerung der Materialkennwerte (z.B. Biegezug-/Druckfestigkeit, Rohdichte) zu erreichen. Die einzelnen Festigungen erfolgten jeweils nach einer Aushärtungszeit von zwei Wochen. Die dreifach gefestigten Einzelprüfkörper wiesen gegenüber zweifach gefestigten Materialien allerdings nur noch eine Festigkeitssteigerung von höchstens 10% auf, so daß man in der Regel mit zweifacher Festigung auskommen wird. Für baupraktische Belange ist der Festigungsgrad im Vorfeld festzulegen, um zu sehr gefestigte Bereiche und damit Steifigkeitssprünge im Inneren der Wand zu vermeiden. Die größten Festigkeitssteigerungen mittels Steinfestigungsmittel wurden beim Mörtel festgestellt. Die Druckfestigkeit des Mörtels (MG I) konnte durch zweifache Volltränkung in Festigungsmittel "S" im Mittel um über 600% gegenüber ungefestigten Mörteln gesteigert werden.
- Die festigende Wirkung des mit "T" bezeichneten Steinfestigers, der gleichzeitig hydrophobierend wirkt, bleibt bei allen Materialien hinter der Festigungswirkung des mit "S" bezeichneten Festigers ohne zusätzliche hydrophobierende Wirkung zurück. Die Festigkeitssteigerung der mit "T" gefestigten Materialien war bei der Biegezug- und Druckfestigkeit um bis zu Zweidrittel geringer als bei mit "S" gefestigten Materialien.
- Der dynamische E-Modul ermittelt mittels Ultraschall und Resonanzfrequenz nimmt prozentual bei gefestigten Materialien stärker zu, als die Biegezug- oder Druckfestigkeit. Der Vergleich der beiden Steinfestiger "S" und "T" zeigt, daß die mit "S" gefestigten Materialien einen höheren E-Modul aufweisen, als die mit "T" gefestigten Materialien.
- Hinsichtlich der durchgeführten Frost-Tau-Wechsel (FTW) Versuche an ungefestigten und gefestigten Materialien ist erwartungsgemäß eine deutliche Zunahme der Verwitterungsbeständigkeit gefestigter Materialien festzustellen. Ungefestigte Mörtel waren beispielsweise nach 5 Frost-Tau-Wechseln zerstört, die mit "T" gefestigten Mörtel wiesen erst ab dem 45. FTW (mit "S" gefestigten Mörtel ab dem

60. FTW) erste Risse auf und waren nach 70 Frost-Tau-Wechseln noch nicht zerstört.

- Die untersuchten Korrelationen der Ultraschallgeschwindigkeit mit der Biegezug- bzw. Druckfestigkeit führte zu keinen befriedigenden Ergebnissen. Die Bestimmtheitsmaße lagen unter $r^2 = 0,8$. Lediglich der Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit der Ziegel und Ultraschallgeschwindigkeit kann mit einem Bestimmtheitsmaß von r^2 größer 0,8 als gut bezeichnet werden. Das Ziel, anhand einer an ungefestigtem Material empirisch ermittelten Kalibrierkurve auf Eigenschaftswerte (z.B. Erhöhung der Druckfestigkeit) nach Festigung zu extrapolieren, muß als gescheitert bezeichnet werden. Der Verlauf der Kalibrierkurven für ungefestigte und gefestigte Materialien war in der Steigung so unterschiedlich, daß eine gemeinsame Bezugskurve nicht gefunden werden konnte.
- Die Eindringtiefe des Steinfestigers der zweifach (beidseitig auf der Längsseite) im Streichverfahren mittels Pinsel gefestigten RILEM-Körper betrug nur ca. 1 cm. Hinsichtlich des Tragverhaltens von Mauerwerk ist die Festigung der äußeren Schale nicht ausreichend, um eine signifikante Erhöhung der Tragfähigkeit zu erreichen. Bei dichtem Gefüge und höherfesten Sandsteinen, hier Obernkirchener Sandstein, führt die Festigung der äußeren Schale sogar zu einer Tragfähigkeitsminderung, weil der Querschnitt durch das Abplatzen der äußeren Schale nach dem ersten Riss vermindert wird.
- Zur Ermittlung des Zusammenhanges zwischen Stein-, Mörtel und Mauerwerksfestigkeit wurden Ausgleichsrechnungen mit dem Ansatz $\beta_{D,mw} = a \cdot \beta_{D,st}^b \cdot \beta_{D,mö}^c$ durchgeführt. Die Ergebnisse haben gezeigt, daß bei Mauerwerk aus historischen Ziegeln die Streuungen der Steineigenschaften so groß war, daß kein geeigneter Ansatz nach obiger Gleichung gefunden werden konnte. Für ungefestigte Mauerwerkskörper aus fabrikneuen Ziegeln bzw. Sandsteinen konnten durch Ausgleichsrechnungen auf der Grundlage der durchgeführten Versuche Regressionskoeffizienten a, b und c ermittelt werden. Bei den RILEM-Körpern aus Sandsteinen war der Einfluß der Mörtelfestigkeit auf die Mauerwerksfestigkeit geringer als bei den RILEM-Körpern aus fabrikneuen Ziegeln.
- Das Verformungsverhalten der RILEM-Körper war bereits bei der hier erreichten Eindringtiefe des Festigers von nur ca. einem Zentimeter beeinflusst. Die gefestigten RILEM-Körper wiesen im Anfangsverlauf der Spannungs-Dehnungs-Linie eine stärkere Krümmung auf, als unbehandelte RILEM-Körper. Für die Beschreibung der Spannungs-Dehnungs-Linie erwies sich für ungefestigte RILEM-Körper aus Ziegeln der Ansatz $s = a \cdot \varepsilon - \frac{a^2}{b} \cdot \varepsilon^2$ als gut geeignet. Für gefestigte RILEM-Körper und RILEM-Körper aus Sandsteinen wurde mit obigem Ansatz die Krümmung im Anfangsbereich der Spannungs-Dehnungs-Linie nicht ausreichend erfaßt. Hierfür erwies sich der Ansatz $s = a \cdot \varepsilon^b$ als geeigneter.
- Um den Einfluß größerer Eindringtiefen des Festigers in Stein und Mörtel auf die Tragfähigkeit von Mauerwerk numerisch zu erfassen, wurde in **Kapitel 6** mit Hilfe der finiten Elemente eine Parameterstudie durchgeführt. Folgende Grenzfälle wurden untersucht: das Steinfestigungsmittel durchtränkt Stein und Mörtel vollkommen oder nur die Mörtelfuge wird vollkommen durchtränkt. Unter der Annahme linear elastischen Materialverhaltens bis zum ersten Riß wurden Horizontal- und Vertikalspannungen miteinander verglichen. Bei gleichbleibender vertikaler Druckbelastung sind die Horizontalspannungen in Stein und Mörtel am geringsten, wenn ausschließlich die Mörtelfuge gefestigt wird.

Aufgrund der durchgeführten Versuche kann festgestellt werden, daß die hier untersuchten Steinfestigungsmittel zur Tragfähigkeitssteigerung bestehenden Mauerwerks

eingesetzt werden können. Eine denkbare Einsatzmöglichkeit wäre beispielsweise die Tragfähigkeitssteigerung eines zu erhaltenden Gewölbes mittels Festigung des Mörtels. Die Durchtränkung des zu festigenden Mörtels kann mit Hilfe von Injektionen über aufgesetzte Packer realisiert werden.

Weitergehende labortechnische Versuche bezüglich des Tragverhaltens an vollständig durchtränkten Mauerwerkskörpern oder Mauerwerkskörpern, bei denen lediglich die Mörtelfuge vollständig durchtränkt wurde, sind im Hinblick auf den Ansatz von Rechenmodellen gefestigten Mauerwerks notwendig. Das nichtlineare, plastische Materialverhalten bei zunehmender Belastung konnte mit Hilfe des zur Verfügung stehenden FEM-Programms nicht simuliert werden, so daß Absolutwerte bezüglich der Tragfähigkeitserhöhung durch Festigung in Verbindung mit weiteren Versuchen festgelegt werden sollten.

Darüber hinaus ist die Dauerhaftigkeit von mit Steinfestigungsmitteln gefestigter Mörtel noch nicht untersucht. Im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit der mit Steinfestigungsmitteln auf der Basis von KSE behandelten Steine sei auf die Dissertation von Sattler [102] verwiesen. Demnach sind Dauerhaftigkeiten behandelter Sandsteine bis zu 15 Jahren erreichbar.

Die in dieser Arbeit untersuchten RILEM-Körper waren 11,5 cm dick. Im Hinblick darauf, daß historische Mauerwerksbauten häufig größere Dicken (bis zu 200 cm) aufweisen, sollten weiterführende Untersuchungen bezüglich der Tragfähigkeitssteigerung bestehenden Mauerwerks nach Festigung an ≥ 24 cm breiten RILEM-Körpern durchgeführt und die Möglichkeit der vollständigen Injektion untersucht werden.

8 Literaturverzeichnis

- [1] ALFES, CH., BREIT, W. SCHIESSL, P.: Eindringhärte - Grundlagen und Anwendung für Festigkeitsprofile an verwittertem Naturstein; Jahresberichte Steinzerfall - Steinkonservierung , Seiten 219-225, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1992.
- [2] ALFES, CH., SCHIESSL, P.: Bohrtechnik als zerstörungsarmes Prüfverfahren für Naturstein; Jahresberichte Steinzerfall-Steinkonservierung 1989, Seiten 183-188; Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1991.
- [3] ALFES, CH., SCHIESSL, P.: Festigkeit und Verformbarkeit von Sandstein – Bedeutung für die Verwitterungsresistenz und Meßmethoden; Bautenschutz und Bausanierung 14, 1991, Seiten [34]-[38].
- [4] ALFES, CH.: Bruchmechanisches Werkstoffverhalten von Sandstein unter Zugbeanspruchung; Dissertation, RWTH Aachen, 1993.
- [5] ALFES, CH.: Physikalisch-mechanische Eigenschaften von Sandsteinen, Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Teil 3, expert-Verlag, Band 420, Kontakt und Studium, 1988, Seiten 1741-1762.
- [6] ANSTÖTZ, W.: Zur Ermittlung der Biegetragfähigkeit von Kalksand - Plansteinmauerwerk; Dissertation, 1991, TU Hannover.
- [7] ARNOLD, A.: Moderne alkalische Baustoffe und die Probleme bei der Konservierung von Denkmälern; Internationales Kolloquium, München, 21./22. Mai 1984; Seiten 152-162, Sonderheft des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege.
- [8] BENTRUP, H.: Untersuchungen zur Prüfung der Frostwiderstandsfähigkeit von Ziegeln im Hinblick auf lange Lebensdauer; Dissertation an der Technischen Universität Hamburg-Harburg; Verlag Shaker, 1992.
- [9] BERGER, F., WENZEL, F.: Einsatzmöglichkeiten zerstörungsfreier Untersuchungsmethoden an Mauerwerk, insbesondere an historischen Bauten; Sonderforschungsbereich 315, Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke; Universität Karlsruhe, Jahrbuch 1988, Seiten 69-106.
- [10] BERGER, F.: Zur nachträglichen Bestimmung der Tragfähigkeit von zentrisch gedrücktem Ziegelmauerwerk; Sonderforschungsbereich 315, Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke; Universität Karlsruhe, Jahrbuch 1986, Seiten 231-248.
- [11] BERNDT, E., SCHÖNE, I.: Tragfähigkeitsversuche an Natursteinmauerwerk aus sächsischem Sandstein zur Beurteilung historischer Konstruktionen; Proceedings of the 9th International Brick/Block Masonry Conference, Berlin, 13.-16. October 1991, Seiten 1449-1456, DGfM.
- [12] BERNDT, E.: Beurteilung von Natursteinmauerwerk vor und nach dem Verpressen; Arbeitshefte des Sonderforschungsbereichs 315 „Erhalten hist. bedeutsamer Bauwerke“, Sonderheft 1990; Seiten 57 – 60, Universität Karlsruhe.
- [13] BERNDT, E.: Zur Druck- und Schubfestigkeit von Mauerwerk - experimentell nachgewiesen an Strukturen aus Elbesandstein; Bautechnik 73 (1996), Heft 4, Seiten 222-234.
- [14] BERNDT, E.; SCHÖNE, I.: Tragverhalten von Natursteinmauerwerk aus Elbesandstein; Sonderforschungsbereich 315, Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke; Universität Karlsruhe, Jahrbuch 1990, Seiten 183-189.

- [15] BLASCHKE, R.: Zum Tragverhalten von Porenbeton-Planstein Mauerwerk; Proceedings of the 9th International Brick/Block Masonry Conference, Berlin, 13.-16. October 1991, Seiten 132-140, DGfM.
- [16] DafStb, Heft 422: Prüfung aus Beton, Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048; Beuth Verlag GmbH, Berlin Köln, 1991.
- [17] DGZfP, Merkblatt B4: Merkblatt für das Ultraschall-Impuls-Verfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung mineralischer Baustoffe und Bauteile; Ausgabe Mai 1993.
- [18] DIEM, P.: Zerstörungsfreie Prüfmethode für das Bauwesen, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, 1982.
- [19] DIMMIG, A., ERFURT, W.: Neue Methoden zur Bestimmung der Eindringtiefe und Wirksamkeit von Verfestigern; Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen, 3. Jahrgang, S. 235 – 252, 1997.
- [20] DIN 105, Teil 1: Mauerziegel; Vollziegel und Hochlochziegel; Ausgabe August 1989.
- [21] DIN 1053-1: Mauerwerk; Teil 1: Berechnung und Ausführung, Ausgabe November 1996.
- [22] DIN 18554, Teil 1: Prüfung von Mauerwerk; Ermittlung der Druckfestigkeit und des Elastizitätsmoduls, Ausgabe Dezember 1985.
- [23] DIN 18555, Teil 3: Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln; Festmörtel, Bestimmung der Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit und Rohdichte; Ausgabe September 1982.
- [24] DIN 18555, Teil 4: Prüfung von Mörtel mit mineralischen Bindemitteln, Festmörtel, Bestimmung der Längs- und Querdehnung sowie von Verformungskenngrößen von Mauermörteln im statischen Druckversuch Ausgabe 1986.
- [25] DIN 52 102: Prüfung von Naturstein und Gesteinskörnungen; Bestimmung von Dichte, Trockenrohddichte, Dichtigkeitsgrad und Gesamtporosität; Ausgabe August 1988.
- [26] DIN 52 103: Prüfung von Naturstein und Gesteinskörnungen; Bestimmung von Wasseraufnahme und Sättigungswert; Ausgabe Oktober 1988.
- [27] DIN 52 105: Prüfung von Naturstein; Druckversuch; Ausgabe August 1988.
- [28] DIN 52 112: Prüfung von Naturstein; Biegeversuch; Ausgabe August 1988.
- [29] DIN 52 252, Teil 1: Prüfung der Frostwiderstandsfähigkeit von Vormauerziegeln und Klinkern; Allseitige Befrostung von Einzelziegeln; Ausgabe Dezember 1986.
- [30] DIN 54 126, Teil 1: Zerstörungsfreie Prüfung; Regeln zur Prüfung mit Ultraschall, Anforderungen an Prüfsysteme und Prüfgegenstände; Ausgabe Oktober 1982.
- [31] DIN 54 126, Teil 2: Zerstörungsfreie Prüfung; Regeln zur Prüfung mit Ultraschall, Durchführung der Prüfung; Ausgabe Oktober 1982.
- [32] DIN 66133: Bestimmung der Porenvolumenverteilung und der spezifischen Oberfläche von Feststoffen durch Quecksilberintrusion, Juni 1993.
- [33] DIN ISO 8047: Festbeton; Bestimmung der Ultraschallgeschwindigkeit; Entwurf Mai 1989.
- [34] DIN V 52 104, Teil 3: Prüfung von Naturstein und Gesteinskörnungen; Frost-Tau-Wechsel-Versuch, Prüfung von Gesteinskörnungen mit Taumitteln; Ausgabe September 1992.

- [35] DIN V ENV 1996-1-1:1996-12, Eurocode 6: Bemessung und Konstruion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln; Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk.
- [36] DZENIS, W.: Anwendung von Ultraschall zur Prüfung von Beton und Baukeramik auf Fehler und Festigkeit; Materialprüfung, Band 28 (1986), Nr. 4, Seiten 109-115.
- [37] EGERMANN, R., MAYER, K.: Die Entwicklung der Ziegelherstellung und ihr Einfluß auf die mechanischen Eigenschaften von Mauerziegeln; Sonderforschungsbereich 315, Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke; Universität Karlsruhe, Jahrbuch 1988, Seiten 107-130.
- [38] EGERMANN, R.: Tragverhalten mehrschaliger Mauerwerkskonstruktionen; Dissertation, TH Karlsruhe, 1994.
- [39] EGERMANN, R.: Zur nachträglichen Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Mauerziegeln; Sonderforschungsbereich 315, Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke; Universität Karlsruhe, Jahrbuch 1990, Seiten 159-182
- [40] Ettl, H., Schuh, H.: Konservierende Festigung von Sandsteinen mit Kieselsäurethylester, Bautenschutz + Bausanierung 12, Seiten 35 – 38, 1989.
- [41] FALLER, A., KAROTKE, E., ALTHAUS, E.: Zur Dauerhaftigkeit von Mauerwerksanierungen. Untersuchungen an Verpressmaterial von Nageln und Zuganker bei sanierten historischen Bauwerken, Universität Karlsruhe SFB 315, 1995.
- [42] FICHTNER, W.; COOK, D.: Sicherungstechniken für altes Mauerwerk vor und nach dem Verpressen, Arbeitsheft 13, 1995, Seiten 13 – 20, Universität Karlsruhe.
- [43] FITZNER, B., HEINRICHS, K.: Verwitterungszustand und Materialeigenschaften der Kalksteine des Naumburger Doms; Jahresberichte Steinerfall-Steinkonservierung 1990, Seiten 23-38; Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1992.
- [44] FITZNER, B., KALDE, M.: Standarduntersuchungen und Verwitterungssimulation - Methoden zur Bestimmung des Verwitterungsverhaltens von Natursteinen bei Frost-Tau-Wechsel- und Salzbeanspruchung; Jahresberichte Steinerfall-Steinkonservierung 1989, Seiten 147-158; Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1991.
- [45] FRANKE, K; HERRMANN G.: Die Beurteilung der Tragfähigkeit von historischem Mauerwerk; 2. Internationales Kolloquium, September 1986.
- [46] FRANKE, L., DECKELMANN, G., GORETZKY, W.: Einfluß der Streubreiten von Stein- und Mörtelqualität bei der Festigkeitsbestimmung von bestehendem Mauerwerk, insbesondere bei historischen Bauten; Forschungsbericht der TU Hamburg-Harburg, Juni 1993.
- [47] FREY, R.: Kieselsäureester als Bindemittel für Natursteinersatz; Bautenschutz und Bausanierung 8, 1995 , Seiten 32-37
- [48] GORETZKY, L.: Zur Festigung von Naturstein; Stand der Technik und Entwicklungstrends, Teil 1; Bausubstanz 7-8, 1993 Seiten 58-61.
- [49] GORETZKY, L.: Zur Festigung von Naturstein; Stand der Technik und Entwicklungstrends, Teil 2; Bausubstanz 9, 1993 Seiten 52-54.
- [50] GÖRLACHER, R.: Klassifizierung von Brettschichtholzlamellen durch Messung von Longitudinalschwingungen; Dissertation an der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH) 1990.

- [51] GRIMM, W.-D.: Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland, Arbeitshefte der Bayer. Landesamtes für Denkmalpflege 50, München , 1990.
- [52] GUNKLER, E.: Zur nachträglichen Erhöhung der Biegetragfähigkeit von Mauerwerkswänden durch bewehrte Ergänzungsschichten; Dissertation, IBMB TU Braunschweig, 1993.
- [53] HENDRY, A.W.: Structural Masonry, Macmillan Education, LTD., London 1990.
- [54] HERZOG, M.: Tragfähigkeit und Bemessung gemauerter Wände nach Versuchen, Bautechnik, Heft 2, Seiten 94-103, 1998.
- [55] HILSDORF, H. K.; SCHÄFER, J.: Der Mörtel in historischem Mauerwerk; Sonderforschungsbereich 315, Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke; Universität Karlsruhe, Jahrbuch 1989, Seiten 63-71.
- [56] HILSDORF, H.: Untersuchungen über die Grundlagen der Mauerwerksfestigkeit; Bericht Nr. 40, Materialprüfungsamt für das Bauwesen der TH München, 1965.
- [57] HOFFMANN, D.: Beziehung zwischen Porengefüge und Festigkeit verschiedener Baustoffe; 33. Forschungskolloquium des DfStb am 10. und 11. Oktober 1996 in der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, Seiten 21-26.
- [58] HOFFMANN, I., HOFMANN, D.: Zerstörungsarme und -freie Prüfverfahren zur Ermittlung von Gesteinseigenschaften an Mauerziegeln und Naturstein sowie Untersuchungen zur Wirkung und Dauerhaftigkeit verfestigter Bausubstanz. Diplomarbeiten an der Fachhochschule Hannover, Januar 1997.
- [59] HONSINGER, D.: Das 'Aachener Konzept' zur stabilisierenden und schützenden Imprägnierung von Sandstein; Denkmalpflege und Naturwissenschaft im Gespräch, Workshop in Fulda 1990, Seiten 24-29.
- [60] HUSTER, U.: Mechanische Eigenschaften alten Mauerwerks; Seminar des Deutschen Zentrums für Handwerk und Denkmalpflege, Fulda, "Tragwerkplaner in der Denkmalpflege – Sicherung historischer Tragwerke - , 1998.
- [61] KAHLE, M.: Verfahren zur Erkundung des Gefügestandes von Mauerwerk, insbesondere an historischen Bauten; Dissertation, TU Karlsruhe 1994.
- [62] KASTEN, D.: Zur Gestaltsabhängigkeit der Druck- und Spaltzugfestigkeit von Kalk-Sandstein; Mitteilungen aus dem Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der Universität Hannover, Dissertation 1980.
- [63] KHOO, C.L.; HENDRY, A.W.: Ein Buchkriterium für zentrisch belastetes Ziegelmauerwerk; 3. Internationale Mauerwerkskonferenz, Essen 1973.
- [64] KIRTSCHIG, K, MEYER, J.: Kostenreduzierung im Mauerwerksbau durch verbesserte Abstimmung von Stein- und Mörtel Eigenschaften; Abschlußbericht des Forschungsvorhabens; Januar 1989, IRB Verlag, Stuttgart.
- [65] KIRTSCHIG, K. KASTEN, D.: Zur Festlegung von Mauerwerksklassen bei Ingenieurmauerwerk; Mauerwerk-Kalender 1980, Seiten 71 – 92, Berlin: Ernst + Sohn.
- [66] KIRTSCHIG, K., FELDHAUS, P., GALLENKEMPER, B., SCHÖNER, W.: Aufbereitung eines Traglastverfahrens für den Mauerwerksbau. Mitteilungen aus dem Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der Technischen Universität Hannover, Heft 30, 1975.

- [67] KIRTSCHIG, K., HIRSCH, R.: Abschlußbericht des Forschungsvorhabens Einfluß des Verbandes (Läufer-, Binderverband; Einstein-Verbandsmauerwerk) auf die Mauerwerksdruckfestigkeit, IRB Verlag, Stuttgart 1993.
- [68] KIRTSCHIG, K., METJE, W.-R.: Tragverhalten von Mauerwerk und Leichtmörtel, Mauerwerk-Kalender 1981.
- [69] KIRTSCHIG, K., U. MEYER, J.: Zur Tragfähigkeit von mit Leichtmauermörtel hergestelltem Mauerwerk, Mauerwerk-Kalender 1987.
- [70] KNÖFEL, D., SCHUBERT, P.: Zur Beurteilung von Mörtel für die Instandsetzung von Mauerwerk; Jahresberichte Steinzerfall-Steinkonservierung 1990, Seiten 105-121; Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1992.
- [71] KORDINA, K., GUNKLER, E.: Bauliche Maßnahmen zur nachträglichen Ertüchtigung von Mauerwerk aus vorhandener Bausubstanz zur Erhöhung ihrer Biegetragfähigkeit; 1. Forschungsabschnitt, Abschlußbericht, IBMB TU Braunschweig, 1989.
- [72] KÖSSLER, O.: Die zerstörungsfreie Materialprüfung mit mechanischen Schwingungen; Fa. LABEK Labor und Betriebselektronik GmbH, A 6063 RUM, 1997.
- [73] KRUS, M.: Einfluß der Stoffeuchte von Natursandstein auf die Applikation von Schutzmitteln; Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Teil 3, expert-Verlag, Band 420 (1988), Kontakt und Studium, Seiten 1674-1681.
- [74] LEERS, K.-J.: Die zerstörungsfreie Materialprüfung mit mechanischen Schwingungen und ihre Anwendung bei Werkstoffen der Steine und Erden-Industrie; Habilitationsschrift, Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen der TU Clausthal, 1969.
- [75] LEONHARDT, H., LUKAS, R., KIESSL, K.: Handgeräte zur vereinfachten vor-Ort-Bestimmung bauphysikalischer Kennwerte von Gesteinsoberflächen; Jahresberichte Steinzerfall-Steinkonservierung 1989, Seiten 243-254; Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1991.
- [76] MANN, W., TONN, V.: Das Tragverhalten von zweiachsig gespannten gemauerten Wänden unter gleichzeitig wirkender horizontaler und vertikaler Belastung; Mauerwerk-Kalender 1989, Seiten 489-497.
- [77] MANN, W.: Druckfestigkeit von Mauerwerk; Eine statistische Auswertung von Versuchsergebnissen in geschlossener Darstellung mit Hilfe von Potenzfunktionen; Mauerwerk-Kalender 1983, Seiten 687-699.
- [78] MANN, W.: Zum Tragverhalten von Mauerwerk aus Natursteinen; Mauerwerk-Kalender 1983, Seiten 675-685.
- [79] MAUS, H.: Injiziertes und bewehrtes altes Mauerwerk; Untersuchungen zur Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit der Instandsetzungsmaßnahmen; Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 1995.
- [80] MAYDL, P.: Eine kritische Betrachtung zur Anwendung der Flat-Jack-Methode auf Ziegelmauerwerk; Proceedings of the 9th International Brick/Block Masonry Conference, Berlin, 13-16 October 1991, Seiten 645-652, DGfM.
- [81] MAYDL, P.: Zerstörungsarmes Verfahren zur Prüfung von Mauerwerk - Zur Anwendung der Flat-Jack-Methode auf Ziegelmauerwerk; Schlußbericht zum Forschungsvorhaben F 1185 des Bundesministeriums für wirtschaftliche Angelegenheiten, 1990.
- [82] MEINHEIT, J.: Bohrwiderstandsmessung als zerstörungsarmes Prüfverfahren. Diplomarbeit an der Fachhochschule Hannover, Juni 1997.

- [83] MENG, B., ALFES, CH., SCHIESSL, P.: Anisotropie der Mikrostruktur und ihre Bedeutung für feuchtetechnische und mechanische Eigenschaften; Jahresberichte Steinzerfall-Steinkonservierung 1991, Seiten 35-44; Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1993.
- [84] MENG, B., SCHIESSL, P.: Wechselseitige Beziehungen zwischen Parametern des Porenraumes und des Feuchtetransportes bei Sandstein; Jahresberichte Steinzerfall-Steinkonservierung 1990, Seiten 227-236; Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1992.
- [85] MENG, B.: Charakterisierung der Porenstruktur im Hinblick auf die Interpretation von Feuchtetransportvorgängen; Dissertation, RWTH Aachen, 1993.
- [86] METJE, W.-R.: Zum Einfluss des Feuchtigkeitszustandes der Steine bei der Verarbeitung auf das Trag- und Verformungsverhalten von Mauerwerk, Dissertation, TU Hannover 1983.
- [87] METJE, W.-R.: Zur Feststellung der Tragfähigkeit von ausgeführtem Mauerwerk, Untersuchungsmethoden, Beurteilungen; Bautenschutz und Bausanierung, 11. Jahrgang (1988), Seiten [18]-[21].
- [88] MEYER, J.: Einfluß der Güte der Ausführung auf die Druckfestigkeit von Mauerwerk; Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung, Universität Hannover, Heft 59; März 1990.
- [89] MIDDENDORF, B., KNÖFEL, D.: Chemisch-Mineralogische Mörteluntersuchungen an historischen Ziegelgebäuden in Norddeutschland; Proceedings of the 9th International Brick/Block Masonry Conference, Berlin, 13-16 October 1991, Seiten 1420-1427, DGfM.
- [90] MÜLLER-ROCHHOLZ, J.: Eigenschaften Münsterländer Sandsteine mit und ohne Kieselsäureester (KSE)-Behandlung; Bautenschutz und Bausanierung 11 (1988), Seiten [109]-[112].
- [91] NODOUSHANI, M.: Sanierung historischer Bauwerke aus Naturstein, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, 1992.
- [92] PESCHEL, A.: Natursteine; VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1977.
- [93] PIEPER, K.: Sicherung historischer Bauten; Verlag Ernst & Sohn, Berlin, München, 1983.
- [94] POHL, E.: Prüfung von Beton mit Ultraschall; Deutsche Bauinformatik, Berlin 1966.
- [95] PÖSCHEL, G., SABHA, A.: Ein theoretisches Modell zum Tragverhalten von Elbsandsteinmauerwerk; Sonderforschungsbereich 315, Universität Karlsruhe, Jahrbuch 1993.
- [96] PROBST, P.: Ein Beitrag zum Bruchmechanismus von zentrisch gedrücktem Mauerwerk; Dissertation, TU München 1981.
- [97] REINSCH, D.: Natursteinkunde; Ferdinand Enke Verlag Stuttgart 1991.
- [98] RILEM TC24-BW: BW1, General recommendations for methods of testing load-bearing walls; 1980.
- [99] RUSTMEIER, H.: Untersuchungen über Einflüsse auf die Drucktragfähigkeit von Bruchsteinmauerwerk; Dissertation, TU Darmstadt 1982.
- [100] RUSTMEIER, H.: Versuche zur Drucktragfähigkeit von Bruchsteinmauerwerk; Mauerwerk-Kalender 1985, Seiten 727-733.

- [101] SATTLER, L., KLEMM, D.D., SNETHLAGE, R.: Wirksamkeitskontrolle und Wirksamkeitsprognose bei Sandsteinfestigungen; Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Teil 3, expert-Verlag, Band 420, Kontakt und Studium, Seiten 1693-1709, 1988.
- [102] SATTLER, L.: Untersuchungen zu Wirkung und Dauerhaftigkeit von Sandsteinfestigungen mit Kieselsäureester; Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität München, 1992.
- [103] SCHELLBACH, G.: Eigenschaften und Prüfung der Baustoffe für ingenieurmäßig bemessene Mauerwerksbauten; Mauerwerk-Kalender 1981, Seiten 47-65.
- [104] SCHELLBACH, G.: Einfluß des Formates auf die Festigkeit des Ziegels und die Tragfähigkeit der Wand (Formfaktor). Die Ziegelindustrie International, April 1979, Seiten 233 – 242.
- [105] SCHIESSL, P., MENG, B.: Methoden zur Ermittlung physikalischer Gesteinseigenschaftsprofile aus Probekörpern geringstmöglicher Menge und Größe; Sonderausgabe Bautenschutz und Bausanierung 1989, Seiten 46-50.
- [106] SCHÖN, J.: Petrophysik, Physikalische Eigenschaften von Gesteinen und Mineralen; Ferdinand Enke Verlag Stuttgart 1983.
- [107] SCHUBERT, P., GLITZA, H.: Festigkeits- und Verformungskennwerte von Mauersteinen und Mauermörtel; Die Bautechnik 10/1979, S. 332.
- [108] SCHUBERT, P., KNÖFEL, D.: Zur Beurteilung von Mörteln für historische Bauwerke; Proceedings of the 9th International Brick/Block Masonry Conference, Berlin, 13-16 October 1991, Seiten 1412-1419, DGfM.
- [109] SCHUBERT, P.: Eigenschaftswerte von Mauerwerk, Mauersteinen und Mauermörtel; Mauerwerk-Kalender 1995, Seiten 131 – 144.
- [110] SCHUBERT, P.: E-Moduln von Mauerwerk in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit des Mauerwerks, der Mauersteine und des Mauermörtels; Mauerwerk-Kalender 1985, Seiten 705-717
- [111] SCHUH, H.: Physikalische Eigenschaften von Sandsteinen und ihren verwitterten Oberflächen; Münchner geowissenschaftliche Abhandlungen, Reihe B, Verlag Friedrich Pfeil, 1987.
- [112] STIGLAT, K.: Zur Tragfähigkeit von Mauerwerk aus Sandstein; Bautechnik 2/1984, Seiten 51-59 und Bautechnik 3/1984, Seiten 94-100.
- [113] STRAUB, H.: Die Geschichte der Bauingenieurkunst, 4. Auflage, Birkhäuser-Verlag, Basel, 1992.
- [114] VOGLER, H.: Kugeldruck- und Kugelschlagversuche an Straßenbaugesteinen; Die Naturstein-Industrie, 5/1971.
- [115] VOLKWEIN, A.: Zerstörungsfreie Prüfung von Naturwerkstein durch Ultraschall-Schwächungsmessungen; Materialprüfung, Band 24 (1982), Nr. 4 Seiten 119-124.
- [116] WARNECKE, P.: Tragverhalten und Konsolidierung von historischem Natursteinmauerwerk, Dissertation, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1995.
- [117] WEBER, H., HÖHL, H.: Verfahren zur Bestimmung der Eindringtiefe von Steinfestigungsmitteln auf der Basis von Kieselsäureester-Verbindungen; Bautenschutz und Bausanierung 11 (1988), Seiten [200]-[204].

- [118] WEBER, H.: Steinzerfall und Steinkonservierung in Deutschland; Teil 1: Ursachen der Natursteinzerstörung; Bausubstanz 5/86, Seiten 84-88.
- [119] WEIMANN, W, WITTMANN, F. H.: Zerstörungsfreie Bestimmung der Festigkeit von tragenden Bauteilen aus Naturstein; Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen, 1. Jahrgang, Heft 4, 1995, Seiten 281-294.
- [120] WENDLER, E. SATTLER, L.: Bohrwiderstandmessung als zerstörungsarmes Prüfverfahren, Esslinger Tagung im Januar 1997.
- [121] WENZEL, F., BERGER, F., KAHLE, M.: Zerstörungsarme Verfahren zur Untersuchung von historischem Mauerwerk. Teilprojekt im BMFT-Forschungsvorhaben Standsicherheitssanierung; Denkmalpflege und Naturwissenschaft im Gespräch, Workshop in Fulda 1990, Seiten 150-154.
- [122] WENZEL, F., MAUS, H.: Nachuntersuchungen an ingenieurmäßig sanierten Mauerwerksbauten; Sonderforschungsbereich 315, Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke; Universität Karlsruhe, Jahrbuch 1986, Seiten 211-221.
- [123] WESCHE, K.: Möglichkeiten für die Anwendung von Ultraschall in der Betonprüfung; Die Bautechnik 5/1955, S. 159.
- [124] WIHR, R.: Restaurierung von Steindenkmälern; Verlag D. W. Callway, München, 2. überarbeitete Auflage 1986.
- [125] WITTMANN, F.H.: Structure of Concrete with Respect to Crack Formation; Fracture Mechanics of Concrete, (Wittmann, F.H. (Ed.)), Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, S. 43 – 74, 1983.

9 Anhänge

Anhang 3.1:	Biegezug- und Druckfestigkeiten bei unterschiedlichen Mischungsverhältnissen bei Mörteln	133
Anhang 3.2:	Versuchsergebnisse zum Mischungsverhältnis Wasser : Steinfestiger "T"	134 - 136
Anhang 4.1:	Druckfestigkeiten an Würfeln bei Sandsteinen	137
Anhang 4.2:	Dynamischer E-Modul ermittelt aus Resonanzfrequenz bei Sandsteinen und Mörteln	138 - 139
Anhang 4.3:	Elastische Querdehnzahl μ ermittelt aus Resonanzfrequenz bei Sandsteinen bzw. Mörteln	140 - 141
Anhang 4.4:	Versuchsergebnisse der Druckfestigkeits- und Verformungsprüfungen bei RILEM-Körpern aus Ziegeln bzw. Sandsteinen	142 - 148
Anhang 4.5:	Spannungs-Dehnungs-Linien der RILEM-Körper aus Ziegeln bzw. Sandsteinen	149 - 161
Anhang 5.1:	Ermittlung der Regressionskoeffizienten der im Versuch ermittelten Spannungs-Dehnungs-Linien der RILEM-Körper aus Ziegeln bzw. Sandsteinen	162 - 168

Biegezug- und Druckfestigkeiten bei unterschiedlichen Mischungsverhältnissen von Mörteln

Nr.	Abmessungen			Masse luft-trocken	Rohdichte	Resonanz-frequenz		Ultraschall-laufzeit	Geschwin-digkeit	Biegezug-festigkeit		Druck-festigkeit		dyn. E-Modul (U-Schall)	dyn. E-Modul (Re-sonanz.)
						longit.	tor-sional			F _f	β _{bz}	F _c	β _D		
-	mm	mm	mm	g	g/cm ³	kHz	kHz	μs	km/s	kN	N/mm ²	kN	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Mörtelmischung Weißkalkhydrat : Sand = 2 : 6															
2	40	40	160	432	1,69	1,4	2	136	1,18	0,1	0,3	0,5	0,2	2.336	1.792
3	40	40	160	435	1,70	1,31	2,1	145	1,10	0,1	0,2	0,5	0,2	2.069	1.500
4	40	40	160	430	1,68	1,34	1,9	140	1,14	0,1	0,2	0,5	0,2	2.194	1.640
Mittelwert				1,69				1,14		0,1	0,2	0,5	0,2	2.199	1.644
Standardabweichung				0,01				0,03		0,0	0,0	0,0	0,0	109	119
Variationskoeffizient [%]				0,48				2,62		3,8	3,8	0,0	0,0	4,95	7,25
Mörtelmischung Weißkalkhydrat : Sand = 2 : 5															
10	40	40	160	440	1,72	1,51	2,03	126	1,27	0,1	0,4	1,0	0,4	2.771	2.196
11	40	40	160	435	1,70	1,54	2,05	127	1,26	0,1	0,3	1,0	0,4	2.697	2.272
12	40	40	160	441	1,72	1,45	2,01	124	1,29	0,1	0,3	1,0	0,4	2.868	1.994
Mittelwert				1,71				1,27		0,1	0,3	1,0	0,4	2.779	2.154
Standardabweichung				0,01				0,01		0,0	0,0	0,0	0,0	70	117
Variationskoeffizient [%]				0,60				1,00		9,1	9,1	0,0	0,0	2,52	5,45
Mörtelmischung Weißkalkhydrat : Sand = 2 : 4															
16	40	40	160	442	1,73	1,6	2,1	121	1,32	0,2	0,4	1,5	0,6	3.019	2.514
17	40	40	160	444	1,73	1,58	2,08	122	1,31	0,2	0,5	1,0	0,4	2.983	2.458
18	40	40	160	438	1,71	1,6	2,1	121	1,32	0,2	0,5	1,4	0,6	2.992	2.491
Mittelwert				1,72				1,32		0,2	0,5	1,3	0,5	2.998	2.488
Standardabweichung				0,01				0,01		0,0	0,0	0,2	0,1	15	23
Variationskoeffizient [%]				0,57				0,39		1,7	1,7	13,5	13,5	0,51	0,92
Mörtelmischung Weißkalkhydrat : Zement : Sand = 2 : 0,5 : 8															
1	40	40	160	445	1,74	1,49	2,15	126	1,27	0,1	0,3	2,9	1,2	2.803	2.080
2	40	40	160	444	1,73	1,47	2,17	123	1,30	0,1	0,3	2,7	1,1	2.935	1.997
3	40	40	160	446	1,74	1,47	2,14	124	1,29	0,1	0,3	2,8	1,1	2.901	2.020
Mittelwert				1,74				1,29		0,1	0,3	2,8	1,1	2.879	2.032
Standardabweichung				0,00				0,01		0,0	0,0	0,1	0,0	56	35
Variationskoeffizient [%]				0,18				1,00		4,2	4,2	3,2	3,2	1,94	1,72

Versuchsergebnisse zum Mischungsverhältnis Wasser : Steinfestiger "T"

gefestigt mit T (Mischungsverhältnis = Wasser : Festiger T)								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Nr. (Mischungsverhältnis)	Masse lufttrocken	Masse nach 1. Festigung	ΔM (3-2)	Aufnahme Festiger (4/2*100)	Masse nach Aushärtung	ΔM (6-2)	Gelabscheidung (7/2*100)	hinzugewachsener Feststoffanteil im Verhältnis zur aufgenommenen Menge (7/4*100)
-	g	g	g	%	g	g	%	%
Fabrikneue Ziegel								
10 (1:1)	2987,0	3168,0	181,0	6,06	3012,0	25,0	0,84	13,81
11 (1:1)	2953,0	3115,0	162,0	5,49	2975,5	22,5	0,76	13,89
12 (1:1)	3024,0	3256,0	232,0	7,67	3056,4	32,4	1,07	13,97
i.M.				6,41			0,89	13,89
15 (2:1)	3016,0	3227,0	211,0	7,00	3031,8	15,8	0,52	7,49
16 (2:1)	3056,0	3220,0	164,0	5,37	3069,2	13,2	0,43	8,05
20 (2:1)	3041,0	3245,0	204,0	6,71	3055,9	14,9	0,49	7,30
i.M.				6,36			0,48	7,61
17 (3:1)	3033,0	3256,0	223,0	7,35	3041,1	8,1	0,27	3,63
18 (3:1)	2993,0	3177,0	184,0	6,15	2998,6	5,6	0,19	3,04
19 (3:1)	3018,0	3216,0	198,0	6,56	3025,1	7,1	0,24	3,59
i.M.				6,69			0,23	3,42
13 (4:1)	3020,0	3273,0	253,0	8,38	3024,9	4,9	0,16	1,94
14 (4:1)	2996,0	3165,0	169,0	5,64	2998,1	2,1	0,07	1,24
21 (4:1)	3018,0	3253,0	235,0	7,79	3022,1	4,1	0,14	1,74
i.M.				7,27			0,12	1,64
Historische Ziegel								
4 (1:1)	3418,0	3718,0	300,0	8,78	3442,1	24,1	0,71	8,03
5 (1:1)	3359,0	3639,0	280,0	8,34	3379,5	20,5	0,61	7,32
6 (1:1)	3613,0	3864,0	251,0	6,95	3631,0	18,0	0,50	7,17
i.M.				8,02			0,60	7,51
2 (2:1)	3658,0	3994,0	336,0	9,19	3678,6	20,6	0,56	6,13
7 (2:1)	3502,0	3817,0	315,0	8,99	3521,1	19,1	0,55	6,06
8 (2:1)	3598,0	3893,0	295,0	8,20	3616,1	18,1	0,50	6,14
i.M.				8,79			0,54	6,11
1 (3:1)	3576,0	3801,0	225,0	6,29	3585,4	9,4	0,26	4,18
9 (3:1)	3489,0	3786,0	297,0	8,51	3500,2	11,2	0,32	3,77
10 (3:1)	3605,0	3954,0	349,0	9,68	3614,9	9,9	0,27	2,84
i.M.				8,16			0,29	3,60
3 (4:1)	3294,0	3587,0	293,0	8,89	3294,7	0,7	0,02	0,24
11 (4:1)	3420,0	3698,0	278,0	8,13	3421,2	1,2	0,04	0,43
12 (4:1)	3542,0	3828,0	286,0	8,07	3543,8	1,8	0,05	0,63
i.M.				8,37			0,04	0,43

Versuchsergebnisse zum Mischungsverhältnis Wasser : Steinfestiger "T"

gefestigt mit T (Mischungsverhältnis = Wasser : Festiger T)								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Nr. (Mischungsverhältnis)	Masse lufttrocken	Masse nach 1. Festigung	ΔM (3-2)	Aufnahme Festiger (4/2*100)	Masse nach Aushärtung	ΔM (6-2)	Gelabscheidung (7/2*100)	hinzugewachsener Feststoffanteil im Verhältnis zur aufgenommenen Menge (7/4*100)
-	g	g	g	%	g	g	%	%
Oberkirchener Sandstein								
11 (1:1)	544,0	561,0	17,0	3,13	548,0	4,0	0,74	23,53
4 (1:1)	537,0	554,0	17,0	3,17	541,0	4,0	0,74	23,53
1 (1:1)	541,0	557,0	16,0	2,96	544,0	3,0	0,55	18,75
i.M.				3,08			0,68	21,94
12 (2:1)	552,0	567,0	15,0	2,72	553,0	1,0	0,18	6,67
16 (2:1)	550,0	566,0	16,0	2,91	552,0	2,0	0,36	12,50
17 (2:1)	548,0	564,0	16,0	2,92	549,0	1,0	0,18	6,25
i.M.				2,85			0,24	8,47
5 (3:1)	550,0	573,0	23,0	4,18	551,0	1,0	0,18	4,35
13 (3:1)	547,0	570,0	23,0	4,20	548,0	1,0	0,18	4,35
14 (3:1)	539,0	561,0	22,0	4,08	541,0	2,0	0,37	9,09
i.M.				4,16			0,25	5,93
19 (4:1)	547,0	571,0	24,0	4,39	547,0	0,0	0,00	0,00
6 (4:1)	543,0	567,0	24,0	4,42	544,0	1,0	0,18	4,17
20 (4:1)	549,0	571,0	22,0	4,01	549,0	0,0	0,00	0,00
i.M.				4,27			0,06	1,39
Roter Wesersandstein								
1 (1:1)	623,0	632,0	9,0	1,44	625,0	2,0	0,32	22,22
2 (1:1)	607,0	616,0	9,0	1,48	608,0	1,0	0,16	11,11
3 (1:1)	609,0	619,0	10,0	1,64	611,0	2,0	0,33	20,00
i.M.				1,52			0,27	17,78
4 (2:1)	624,0	632,0	8,0	1,28	625,0	1,0	0,16	12,50
5 (2:1)	616,0	625,0	9,0	1,46	617,0	1,0	0,16	11,11
6 (2:1)	612,0	621,0	9,0	1,47	614,0	2,0	0,33	22,22
i.M.				1,40			0,22	15,28
7 (3:1)	600,0	614,0	14,0	2,33	601,0	1,0	0,17	7,14
8 (3:1)	588,0	602,0	14,0	2,38	588,0	0,0	0,00	0,00
9 (3:1)	610,0	625,0	15,0	2,46	611,0	1,0	0,16	6,67
i.M.				2,39			0,11	4,60
10 (4:1)	623,0	638,0	15,0	2,41	623,0	0,0	0,00	0,00
11 (4:1)	599,0	613,0	14,0	2,34	599,0	0,0	0,00	0,00
12 (4:1)	619,0	634,0	15,0	2,42	620,0	1,0	0,16	6,67
i.M.				2,39			0,05	2,22

Versuchsergebnisse zum Mischungsverhältnis Wasser : Steinfestiger "T"

gefestigt mit T (Mischungsverhältnis = Wasser : Festiger T)								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Nr. (Mischungsverhältnis)	Masse lufttrocken	Masse nach 1. Festigung	ΔM (3-2)	Aufnahme Festiger (4/2*100)	Masse nach Aushärtung	ΔM (6-2)	Gelabscheidung (7/2*100)	hinzugewachsener Feststoffanteil im Verhältnis zur aufgenommenen Menge (7/4*100)
-	g	g	g	%	g	g	%	%
Rüthener Grünsandstein								
1 (1:1)	555,0	592,0	37,0	6,67	563,0	8,0	1,44	21,62
2 (1:1)	551,0	587,0	36,0	6,53	560,0	9,0	1,63	25,00
3 (1:1)	550,0	586,0	36,0	6,55	559,0	9,0	1,64	25,00
i.M.				6,58			1,57	23,87
4 (2:1)	559,0	599,0	40,0	7,16	562,0	3,0	0,54	7,50
5 (2:1)	551,0	592,0	41,0	7,44	555,0	4,0	0,73	9,76
6 (2:1)	554,0	594,0	40,0	7,22	558,0	4,0	0,72	10,00
i.M.				7,27			0,66	9,09
7 (3:1)	561,0	599,0	38,0	6,77	562,0	1,0	0,18	2,63
8 (3:1)	559,0	598,0	39,0	6,98	560,0	1,0	0,18	2,56
9 (3:1)	553,0	592,0	39,0	7,05	554,0	1,0	0,18	2,56
i.M.				6,93			0,18	2,59
10 (4:1)	558,0	594,0	36,0	6,45	558,0	0,0	0,00	0,00
11 (4:1)	556,0	595,0	39,0	7,01	557,0	1,0	0,18	2,56
12 (4:1)	555,0	594,0	39,0	7,03	555,0	0,0	0,00	0,00
i.M.				6,83			0,06	0,85
Mörtel								
1 (1:1)	449,0	508,0	59,0	13,14	456,0	7,0	1,56	11,86
2 (1:1)	442,0	502,0	60,0	13,57	450,0	8,0	1,81	13,33
3 (1:1)	451,0	508,0	57,0	12,64	457,0	6,0	1,33	10,53
i.M.				13,12			1,57	11,91
4 (2:1)	454,0	514,0	60,0	13,22	460,0	6,0	1,32	10,00
5 (2:1)	450,0	512,0	62,0	13,78	455,0	5,0	1,11	8,06
6 (2:1)	452,0	517,0	65,0	14,38	458,0	6,0	1,33	9,23
i.M.				13,79			1,25	9,10
7 (3:1)	457,0	523,0	66,0	14,44	458,0	1,0	0,22	1,52
8 (3:1)	449,0	519,0	70,0	15,59	452,0	3,0	0,67	4,29
9 (3:1)	451,0	522,0	71,0	15,74	455,0	4,0	0,89	5,63
i.M.				15,26			0,59	3,81
10 (4:1)	445,0	515,0	70,0	15,73	446,0	1,0	0,22	1,43
11 (4:1)	452,0	520,0	68,0	15,04	454,0	2,0	0,44	2,94
12 (4:1)	458,0	528,0	70,0	15,28	459,0	1,0	0,22	1,43
i.M.				15,35			0,30	1,93

Druckfestigkeiten an Würfeln bei Sandsteinen

Roter Wesersandstein ungefestigt (Würfel 5x5x5 cm ³)						Obernkirchener Sandstein ungefestigt (Würfel 5x5x5 cm ³)					
Nr.	Abmessungen			Druckfestigkeit		Nr.	Abmessungen			Druckfestigkeit	
	b	h	l	F _c	β _D		b	h	l	F _c	β _D
	mm	mm	mm	kN	N/mm ²		mm	mm	mm	kN	N/mm ²
quer I 61	50,0	50,0	50,0	215,0	86,0	quer V 1	50,0	50,0	50,0	250,0	100,0
I 62	50,0	50,0	50,0	214,0	85,6	V 2	50,0	50,0	50,0	240,0	96,0
I 63	50,0	50,0	50,0	214,0	85,6	V 3	49,5	50,0	50,0	220,0	88,0
I 64	50,0	50,0	50,0	212,0	84,8	V 4	49,5	49,5	50,5	230,0	92,0
I 65	50,0	50,0	50,0	213,0	85,2	V 5	50,0	49,5	50,0	240,0	96,0
Mittelwert				213,6	85,4	Mittelwert				236,0	94,4
Standardabweichung				1,0	0,4	Standardabweichung				10,2	4,1
Variationskoeffizient [%]				0,48	0,48	Variationskoeffizient [%]				4,32	4,32
längs I 66	50,0	50,0	50,0	198,0	79,2	längs VI 1	49,5	49,5	50,0	210,0	84,0
I 67	50,0	50,0	50,0	200,0	80,0	VI 2	50,0	49,5	50,0	230,0	92,0
I 68	50,0	50,0	50,0	205,0	82,0	VI 3	49,5	49,5	50,0	240,0	96,0
I 69	50,0	50,0	50,0	203,0	81,2	VI 4	50,0	50,0	50,0	260,0	104,0
I 70	50,0	50,0	50,0	199,0	79,6	VI 5	50,0	50,0	50,0	210,0	84,0
Mittelwert				201,0	80,4	Mittelwert				230,0	92,0
Standardabweichung				2,6	1,0	Standardabweichung				19,0	7,6
Variationskoeffizient [%]				1,30	1,30	Variationskoeffizient [%]				8,25	8,25
Rüthener Grünsandstein ungefestigt (Würfel 5x5x5 cm ³)											
Nr.	Abmessungen			Druckfestigkeit							
	b	h	l	F _c	β _D						
	mm	mm	mm	kN	N/mm ²						
quer C13	51,0	51,0	51,0	92,0	36,8						
C14	50,0	51,0	51,0	94,0	37,6						
C25	51,0	51,0	51,5	86,0	34,4						
C26	51,0	51,0	51,0	98,0	39,2						
C27	51,0	51,5	51,5	95,0	38,0						
Mittelwert				93,0	37,2						
Standardabweichung				4,0	1,6						
Variationskoeffizient [%]				4,30	4,30						
längs C28	49,5	49,5	50,0	85,0	34,0						
C29	50,0	49,5	50,0	89,0	35,6						
C30	49,5	49,5	50,0	82,0	32,8						
C31	50,0	50,0	50,0	84,0	33,6						
C32	50,0	50,0	50,0	87,0	34,8						
Mittelwert				85,4	34,2						
Standardabweichung				2,4	1,0						
Variationskoeffizient [%]				2,83	2,83						

längs = längs zur Schichtung
quer = quer zur Schichtung

Dynamischer E-Modul ermittelt aus Resonanzfrequenz bei Sandsteinen und Mörteln

Material	Anzahl der Proben	dynamischer E-Modul ermittelt aus Resonanzfrequenzmessungen									
		längs zur Schichtung					quer zur Schichtung				
Art der Festigung	n	Extremwerte		Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient	Extremwerte		Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient
		min	max	\bar{x}	s	V	min	max	\bar{x}	s	V
-	-	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Oberkirchener Sandstein											
ungefestigt	10	16.300	18.600	17.500	728	4,15	17.700	19.500	18.300	574	3,14
1-fach S	7	33.800	37.700	35.600	1.125	3,16	35.900	37.400	36.400	479	1,32
2-fach S	7	37.000	38.700	37.500	535	1,42	37.000	38.500	37.900	474	1,25
3-fach S	5	40.900	42.100	41.300	825	2,00	37.900	38.600	38.200	500	1,23
1-fach T	7	26.700	29.100	27.800	902	3,25	25.900	30.800	28.500	1.654	5,81
2-fach T	7	31.800	33.200	32.500	536	1,65	29.300	32.000	30.500	837	2,74
3-fach T	5	34.500	34.800	34.500	320	1,70	32.800	32.800	32.800	0	0,00
Roter Wesersandstein											
ungefestigt	10	16.700	21.000	18.800	1.213	6,47	12.600	14.200	13.600	691	5,08
1-fach S	7	31.000	33.800	32.500	888	2,73	23.000	24.300	23.600	479	2,03
2-fach S	7	35.500	40.900	38.200	2.058	5,39	23.400	27.800	25.800	1.413	4,49
3-fach S	5	37.400	39.000	38.100	873	2,29	26.000	26.500	26.100	354	0,89
1-fach T	7	19.800	24.300	23.300	1.500	6,46	16.500	18.300	17.300	588	3,40
2-fach T	7	25.900	28.100	27.000	767	2,83	18.200	21.700	20.400	1.170	5,75
3-fach T	5	29.300	29.600	29.400	154	0,40	21.200	22.200	21.600	545	2,52
Rüthener Grünsandstein											
ungefestigt	10	10.700	14.200	12.300	1.121	9,14	11.000	14.500	12.900	947	7,33
1-fach S	7	23.400	24.900	24.000	558	2,32	24.400	26.100	25.400	508	2,00
2-fach S	7	24.700	27.500	26.100	875	3,35	20.300	26.200	24.300	1.809	7,45
3-fach S	5	26.000	29.500	27.900	1.670	5,99	24.700	25.900	25.300	490	2,02
1-fach T	7	14.800	16.900	15.600	904	5,80	12.800	17.400	15.200	1.362	8,98
2-fach T	7	18.500	22.900	19.900	1.464	7,36	20.200	22.000	21.100	572	2,71
3-fach T	5	19.900	21.000	20.400	543	2,91	20.400	21.000	20.800	340	1,78

Dynamischer E-Modul ermittelt aus Resonanzfrequenz bei Sandsteinen und Mörteln

Material	Anzahl der Proben	dynamischer E-Modul ermittelt aus Resonanzfrequenzmessungen				
		Extremwerte		Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient
Art der Festigung	n	min	max	\bar{X}	s	V
-	-	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%
1	2	3	4	5	6	7
Mörtel						
ungefestigt	130	804	3.300	2.100	556	26,98
1-fach S	39	2.100	5.000	4.100	1.039	25,60
2-fach S	24	5.000	9.900	6.800	1.428	20,82
3-fach S	9	8.000	8.600	8.400	213	2,55
1-fach T	39	2.400	4.400	3.000	537	17,90
2-fach T	24	2.500	3.900	3.300	458	14,05
3-fach T	9	3.200	3.400	3.300	98	3,00

Elastische Querdehnzahl μ ermittelt aus Resonanzfrequenz bei Sandsteinen und Mörteln

Material	Anzahl der Proben	Elastische Querdehnzahl $\mu = (E/2G) - 1$									
		längs zur Schichtung					quer zur Schichtung				
Art der Festigung	n	Extremwerte		Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient	Extremwerte		Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient
		min	max	\bar{x}	s	V	min	max	\bar{x}	s	V
-	-	-	-	-	-	%	-	-	-	-	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Obernkirchener Sandstein											
ungefestigt	10	0,01	0,08	0,05	0,02	39,00	0,03	0,11	0,08	0,02	27,13
1-fach S	7	0,08	0,18	0,12	0,03	21,57	0,09	0,13	0,11	0,01	9,88
2-fach S	7	0,09	0,14	0,12	0,02	14,75	0,09	0,15	0,13	0,02	17,25
3-fach S	5	0,09	0,14	0,11	0,02	21,66	0,05	0,17	0,09	0,04	38,51
1-fach T	7	0,07	0,13	0,10	0,02	20,94	0,11	0,18	0,14	0,02	14,86
2-fach T	7	0,08	0,17	0,13	0,02	18,63	0,10	0,15	0,12	0,01	11,29
3-fach T	5	0,10	0,17	0,14	0,02	15,75	0,05	0,11	0,08	0,02	30,42
Roter Wesersandstein											
ungefestigt											
1-fach S											
2-fach S											
3-fach S		Nicht zu ermitteln aufgrund ausgeprägter Anisotropie									
1-fach T											
2-fach T											
3-fach T											
Rüthener Grünsandstein											
ungefestigt	10	0,04	0,12	0,08	0,02	25,95	0,02	0,07	0,04	0,01	35,36
1-fach S	7	0,05	0,15	0,12	0,02	19,66	0,06	0,17	0,14	0,03	18,89
2-fach S	7	0,09	0,17	0,12	0,03	20,46	0,07	0,13	0,11	0,02	16,27
3-fach S	5	0,07	0,15	0,10	0,03	28,39	0,09	0,17	0,12	0,03	22,56
1-fach T	7	0,04	0,18	0,11	0,05	42,14	0,03	0,14	0,08	0,03	35,54
2-fach T	7	0,06	0,19	0,12	0,04	34,02	0,09	0,15	0,11	0,02	21,97
3-fach T	5	0,05	0,16	0,11	0,04	34,88	0,05	0,14	0,10	0,03	26,46

Elastische Querdehnzahl μ ermittelt aus Resonanzfrequenz bei Sandsteinen und Mörteln

Material	Anzahl der Proben	Elastische Querdehnzahl $\mu = (E/2G) - 1$				
		Extremwerte		Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient
	n	min	max	\bar{x}	s	V
-	-	-	-	-	-	%
1	2	3	4	5	6	7
Mörtel						
ungefestigt	130	0,04	0,27	0,11	0,06	54,78
1-fach S	39	0,01	0,16	0,07	0,04	65,54
2-fach S	24	0,03	0,16	0,08	0,05	61,98
3-fach S	9	0,02	0,08	0,07	0,01	20,20
1-fach T	39	0,02	0,22	0,10	0,07	64,76
2-fach T	24	0,01	0,21	0,10	0,07	76,38
3-fach T	9	0,07	0,14	0,09	0,02	25,21

RILEM-Körper aus fabrikneuen Ziegeln ungefestigt											Mauerwerksfestigkeit nach		
	Datum	Nr.	Art	Mauerwerk					Mörtel	EC 6 f'k	DIN 18554 T1 $\beta'_{D,mw}$	mit Formfaktor f $\beta'_{D,mw} * 0,85$	
				F _{Riß}	F _{max}	$\beta_{Riß}$	$\beta_{D,mw}$	$\beta_{Riß}/\beta_{D,mw}$					E-Modul
	-	-	-	kN		N/mm ²		-	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14 = 13 * 0,85
1	22. Okt	IV	ungef.	470	481	8,8	9,0	0,98	9.100	2,10	7,5	7,8	6,6
2	22. Okt	V	ungef.	380	394	7,0	7,3	0,96	7.700	2,10	6,1	6,3	5,3
3	22. Okt	VI	ungef.	430	491	8,1	9,2	0,88	8.800	2,10	7,6	7,9	6,7
4	16. Okt	I	ungef.	470	476	8,5	8,6	0,99	9.600	1,69	7,6	7,8	6,6
5	16. Okt	II	ungef.	430	443	7,8	8,0	0,97	6.800	1,69	7,0	7,2	6,1
6	16. Okt	III	ungef.	450	464	8,2	8,4	0,97	8.300	1,69	7,4	7,6	6,4
7	09. Sep	I	ungef.	390	401	7,3	7,5	0,97	6.000	1,33	7,0	7,1	6,0
8	09. Sep	II	ungef.	310	357	5,8	6,6	0,87	5.300	1,33	6,2	6,3	5,3
9	09. Sep	III	ungef.	390	396	6,7	6,8	0,98	4.500	1,33	6,4	6,4	5,5
10	28. Aug	I	ungef.	435	452	8,2	8,6	0,96	5.400	1,35	7,9	8,1	6,9
11	28. Aug	IV	ungef.	385	390	7,5	7,6	0,99	5.900	1,35	7,0	7,1	6,0
12	28. Aug	VI	ungef.	395	406	7,3	7,5	0,97	5.500	1,35	7,0	7,1	6,0
13	12. Jun	I	ungef.	280	286	5,0	5,1	0,98	3.400	1,36	4,7	4,8	4,1
14	12. Jun	II	ungef.	250	271	4,3	4,7	0,92	4.500	1,36	4,4	4,4	3,8
15	12. Jun	III	ungef.	320	354	5,7	6,3	0,90	5.800	1,36	5,8	5,9	5,0
16	05. Jun	I	ungef.	268	271	4,7	4,8	0,99	3.300	0,84	5,0	4,9	4,2
17	05. Jun	III	ungef.	240	269	4,2	4,7	0,89	4.100	0,84	4,9	4,9	4,2
18	28. Mai	I	ungef.	308	316	5,5	5,6	0,97	4.400	1,14	5,4	5,5	4,6
19	28. Mai	II	ungef.	315	320	5,8	5,9	0,98	4.400	1,14	5,7	5,8	4,9
20	28. Mai	III	ungef.	318	324	5,9	6,0	0,98	4.300	1,14	5,8	5,8	5,0
21	21. Mai	I	ungef.	250	265	4,4	4,7	0,94	4.800	0,60	5,3	5,2	4,4
22	21. Mai	II	ungef.	300	310	5,6	5,8	0,97	3.300	0,60	6,5	6,4	5,4
23	21. Mai	III	ungef.	273	283	4,8	5,0	0,96	4.100	0,60	5,7	5,6	4,7
24	17. Apr	II	ungef.	320	341	5,6	5,9	0,94	6.600	2,34	4,8	5,0	4,3
25	17. Apr	III	ungef.	414	422	7,2	7,3	0,98	6.800	2,34	5,9	6,2	5,3
Mittelwert				352	367	6,4	6,7	0,96	5.700	1,40	6,2	6,3	5,3
Standardabweichung				72	73	1,4	1,4	0,04	1.800	0,50	1,0	1,1	0,9
Variationskoeffizient [%]				20,49	19,88	22,01	21,50	3,68	31,58	35,69	16,41	17,19	17,19

Anhang 4.4 - 1
Versuchsergebnisse der Druckfestigkeits- und Verformungsprüfungen bei RILEM-Körpern aus Ziegeln bzw. Sandsteinen

RILEM-Körper aus fabrikneuen Ziegeln gefestigt mit S											Mauerwerksfestigkeit nach		
1	Datum	Nr.	Art	Mauerwerk						Mörtel	EC 6	DIN 18554 T1	mit Formfaktor f
				F _{RiB}	F _{max}	β _{RiB}	β _{D,mw}	β _{RiB} /β _{D,mw}	E-Modul	β _{D,mö}	f _k	β' _{D,mw}	β' _{D,mw} * 0,85
	-	-	-	kN		N/mm ²		-	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14 = 13 * 0,85
1	16. Okt	IV	S	402	435	7,4	8,0	0,92	9.200	1,69	7,0	7,2	6,1
2	16. Okt	V	S	400	448	7,6	8,5	0,89	10.200	1,69	7,4	7,6	6,5
3	16. Okt	VI	S	410	436	7,8	8,3	0,94	9.200	1,69	7,2	7,4	6,3
4	15. Sep	I	S	370	410	6,9	7,7	0,90	10.700	1,31	7,2	7,3	6,2
5	15. Sep	II	S	390	427	7,3	8,0	0,91	10.700	1,31	7,5	7,6	6,5
6	15. Sep	III	S	370	437	7,1	8,4	0,85	10.300	1,31	7,8	7,9	6,7
7	23. Jul	I	S	290	329	5,2	5,9	0,88	5.500	1,07	5,8	5,8	4,9
8	23. Jul	II	S	330	362	5,9	6,5	0,91	5.800	1,07	6,4	6,4	5,4
9	23. Jul	III	S	280	353	5,0	6,3	0,79	6.000	1,19	6,0	6,0	5,1
10	10. Jul	I	S	340	349	5,9	6,1	0,97	9.600	1,37	5,6	5,7	4,8
11	10. Jul	II	S	360	384	6,3	6,7	0,94	6.200	1,37	6,2	6,3	5,3
12	10. Jul	III	S	375	388	6,5	6,7	0,97	10.300	1,37	6,2	6,3	5,4
13	02. Jul	I	S	295	359	5,2	6,4	0,82	4.400	0,43	7,9	7,5	6,4
14	02. Jul	II	S	360	393	6,4	7,0	0,92	6.900	0,43	8,6	8,3	7,0
15	26. Jun	I	S	320	345	5,6	6,0	0,93	9.500	1,48	5,4	5,5	4,7
16	26. Jun	II	S	310	333	5,4	5,8	0,93	9.700	1,48	5,2	5,4	4,6
17	26. Jun	III	S	280	294	4,9	5,1	0,95	9.000	1,48	4,6	4,7	4,0
18	19. Jun	I	S	290	308	5,0	5,4	0,94	8.900	1,38	4,9	5,0	4,3
19	19. Jun	II	S	320	332	5,6	5,8	0,96	9.200	1,38	5,3	5,4	4,6
20	19. Jun	III	S	200	204	3,6	3,6	0,98	9.100	1,38	3,3	3,4	2,9
Mittelwert				335	366	6,0	6,6	0,92	8.500	1,29	6,3	6,3	5,4
Standardabweichung				52	58	1,1	1,2	0,05	1.900	0,33	1,3	1,2	1,0
Variationskoeffizient [%]				15,49	15,92	17,80	18,54	5,27	22,35	25,74	20,10	19,27	19,27

Anhang 4.4 - 2
Versuchsergebnisse der Druckfestigkeits- und Verformungsprüfungen bei RILEM-Körpern aus Ziegeln bzw. Sandsteinen

Versuchsergebnisse der Druckfestigkeits- und Verformungsprüfungen bei RILEM-Körpern aus Ziegeln bzw. Sandsteinen

RILEM-Körper aus fabriktneuen Ziegeln gefestigt mit T											Mauerwerksfestigkeit nach		
1	Datum	Nr.	Art	Mauerwerk						Mörtel	EC 6	DIN 18554 T1	mit Formfaktor f
				F_{RiS}	F_{max}	β_{RiS}	$\beta_{D,mw}$	$\beta_{RiS}/\beta_{D,mw}$	E-Modul	$\beta_{D,mö}$	f_k	$\beta'_{D,mw}$	$\beta'_{D,mw} * 0,85$
	-	-	-	kN		N/mm ²		-	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14 = 13 * 0,85
1	22. Okt	II	T	447	481	8,4	9,0	0,93	9.078	2,10	7,5	7,8	6,6
2	22. Okt	III	T	400	470	7,4	8,7	0,85	8.800	2,10	7,3	7,5	6,4
3	22. Okt	I	T	300	325	5,7	6,2	0,92	8.300	2,10	5,2	5,4	4,6
4	16. Sep	II	T	380	400	7,2	7,6	0,95	7.200	0,94	7,7	7,7	6,5
5	16. Sep	III	T	410	414	7,8	7,9	0,99	5.000	0,94	8,0	7,9	6,8
6	28. Aug	II	T	370	385	6,9	7,1	0,96	4.600	1,35	6,6	6,7	5,7
7	28. Aug	III	T	260	277	4,8	5,2	0,94	3.600	1,35	4,8	4,8	4,1
8	28. Aug	V	T	330	350	6,1	6,5	0,94	4.500	1,35	6,0	6,1	5,2
Mittelwert				362	388	6,8	7,3	0,94	6.400	1,53	6,6	6,7	5,7
Standardabweichung				58	65	1,1	1,2	0,04	2.100	0,47	1,1	1,1	0,9
Variationskoeffizient [%]				15,93	16,80	15,97	16,69	4,01	32,81	30,75	16,87	16,45	16,45

RILEM-Körper aus historischen Ziegeln ungefestigt, gefestigt mit T, gefestigt mit S										Mauerwerksfestigkeit nach			
1	Datum	Nr.	Art	Mauerwerk					Mörtel	EC 6	DIN 18554 T1	mit Formfaktor f	
				F _{RiB}	F _{max}	β _{RiB}	β _{D,mw}	β _{RiB} /β _{D,mw}	E-Modul	β _{D,mö}	f'k	β' _{D,mw}	β' _{D,mw} * 0,85
	-	-	-	kN		N/mm ²		-	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14 = 13 * 0,85
1	29. Apr	I	ungef.	800	869	12,6	13,7	0,92	20.700	3,58	9,9	10,6	9,0
2	29. Apr	III	ungef.	810	871	13,0	14,0	0,93	26.300	3,58	10,1	10,8	9,2
3	02. Jul	I	ungef.	308	334	4,9	5,4	0,92	8.100	0,66	5,9	5,8	4,9
4	02. Jul	II	ungef.	370	487	5,9	7,8	0,76	12.200	0,66	8,6	8,5	7,2
5	02. Jul	III	ungef.	420	575	6,7	9,2	0,73	10.800	0,66	10,2	10,0	8,5
6	09. Sep	I	ungef.	260	262	4,2	4,2	0,99	4.100	1,44	3,9	3,9	3,4
7	09. Sep	II	ungef.	320	360	5,3	6,0	0,89	4.900	1,44	5,5	5,6	4,7
8	09. Sep	III	ungef.	355	415	5,9	6,9	0,86	5.300	1,44	6,3	6,4	5,4
Mittelwert				455	522	7,3	8,4	0,87	11.600	1,68	7,6	7,7	6,5
Standardabweichung				207	220	3,2	3,4	0,08	7.500	1,15	2,3	2,4	2,1
Variationskoeffizient [%]				45,36	42,16	44,15	40,99	9,55	64,66	68,14	30,65	31,82	31,82
1	15. Dez	IV	T	560	598	8,9	9,5	0,94	24.100	1,44	8,6	8,8	7,5
2	15. Dez	V	T	440	461	7,2	7,5	0,95	9.100	0,88	7,8	7,7	6,6
3	15. Dez	VI	T	440	551	7,3	9,1	0,80	15.900	0,88	9,4	9,3	7,9
Mittelwert				480	537	7,8	8,7	0,90	16.400	1,07	8,6	8,6	7,3
Standardabweichung				57	57	0,8	0,8	0,07	6.100	0,26	0,7	0,7	0,6
Variationskoeffizient [%]				11,79	10,59	9,95	9,60	7,77	37,20	24,75	7,60	7,68	7,68
1	15. Dez	I	S	440	531	7,2	8,7	0,83	15.800	1,44	7,9	8,1	6,9
2	15. Dez	II	S	430	512	7,0	8,4	0,84	18.100	1,44	7,6	7,8	6,6
3	15. Dez	III	S	450	553	6,9	8,5	0,81	17.200	1,44	7,8	7,9	6,7
Mittelwert				440	532	7,0	8,5	0,83	17.000	1,44	7,8	7,9	6,7
Standardabweichung				8	17	0,1	0,1	0,01	900	0,00	0,1	0,1	0,1
Variationskoeffizient [%]				1,86	3,15	1,52	1,49	1,29	5,29	0,00	1,49	1,49	1,49

Anhang 4.4 - 4
Versuchsergebnisse der Druckfestigkeits- und Verformungsprüfungen bei RILEM-Körpern aus Ziegeln bzw. Sandsteinen

Versuchsergebnisse der Druckfestigkeits- und Verformungsprüfungen bei RILEM-Körpern aus Ziegeln bzw. Sandsteinen

Oberkirchener Sandstein ungefestigt, gefestigt mit T, gefestigt mit S										Mauerwerksfestigkeit nach			
1	Datum	Nr.	Art	Mauerwerk						Mörtel	EC 6	DIN 18554 T1	mit Formfaktor f
				F _{RiS}	F _{max}	β _{RiS}	β _{D,mw}	β _{RiS} /β _{D,mw}	E-Modul	β _{D,mö}	f _k	β' _{D,mw}	β' _{D,mw} * 0,85
	-	-	-	kN		N/mm ²		-	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14 = 13 * 0,85
1	29. Sep	IV	ungef.	710	1.227	11,5	19,9	0,58	8.200	1,25	18,8	19,0	16,2
2	29. Sep	V	ungef.	1000	1.420	16,3	23,2	0,70	8.100	1,25	21,9	22,2	18,9
3	09. Okt	I	ungef.	830	1.151	13,4	18,6	0,72	6.100	0,51	22,0	21,3	18,1
4	09. Okt	II	ungef.	850	1.226	13,6	19,7	0,69	5.200	0,51	23,3	22,5	19,1
5	09. Okt	III	ungef.	800	1.307	12,8	21,0	0,61	6.400	0,51	24,8	24,0	20,4
Mittelwert				838	1.266	13,5	20,5	0,66	6.800	0,81	22,2	21,8	18,5
Standardabweichung				94	91	1,6	1,6	0,06	1.200	0,36	2,0	1,6	1,4
Variationskoeffizient [%]				11,23	7,22	11,69	7,60	8,47	17,65	44,98	8,91	7,51	7,51
1	24. Sep	I	T	520	1.244	8,8	21,0	0,42	7.000	1,16	20,2	20,4	17,3
2	24. Sep	II	T	780	1.397	13,3	23,8	0,56	6.900	1,16	22,9	23,1	19,6
3	24. Sep	III	T	550	1.112	9,2	18,6	0,49	10.300	1,16	18,0	18,1	15,4
Mittelwert				617	1.251	10,4	21,1	0,49	8.100	1,16	20,4	20,5	17,4
Standardabweichung				116	116	2,0	2,1	0,06	1.600	0,00	2,0	2,0	1,7
Variationskoeffizient [%]				18,83	9,31	19,47	9,97	11,70	19,75	0,00	9,97	9,97	9,97
1	22. Sep	I	S	700	1.155	11,8	19,5	0,61	12.000	0,95	19,8	19,7	16,7
2	22. Sep	II	S	780	1.161	13,2	19,6	0,67	12.900	0,95	19,9	19,8	16,8
3	22. Sep	III	S	600	1.145	10,1	19,3	0,52	10.000	0,95	19,6	19,5	16,6
Mittelwert				693	1.154	11,7	19,5	0,60	11.600	0,95	19,7	19,7	16,7
Standardabweichung				74	7	1,2	0,1	0,06	1.200	0,00	0,1	0,1	0,1
Variationskoeffizient [%]				10,62	0,57	10,62	0,57	10,07	10,34	0,00	0,57	0,57	0,57

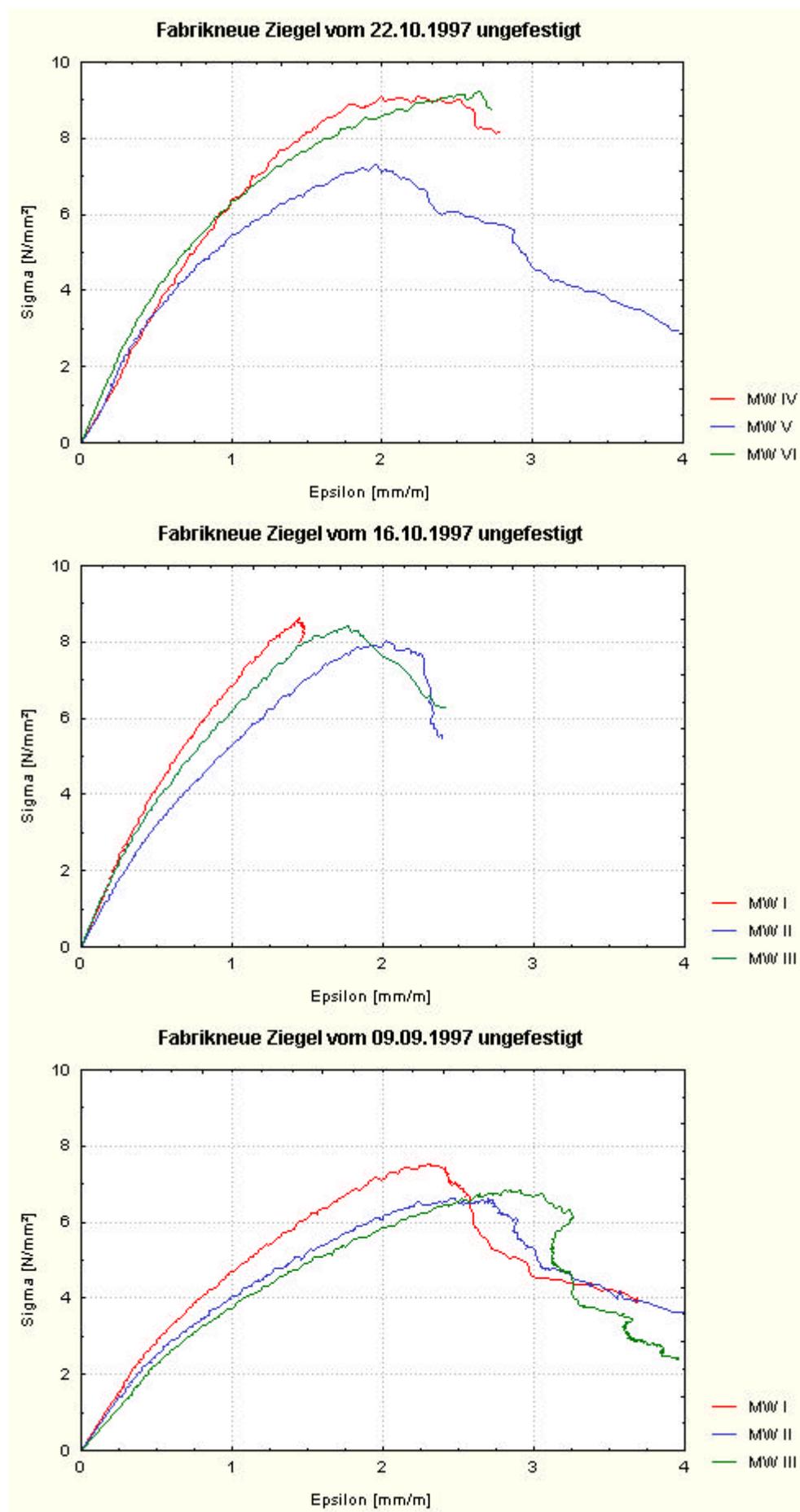
Roter Wesersandstein ungefestigt, gefestigt mit T, gefestigt mit S											Mauerwerksfestigkeit nach		
1	Datum	Nr.	Art	Mauerwerk						Mörtel	EC 6	DIN 18554 T1	mit Formfaktor f
				F _{RiS}	F _{max}	β _{RiS}	β _{D,mw}	β _{RiS} /β _{D,mw}	E-Modul	β _{D,mö}	f'k	β' _{D,mw}	β' _{D,mw} * 0,85
	-	-	-	kN		N/mm ²		-	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²		
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14 = 13 * 0,85
1	07. Aug	I	ungef.	740	1.115	11,7	17,7	0,66	6.000	1,10	17,3	17,4	14,8
2	07. Aug	II	ungef.	1.100	1.246	17,6	20,0	0,88	6.700	1,10	19,5	19,6	16,7
3	07. Aug	III	ungef.	1.000	1.230	16,0	19,7	0,81	6.000	1,10	19,2	19,3	16,4
Mittelwert				947	1.197	15,1	19,1	0,79	6.200	1,10	18,7	18,8	15,9
Standardabweichung				152	58	2,5	1,0	0,09	300	0,00	1,0	1,0	0,8
Variationskoeffizient [%]				16,03	4,87	16,43	5,32	11,62	4,84	0,00	5,32	5,32	5,32
1	04. Sep	I	T	1.000	1.077	15,7	16,9	0,93	8.800	1,07	16,6	16,7	14,2
2	04. Sep	II	T	1.070	1.301	16,6	20,2	0,82	8.700	1,07	19,9	19,9	16,9
3	04. Sep	III	T	850	918	13,2	14,3	0,93	10.400	1,07	14,0	14,1	12,0
Mittelwert				973	1.099	15,2	17,1	0,89	9.300	1,07	16,8	16,9	14,4
Standardabweichung				92	157	1,4	2,4	0,05	800	0,00	2,4	2,4	2,0
Variationskoeffizient [%]				9,43	14,30	9,49	14,19	5,54	8,60	0,00	14,19	14,19	14,19
1	06. Aug	I	S	860	949	13,4	14,8	0,91	7.100	0,93	15,1	15,1	12,8
2	06. Aug	II	S	850	1.131	13,3	17,7	0,75	7.900	0,93	18,1	18,0	15,3
3	06. Aug	III	S	950	1.014	15,1	16,1	0,94	6.200	0,93	16,4	16,3	13,9
Mittelwert				887	1.031	14,0	16,2	0,86	7.100	0,93	16,5	16,5	14,0
Standardabweichung				45	75	0,8	1,2	0,08	700	0,00	1,2	1,2	1,0
Variationskoeffizient [%]				5,07	7,30	5,73	7,32	9,38	9,86	0,00	7,32	7,32	7,32

Anhang 4.4 - 6
 Versuchsergebnisse der Druckfestigkeits- und Verformungsprüfungen bei RILEM-Körpern aus Ziegeln bzw. Sandsteinen

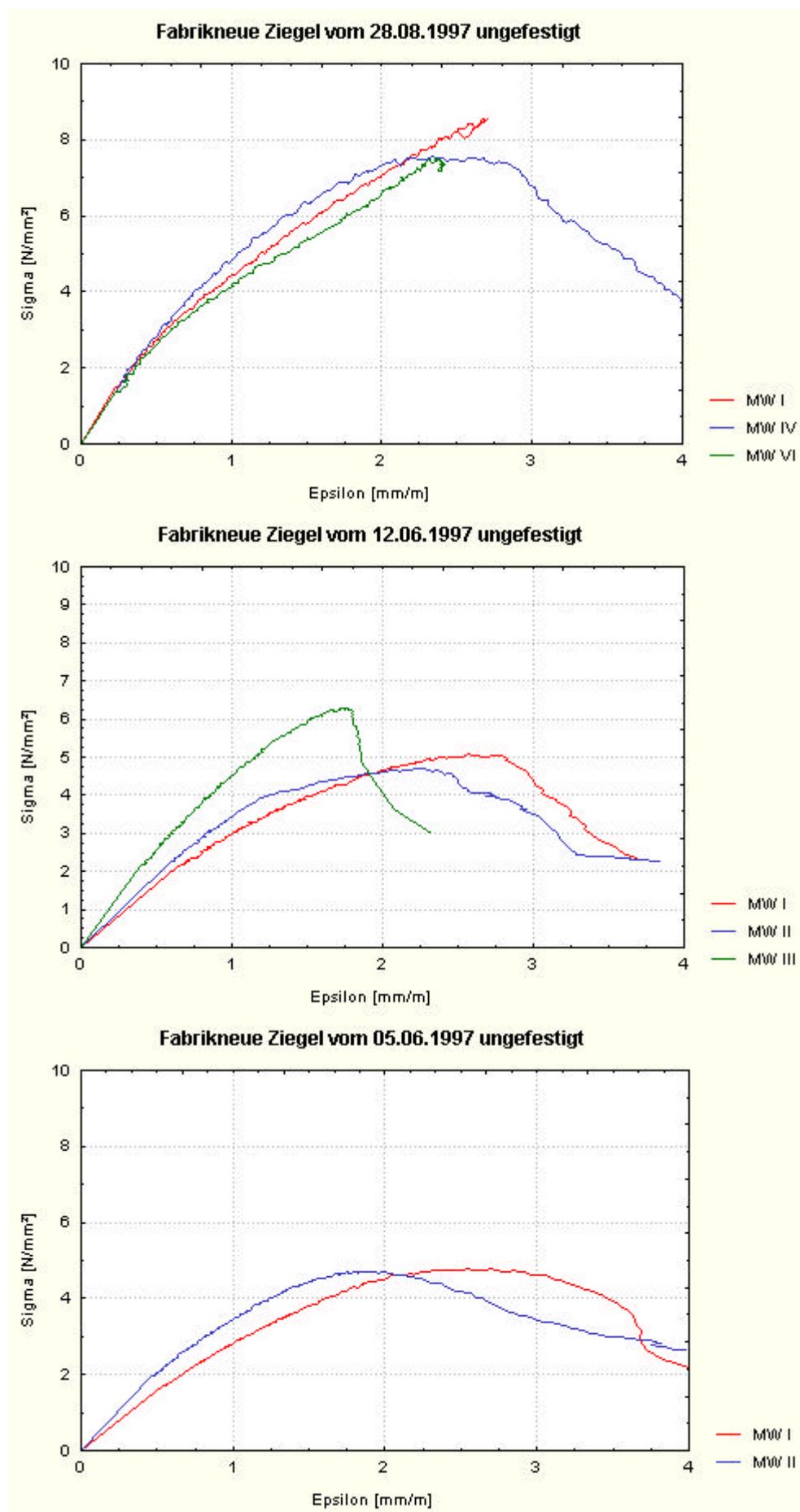
Versuchsergebnisse der Druckfestigkeits- und Verformungsprüfungen bei RILEM-Körpern aus Ziegeln bzw. Sandsteinen

Rüthener Grünsandstein ungefestigt, gefestigt mit T, gefestigt mit S											Mauerwerksfestigkeit nach		
1	Datum	Nr.	Art	Mauerwerk						Mörtel	EC 6	DIN 18554 T1	mit Formfaktor f
				F _{RiS}	F _{max}	β _{RiS}	β _{D,mw}	β _{RiS} /β _{D,mw}	E-Modul	β _{D,mö}	f'k	β' _{D,mw}	β' _{D,mw} * 0,85
	-	-	-	kN		N/mm ²		-	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²		
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14 = 13 * 0,85
1	17. Jul	I	ungef.	650	709	10,4	11,3	0,92	6.600	1,04	11,2	11,2	9,5
2	17. Jul	II	ungef.	710	749	11,4	12,0	0,95	7.000	1,04	11,9	11,9	10,1
3	17. Jul	III	ungef.	730	767	11,8	12,4	0,95	7.000	1,04	12,3	12,3	10,5
Mittelwert				697	742	11,2	11,9	0,94	6.900	1,04	11,8	11,8	10,0
Standardabweichung				34	24	0,6	0,5	0,02	200	0,00	0,4	0,4	0,4
Variationskoeffizient [%]				4,88	3,27	5,40	3,81	1,67	2,90	0,00	3,81	3,81	3,81
1	03. Sep	I	T	400	640	6,5	10,3	0,63	4.800	1,55	9,3	9,5	8,1
2	03. Sep	II	T	580	851	9,4	13,8	0,68	3.200	1,55	12,3	12,6	10,7
3	03. Sep	III	T	800	813	12,9	13,1	0,98	9.400	1,55	11,8	12,0	10,2
Mittelwert				593	768	9,6	12,4	0,76	5.800	1,55	11,1	11,4	9,7
Standardabweichung				164	92	2,6	1,5	0,16	2.600	0,00	1,3	1,4	1,2
Variationskoeffizient [%]				27,57	11,96	27,58	11,99	20,64	44,83	0,00	11,99	11,99	11,99
1	14. Aug	I	S	330	475	5,3	7,7	0,69	10.400	0,83	8,0	8,0	6,8
2	14. Aug	II	S	680	721	11,0	11,7	0,94	7.300	0,83	12,2	12,1	10,3
3	14. Aug	III	S	705	725	11,4	11,7	0,97	7.800	0,83	12,3	12,2	10,3
Mittelwert				572	640	9,2	10,3	0,87	8.500	0,83	10,8	10,7	9,1
Standardabweichung				171	117	2,8	1,9	0,12	1.400	0,00	2,0	2,0	1,7
Variationskoeffizient [%]				29,95	18,26	29,98	18,29	14,32	16,47	0,00	18,29	18,29	18,29

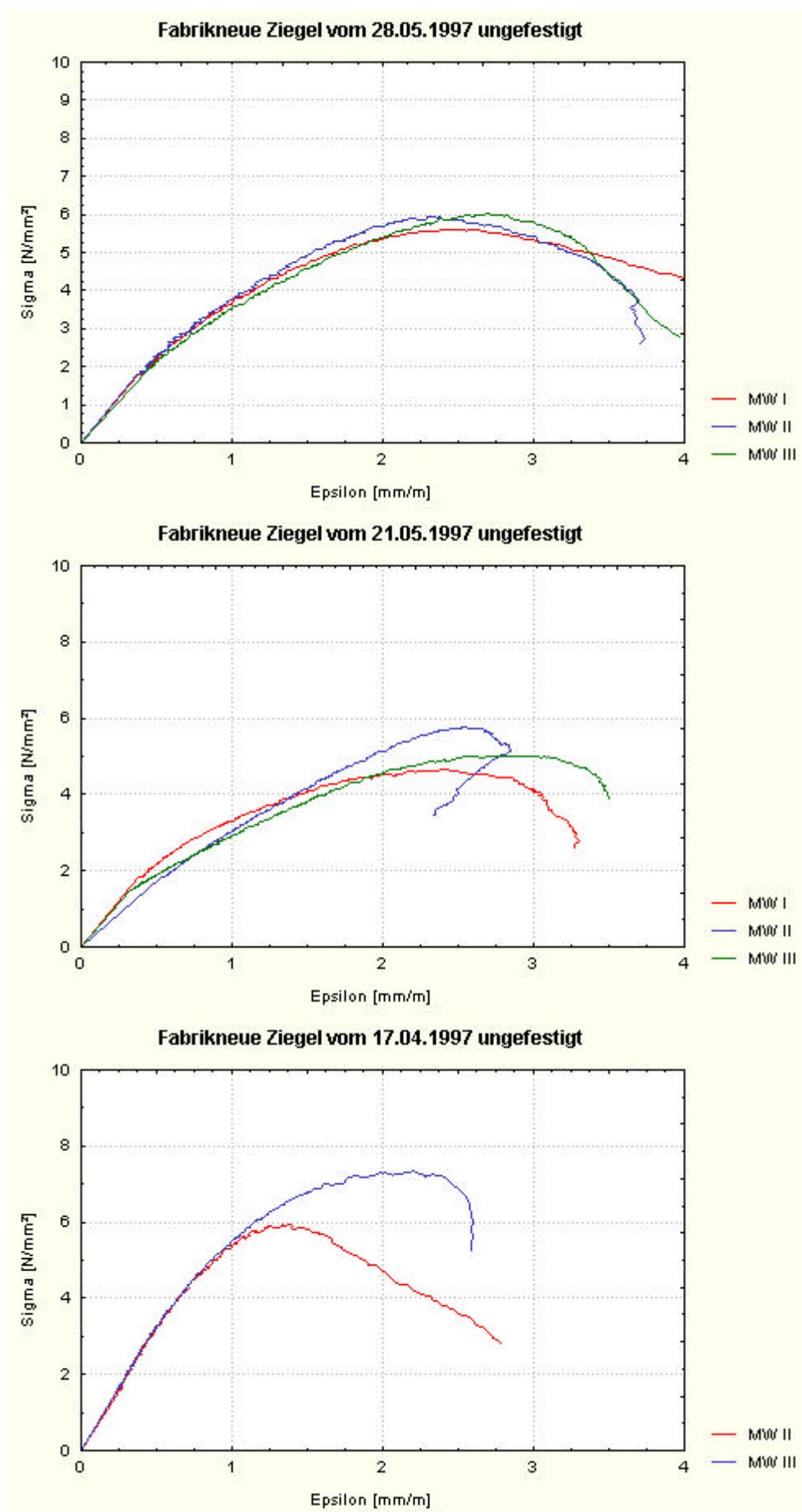
Spannungs-Dehnungs-Linien der RILEM-Körper aus Ziegeln bzw. Sandsteinen



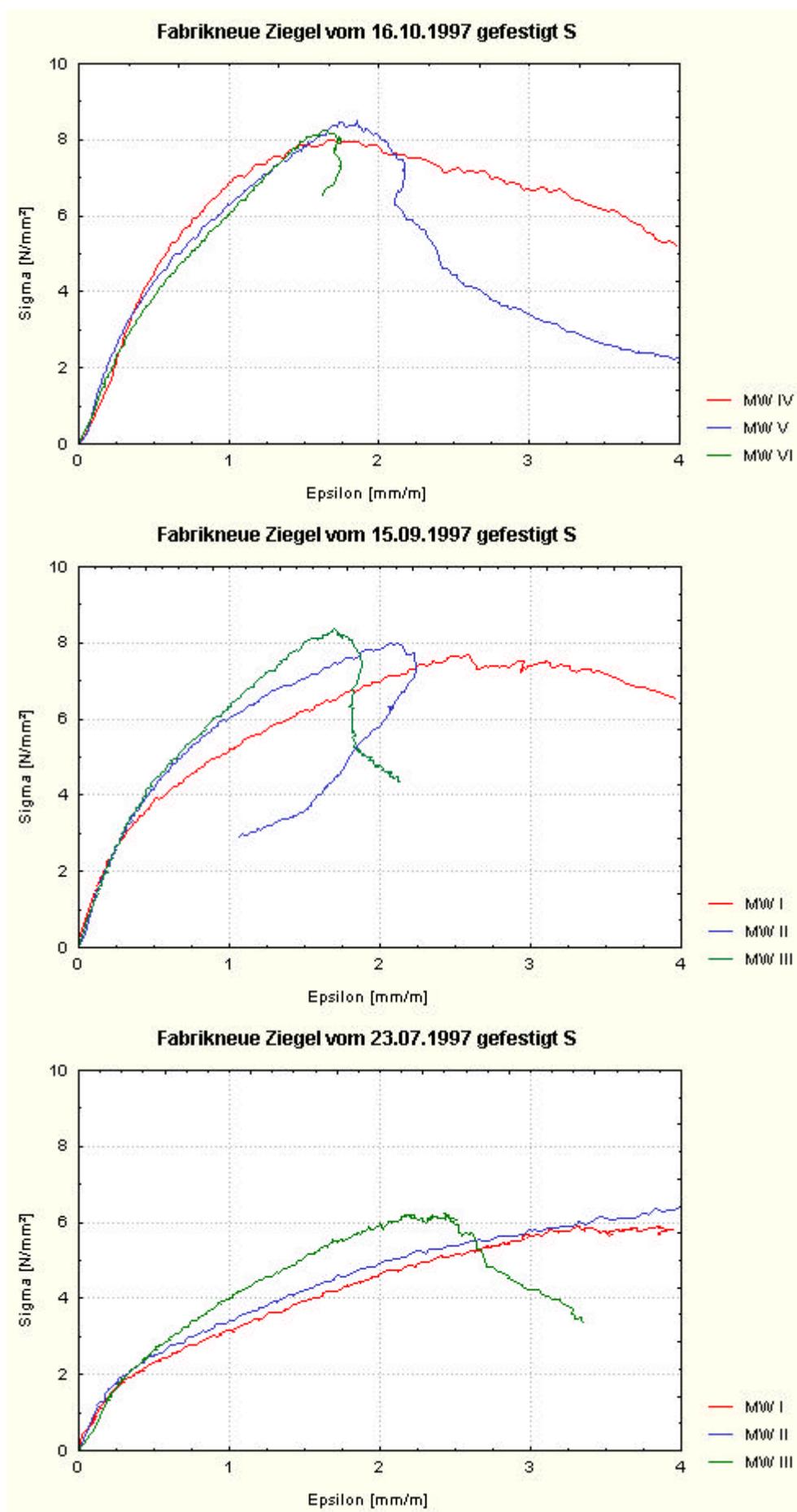
Spannungs-Dehnungs-Linien der RILEM-Körper aus Ziegeln bzw. Sandsteinen



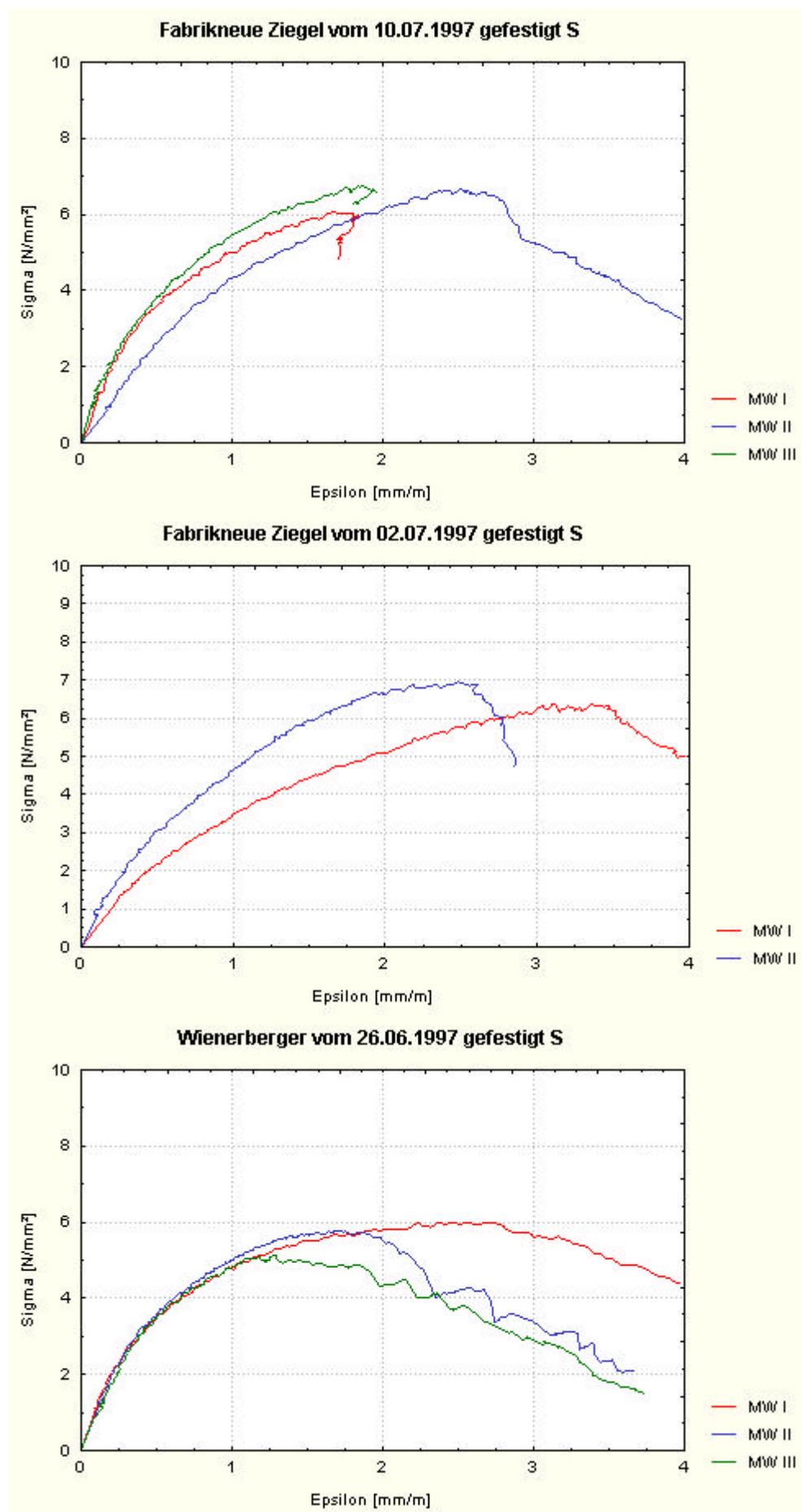
Spannungs-Dehnungs-Linien der RILEM-Körper aus Ziegeln bzw. Sandsteinen



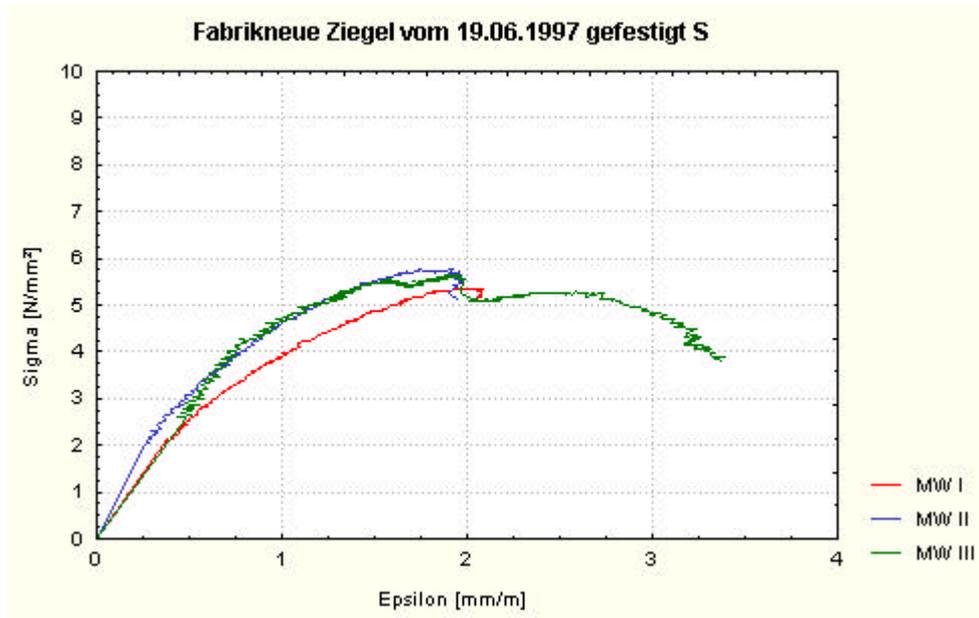
Spannungs-Dehnungs-Linien der RILEM-Körper aus Ziegeln bzw. Sandsteinen



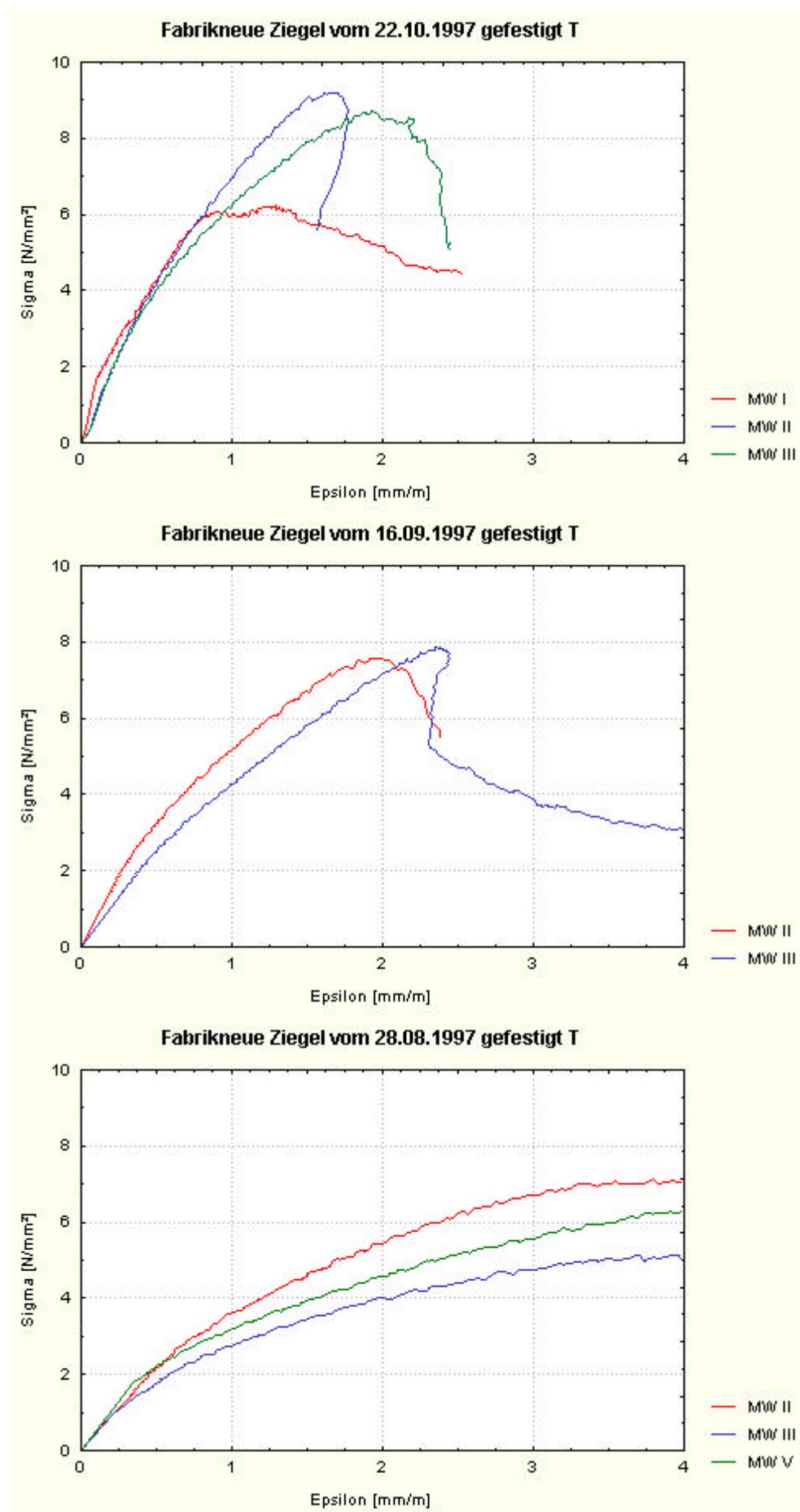
Spannungs-Dehnungs-Linien der RILEM-Körper aus Ziegeln bzw. Sandsteinen



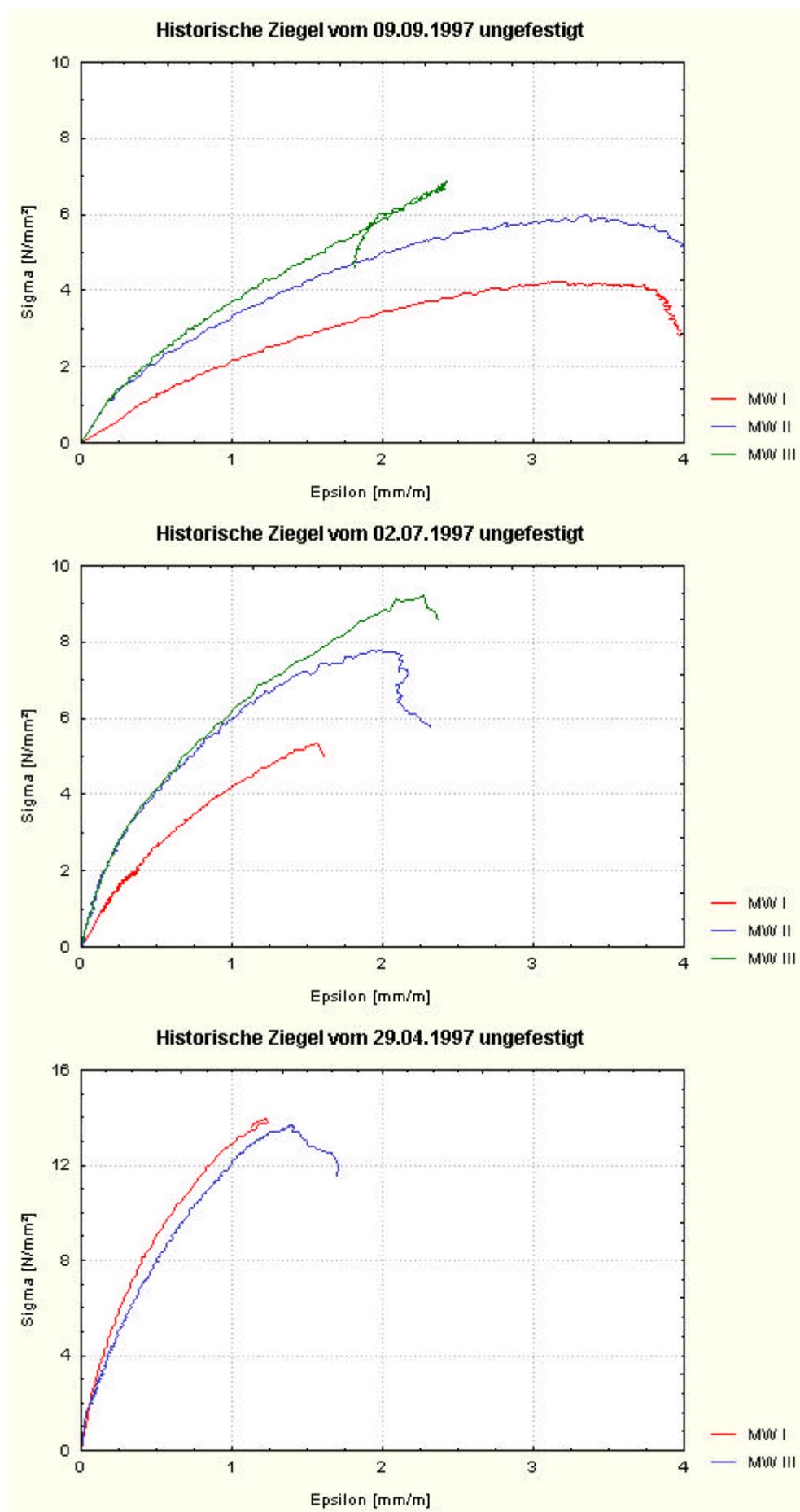
Spannungs-Dehnungs-Linien der RILEM-Körper aus Ziegeln bzw. Sandsteinen



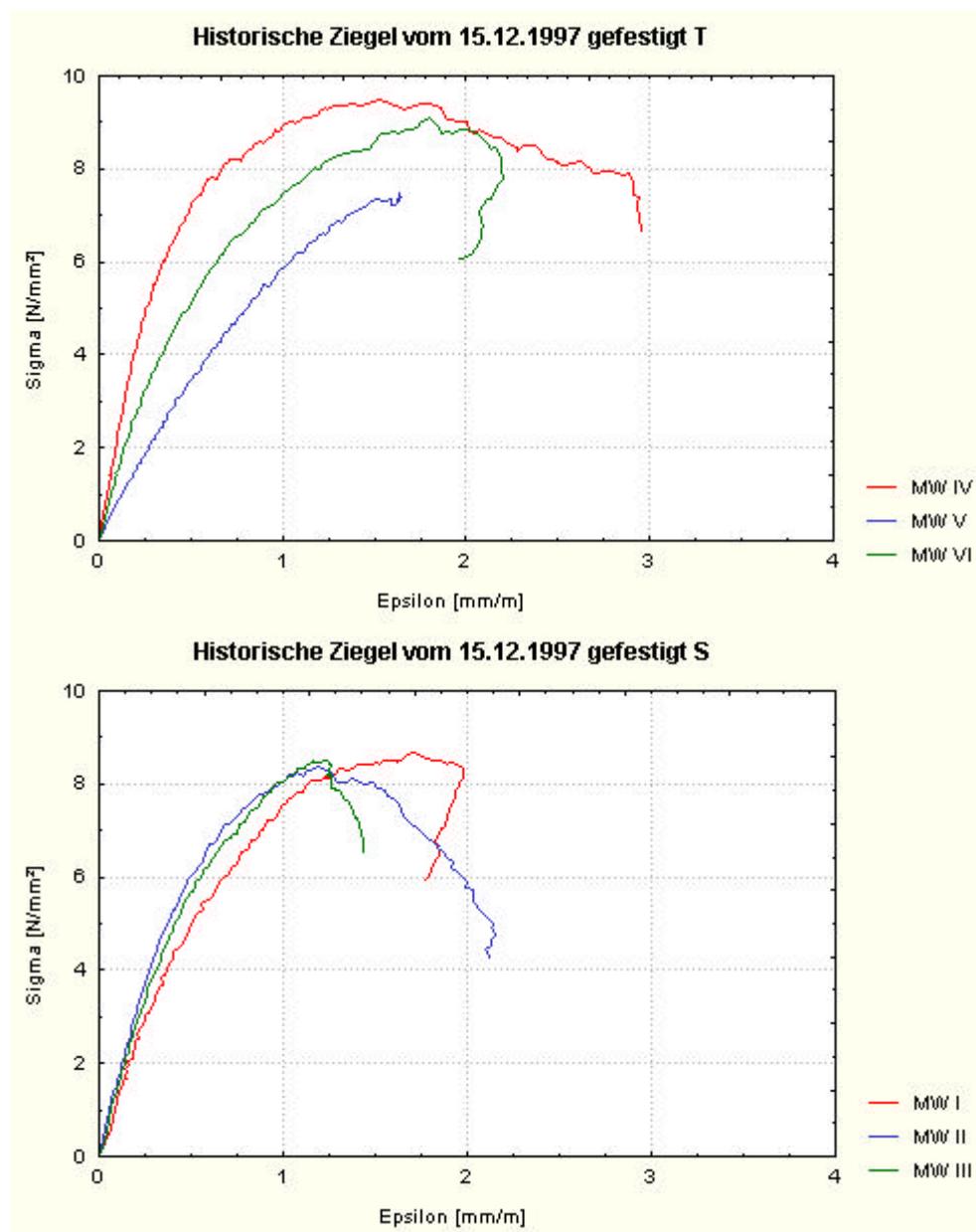
Spannungs-Dehnungs-Linien der RILEM-Körper aus Ziegeln bzw. Sandsteinen



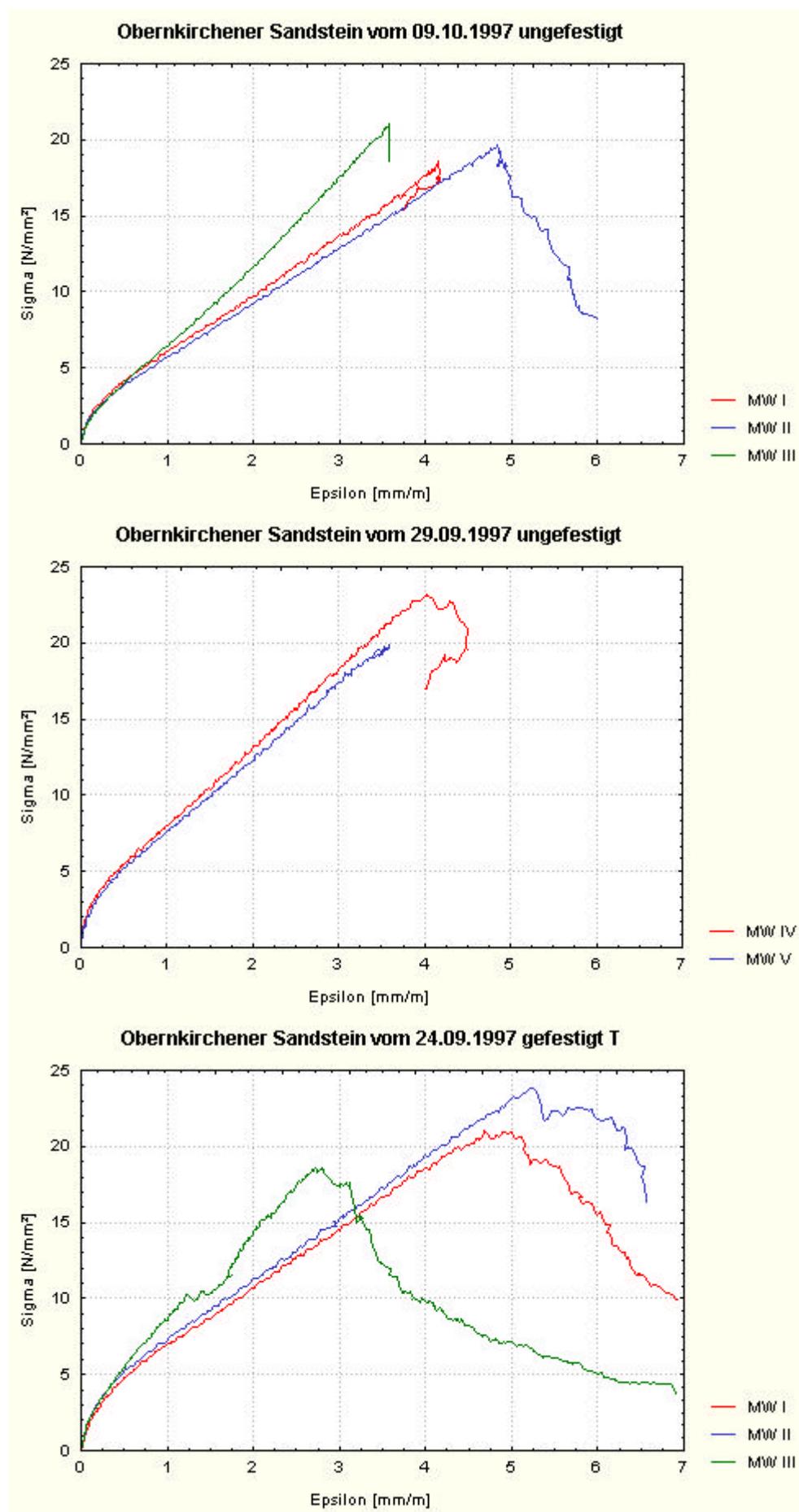
Spannungs-Dehnungs-Linien der RILEM-Körper aus Ziegeln bzw. Sandsteinen



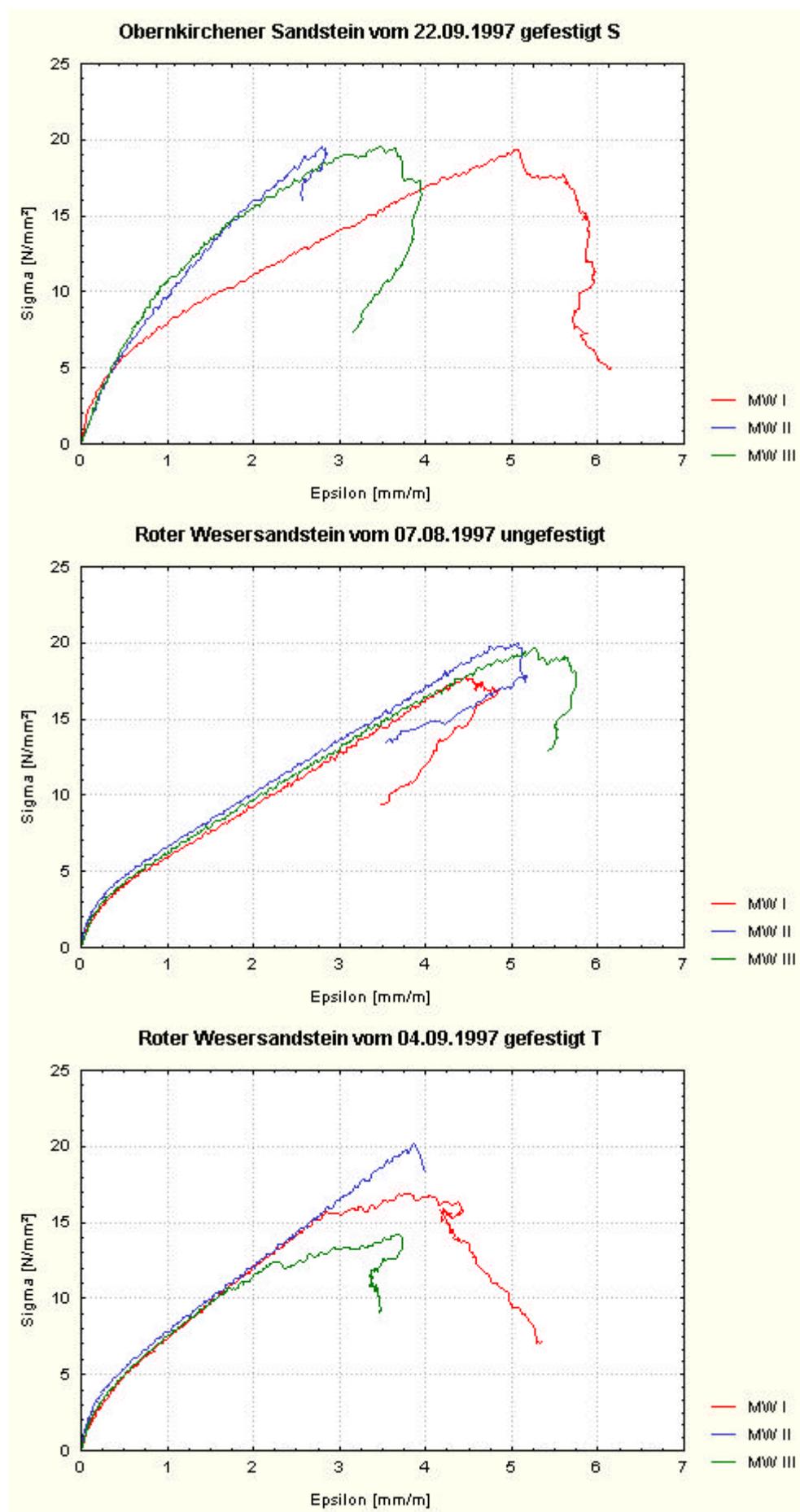
Spannungs-Dehnungs-Linien der RILEM-Körper aus Ziegeln bzw. Sandsteinen



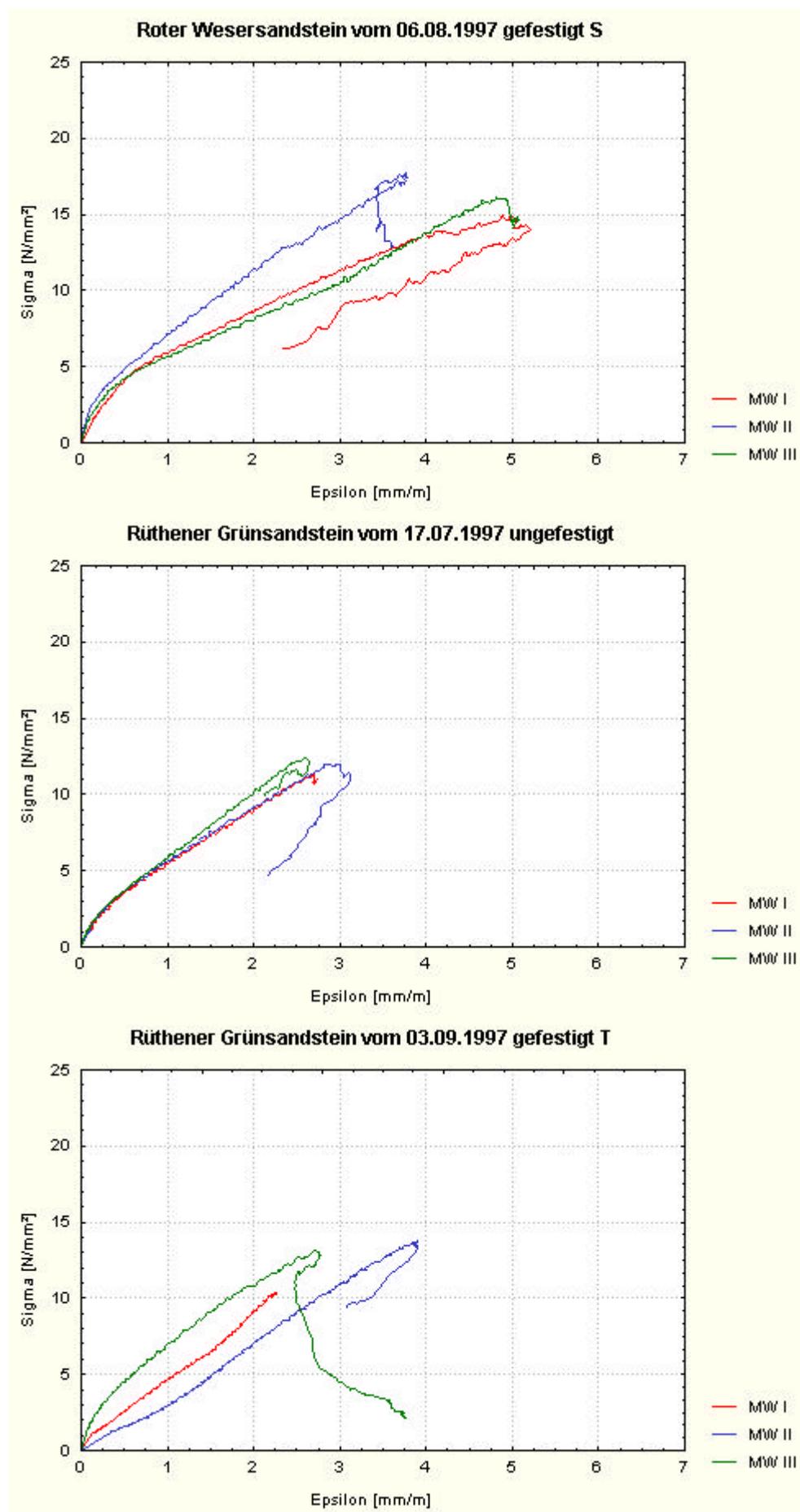
Spannungs-Dehnungs-Linien der RILEM-Körper aus Ziegeln bzw. Sandsteinen



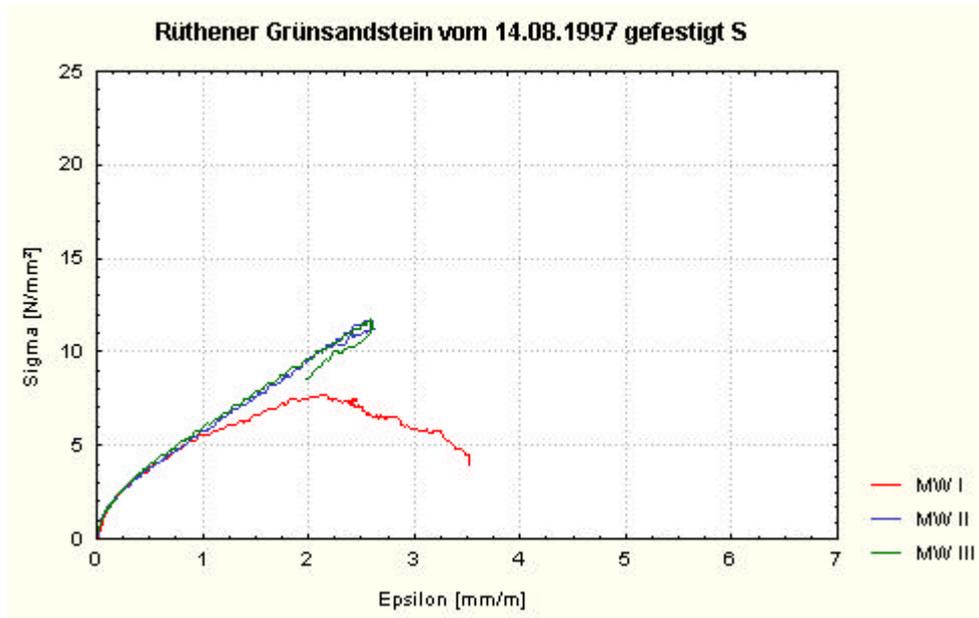
Spannungs-Dehnungs-Linien der RILEM-Körper aus Ziegeln bzw. Sandsteinen



Spannungs-Dehnungs-Linien der RILEM-Körper aus Ziegeln bzw. Sandsteinen



Spannungs-Dehnungs-Linien der RILEM-Körper aus Ziegeln bzw. Sandsteinen



Ermittlung der Regressionskoeffizienten der im Versuch ermittelten Spannungs - Dehnungs-
Linien der RILEM-Körper aus Ziegeln bzw. Sandsteinen

Fabrikneue Ziegel		$\sigma = a * \varepsilon - (a^{**2} * \varepsilon^{**2}) / b$ (Gl. 5.2)					
ungefestigt		Regressionskoeffizienten		Bestimmtheits-			
Datum	Nr.	a	b	maß r ²	$\beta_{D, mö}$	$\beta_{D, mw}$	E-Modul
-	-	-	-	-	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
1	2	3	4	5	6	7	8
22.10.	IV	8,20	35,86	0,99	2,10	9,0	9.100
	V	7,60	28,02	0,99	2,10	7,3	7.700
	VI	8,04	36,05	0,98	2,10	9,2	8.800
16.10.	I	9,55	35,35	0,99	1,69	8,6	9.600
	II	6,90	32,14	0,99	1,69	8,0	6.800
	III	8,75	32,14	0,99	1,69	8,4	8.300
09.09.	I	6,00	29,17	0,99	1,33	7,5	6.000
	II	5,04	25,85	0,99	1,33	6,6	5.300
	III	4,49	26,60	0,99	1,33	6,8	4.500
28.08.	I	5,13	34,76	0,99	1,35	8,6	5.400
	IV	6,14	30,03	0,99	1,35	7,6	5.900
	VI	4,92	30,80	0,99	1,35	7,5	5.500
12.06.	I	3,63	20,14	0,99	1,36	5,1	3.400
	II	4,47	18,62	0,99	1,36	4,7	4.500
	III	5,81	26,42	0,99	1,36	6,3	5.800
05.06.	I	3,63	18,54	0,99	0,84	4,8	3.300
	II	4,73	18,47	0,99	0,84	4,7	4.100
28.05.	I	4,43	22,87	0,99	1,14	5,6	4.400
	II	4,83	23,21	0,99	1,14	5,9	4.400
	III	4,44	22,95	0,99	1,14	6,0	4.300
21.05.	I	4,34	18,64	0,97	0,60	4,7	4.800
	II	3,77	23,37	0,98	0,60	5,8	3.300
	III	3,68	19,58	0,98	0,60	5,0	4.100
17.04.	II	8,01	23,17	0,99	2,34	5,9	6.600
	III	7,30	29,22	0,99	2,34	7,3	6.800
Mittelwert		5,75	26,48			6,68	5.700
Standardabweichung		1,75	5,78			1,43	1.808
Variationskoeffizient		30,40	21,82			21,43	31,73

Ermittlung der Regressionskoeffizienten der im Versuch ermittelten Spannungs - Dehnungs -
Linien der RILEM-Körper aus Ziegeln bzw. Sandsteinen

Fabrikneue Ziegel		$\sigma = a * \varepsilon - (a^{**2} * \varepsilon^{**2}) / b$ (Gl. 5.2)						$\sigma = a * \varepsilon^{**b}$ (Gl. 5.4)		
gefestigt mit S		Regressionskoeffizienten		Bestimmtheits- maß r^2	$\beta_{D, mö}$ N/mm ²	$\beta_{D, mw}$ N/mm ²	E-Modul N/mm ²	Regressionskoeffizienten		Bestimmtheits- maß r^2
Datum	Nr.	a	b					a	b	
-	-	-	-	-	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	-	-	-
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
16.10.	IV	9,65	32,90	0,99	1,69	8,0	9.200	6,20	0,60	0,94
	V	9,12	32,62	0,98	1,69	8,5	10.200	5,90	0,72	0,99
	VI	8,51	32,72	0,98	1,69	8,3	9.200	5,85	0,72	0,99
15.09.	I	6,70	30,34	0,92	1,31	8,0	10.700	5,03	0,43	0,99
	II	8,75	31,07	0,96	1,31	8,4	10.700	5,69	0,48	0,98
	III	9,58	31,82	0,98	1,31	5,9	10.300	6,20	0,58	0,99
23.07.	I	3,48	22,97	0,95	1,07	5,9	5.500	3,21	0,48	0,99
	II	3,55	25,17	0,92	1,07	6,5	5.800	3,48	0,44	0,99
	III	5,19	24,27	0,98	1,07	6,3	6.000	3,93	0,55	0,99
10.07.	I	8,00	23,83	0,96	1,37	5,9	9.600	4,80	0,48	0,97
	II	5,32	25,94	0,99	1,37	6,3	6.200	4,00	0,56	0,97
	III	8,42	26,50	0,96	1,37	6,5	10.300	5,16	0,51	0,98
02.07.	I	3,96	24,68	0,98	0,43	6,4	4.400	3,39	0,54	0,98
	II	6,13	27,19	0,99	0,43	7,0	6.900	4,42	0,50	0,95
26.06.	I	6,25	25,63	0,88	1,48	6,0	9.500	4,35	0,37	0,93
	II	7,79	23,42	0,96	1,48	5,8	9.700	4,69	0,42	0,93
	III	8,56	20,43	0,98	1,48	5,1	9.000	4,54	0,49	0,94
19.06.	I	5,42	20,94	0,99	1,38	5,4	8.900	3,82	0,52	0,98
	II	6,83	22,68	0,98	1,38	5,8	9.200	4,35	0,46	0,97
	III	6,11	22,84	0,92	1,38	5,6	9.100	4,42	0,44	0,95
Mittelwert		6,87	26,40			6,58	8.500	4,67	0,51	
Standardabweichung		1,92	3,98			1,05	1.899	0,90	0,09	
Variationskoeffizient		27,94	15,09			15,89	22,34	19,31	17,14	

Ermittlung der Regressionskoeffizienten der im Versuch ermittelten Spannungs - Dehnungs -
Linien der RILEM-Körper aus Ziegeln bzw. Sandsteinen

Fabrikneue Ziegel		$\sigma = a * \varepsilon - (a^{**2} * \varepsilon^{**2}) / b$ (Gl. 5.2)					
gefestigt mit T		Regressionskoeffizienten		Bestimmtheits- maß r^2	$\beta_{D, mö}$ N/mm ²	$\beta_{D, mw}$ N/mm ²	E-Modul N/mm ²
Datum	Nr.	a	b				
1	2	3	4	5	6	7	8
-	-	-	-	-			
22.10.	I	11,96	24,05	0,98	2,10	9,20	9.100
	II	9,55	37,09	0,99	2,10	8,70	8.800
	III	8,61	33,83	0,99	2,10	6,20	8.300
16.09.	II	7,00	29,59	0,99	0,94	7,60	7.200
	III	5,13	32,92	0,99	0,94	7,90	5.000
28.08.	II	3,91	27,89	0,99	1,35	7,10	4.600
	III	2,93	20,03	0,96	1,35	5,20	3.600
	V	3,00	26,01	0,94	1,35	6,50	4.500
Mittelwert		6,51	28,93			7,30	6.400
Standardabweichung		3,11	5,24			1,24	2.060
Variationskoeffizient		47,77	18,11			17,00	32,19

Ermittlung der Regressionskoeffizienten der im Versuch ermittelten Spannungs-Dehnungs-Linien der RILEM-Körper aus Ziegeln bzw. Sandsteinen

Historische Ziegel		$\sigma = a * \varepsilon - (a^{**2} * \varepsilon^{**2}) / b$ (Gl. 5.2)						$\sigma = a * \varepsilon^{**b}$ (Gl. 5.4)		
ungefestigt		Regressionskoeffizienten		Bestimmtheits- maß r^2	$\beta_{D, mö}$	$\beta_{D, mw}$	E-Modul	Regressionskoeffizienten		Bestimmtheits- maß r^2
Datum	Nr.	a	b					a	b	
-	-	-	-	-	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	-	-	-
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
09.09.	I	2,47	16,59	0,98	1,44	4,20	4.100	3,89	0,43	0,95
	II	3,79	23,36	0,99	1,44	6,00	4.900	4,21	0,5	0,94
	III	4,39	27,64	0,99	1,44	6,90	5.300	4,3	0,53	0,96
02.07.	I	6,27	20,34	0,99	0,66	5,40	8.100	4,02	0,52	0,93
	II	8,81	30,53	0,97	0,66	7,80	12.200	5,66	0,51	0,98
	III	8,46	34,80	0,97	0,66	9,20	10.800	6,04	0,56	0,99
29.04.	I	23,95	53,11	0,98	3,58	13,70	20.700	12,89	0,57	0,99
	III	19,94	52,62	0,98	3,58	14,00	26.300	11,73	0,60	0,99
Mittelwert		9,76	32,37			8,40	11.600	9,08	0,56	
Standardabweichung		7,39	12,97			3,45	7.525	3,26	0,03	
Variationskoeffizient		75,76	40,08			41,05	64,87	35,89	5,79	
15.12. gefestigt mit T	IV	16,17	41,59	0,89	1,44	9,50	24.100	8,29	0,40	0,91
	V	7,95	30,18	0,99	0,88	7,50	9.100	5,55	0,68	0,98
	VI	11,42	36,22	0,97	0,88	9,10	15.900	6,84	0,49	0,96
Mittelwert		11,85	36,00			8,70	16.400	6,89	0,52	
Standardabweichung		3,37	4,66			0,86	6.133	1,12	0,12	
Variationskoeffizient		28,44	12,95			9,93	37,39	16,24	22,30	
15.12. gefestigt mit S	I	11,36	34,55	0,99	1,44	8,70	15.800	6,89	0,52	0,95
	II	14,91	34,19	0,98	1,44	8,40	18.100	7,37	0,45	0,90
	III	14,37	33,19	0,99	1,44	8,50	17.200	7,91	0,58	0,97
Mittelwert		13,55	33,98			8,53	17.000	7,39	0,52	
Standardabweichung		1,56	0,58			0,12	946	0,42	0,05	
Variationskoeffizient		11,53	1,69			1,46	5,57	5,64	10,28	

Ermittlung der Regressionskoeffizienten der im Versuch ermittelten Spannungs-Dehnungs-Linien der RILEM-Körper aus Ziegeln bzw. Sandsteinen

Oberkirchener Sandstein		$\sigma = a * \varepsilon - (a^{**2} * \varepsilon^{**2}) / b$ (Gl. 5.2)						$\sigma = a * \varepsilon^{**b}$ (Gl. 5.4)		
ungefestigt		Regressionskoeffizienten		Bestimmtheitsmaß r^2	$\beta_{D, m\ddot{o}}$	$\beta_{D, mw}$	E-Modul	Regressionskoeffizienten		Bestimmtheitsmaß r^2
Datum	Nr.	a	b					a	b	
-	-	-	-	-	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	-	-	-
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
29.09.	IV	8,21	99,54	0,98	1,25	19,90	8.200	8,28	0,71	0,99
	V	7,83	90,05	0,98	1,25	23,20	8.100	7,76	0,72	0,99
09.10.	I	5,75	93,13	0,98	0,51	18,60	6.100	5,96	0,77	0,99
	II	5,29	97,36	0,98	0,51	19,70	5.200	5,59	0,77	0,99
	III	6,37	109,75	0,98	0,51	21,00	6.400	6,45	0,90	0,99
Mittelwert		6,69	97,97			20,48	6.800	6,81	0,77	
Standardabweichung		1,15	6,75			1,56	1.171	1,04	0,07	
Variationskoeffizient		17,12	6,89			7,61	17,23	15,27	8,75	
24.09. gefestigt mit T	I	6,70	83,20	0,98	1,16	21,00	7.000	7,07	0,66	0,99
	II	6,74	96,17	0,98	1,16	23,80	6.900	7,38	0,67	0,99
	III	9,51	79,65	0,97	1,16	18,60	10.400	8,66	0,71	0,99
Mittelwert		7,65	86,34			21,13	8.100	7,70	0,68	
Standardabweichung		1,32	7,10			2,12	1.627	0,69	0,02	
Variationskoeffizient		17,19	8,22			10,06	20,08	8,93	3,18	
22.09. gefestigt mit S	I	7,14	71,10	0,94	0,95	19,50	12.000	7,84	0,54	0,99
	II	11,60	76,05	0,99	0,95	19,60	12.900	9,76	0,66	0,99
	III	11,93	75,32	0,98	0,95	19,30	10.000	10,23	0,55	0,98
Mittelwert		10,22	74,16			19,47	11.600	9,28	0,58	
Standardabweichung		2,18	2,18			0,12	1.212	1,03	0,05	
Variationskoeffizient		21,37	2,94			0,64	10,45	11,14	9,32	

Ermittlung der Regressionskoeffizienten der im Versuch ermittelten Spannungs-Dehnungs-Linien der RILEM-Körper aus Ziegeln bzw. Sandsteinen

Roter Wesersandstein		$\sigma = a \cdot \varepsilon - (a^{**2} \cdot \varepsilon^{**2})/b$ (Gl. 5.2)						$\sigma = a \cdot \varepsilon^{**b}$ (Gl. 5.4)		
ungefestigt		Regressionskoeffizienten		Bestimmtheits- maß r^2	$\beta_{D,mö}$ N/mm ²	$\beta_{D,mw}$ N/mm ²	E-Modul N/mm ²	Regressionskoeffizienten		Bestimmtheits- maß r^2
Datum	Nr.	a	b					a	b	
-	-	-	-	-	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	-	-	-
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
07.08.	I	5,65	76,46	0,98	1,10	17,70	6.000	5,91	0,71	0,99
	II	6,13	81,42	0,97	1,10	20,00	6.700	6,60	0,67	0,99
	III	5,80	80,47	0,98	1,10	19,70	6.000	6,29	0,68	0,99
Mittelwert		5,86	79,45			19,13	6.233	6,27	0,69	
Standardabweichung		0,20	2,15			1,02	330	0,28	0,02	
Variationskoeffizient		3,42	2,71			5,34	5,29	4,50	2,48	
04.09.	I	8,25	65,98	0,98	1,07	16,90	8.800	7,79	0,58	0,99
gefestigt	II	7,98	80,11	0,97	1,07	20,20	8.700	7,93	0,66	0,99
mit T	III	8,67	54,10	0,97	1,07	14,30	10.400	7,56	0,52	0,99
Mittelwert		8,30	66,73			17,13	9.300	7,76	0,59	
Standardabweichung		0,28	10,63			2,41	779	0,15	0,06	
Variationskoeffizient		3,42	15,93			14,09	8,38	1,97	9,78	
06.08.	I	5,58	56,50	0,97	0,93	14,80	7.100	5,85	0,59	0,99
gefestigt	II	7,57	67,08	0,97	0,93	17,70	7.900	7,29	0,64	0,99
mit S	III	4,80	68,04	0,95	0,93	16,10	6.200	5,38	0,67	0,99
Mittelwert		5,98	63,87			16,20	7.100	6,17	0,63	
Standardabweichung		1,17	5,23			1,19	694	0,81	0,03	
Variationskoeffizient		19,49	8,19			7,32	9,78	13,16	5,21	

Ermittlung der Regressionskoeffizienten der im Versuch ermittelten Spannungs-Dehnungs-Linien der RILEM-Körper aus Ziegeln bzw. Sandsteinen

Rüthener Grünsandstein		$\sigma = a * \epsilon - (a^{**2} * \epsilon^{**2}) / b$ (Gl. 5.2)						$\sigma = a * \epsilon^{**b}$ (Gl. 5.4)		
ungefestigt		Regressionskoeffizienten		Bestimmtheitsmaß r^2	$\beta_{D, mö}$	$\beta_{D, mw}$	E-Modul	Regressionskoeffizienten		Bestimmtheitsmaß r^2
Datum	Nr.	a	b					a	b	
-	-	-	-	-	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	-	-	-
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
17.07.	I	6,37	46,76	0,98	1,04	11,30	6.600	5,56	0,70	0,99
	II	6,57	46,46	0,98	1,04	12,00	7.000	5,72	0,66	0,99
	III	6,83	55,03	0,98	1,04	12,40	7.000	6,05	0,74	0,99
Mittelwert		6,59	49,42			11,90	6.900	5,78	0,70	
Standardabweichung		0,19	3,97			0,45	189	0,20	0,03	
Variationskoeffizient		2,86	8,04			3,82	2,73	3,53	4,67	
03.09.	I	4,64	329,20	0,99	1,55	10,30	4.800	4,65	0,95	0,99
gefestigt mit T	II	3,53	383,00	0,98	1,55	13,80	3.200	3,28	1,07	0,99
	III	8,47	50,08	0,98	1,55	13,10	9.400	7,01	0,61	0,99
Mittelwert		5,55	254,09			12,40	5.800	4,98	0,88	
Standardabweichung		2,12	145,92			1,51	2.628	1,54	0,19	
Variationskoeffizient		38,15	57,43			12,19	45,31	30,93	22,22	
14.08.	I	7,51	30,05	0,95	0,83	7,70	10.400	5,25	0,46	0,98
gefestigt mit S	II	6,67	49,47	0,97	0,83	11,70	7.300	5,90	0,69	0,99
	III	7,04	47,28	0,97	0,83	11,70	7.800	6,08	0,66	0,98
Mittelwert		7,07	42,27			10,37	8.500	5,74	0,60	
Standardabweichung		0,34	8,68			1,89	1.359	0,36	0,10	
Variationskoeffizient		4,86	20,55			18,19	15,99	6,21	16,92	

LEBENS LAUF

Persönliche Daten

geboren am	14.05.1963 in Göttingen
Familienstand	verheiratet
Staatsangehörigkeit	deutsch

Ausbildungsdaten

Schul Ausbildung	1969 - 1973	Grundschule in Kassel
	1973 - 1982	Gymnasium in Kassel Abschluß: Abitur
Auslandsaufenthalt	1982/83	sechsmonatiger Aufenthalt in England als Au-pair
Berufsausbildung	10/1983 - 05/1992	Studium Bauingenieurwesen an der Universität Hannover Vertiefungsrichtung: konstruktiver Ingenieurbau
	02/1988 - 03/1989	wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Massivbau der Universität Hannover

Berufliche Tätigkeiten

09/1992 - 08/1994	BGS Ingenieursozietät, Hannover
10/1994 - 03/1995	Ingenieurbüro Eilers & Vogel, Hannover
04/1995 - 03/1998	Fachhochschule Hannover, Fachbereich Bauingenieurwesen, wissenschaftliche Mitarbeiterin
seit 04/1998	Ingenieurbüro Iffert und Partner GmbH, Kassel, Geschäftsführerin