

## INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
1.1	Problemstellung und Ziel	1
1.2	Gliederung der Arbeit	2
2	BAUSTOFFE UND BAUGEFÜGE	5
2.1	Natursteine und ihre Bearbeitung	5
2.1.1	Einteilung der Gesteine	5
2.1.2	Eigenschaften der Natursteine	6
2.1.3	Natursteinbearbeitung	8
2.2	Historische Mörtel	9
2.2.1	Geschichtliche Entwicklung	9
2.2.2	Zusammensetzung und Eigenschaften	10
2.3	Mauerwerksverbände	13
2.4	Mauerwerksgefüge	15
2.4.1	Einschalige Wandgefüge	15
2.4.2	Mehrschalige Wandgefüge	16
2.4.3	Stützen	19
3	UNTERSUCHUNGEN ZUR DRUCKTRAGFÄHIGKEIT VON NATURSTEINMAUERWERK	20
3.1	Stand der Erkenntnisse	20
3.1.1	Einschalige Mauerwerksgefüge	20
3.1.2	Dreischalige Mauerwerksgefüge	22
3.2	Eigene Untersuchungen an einschaligen Mauerwerksgefügen	26
3.2.1	Versuchsprogramm	26
3.2.2	Baustoffe und Mauerwerksverbände	27
3.2.3	Versuchstechnik	29
3.2.4	Repräsentatives Gefügeelement	31
3.2.5	Festigkeit und Verformung unter zentrischer Belastung	33
3.2.6	Tragfähigkeit und Verformung unter exzentrischer Belastung	41
3.3	Eigene Untersuchungen an dreischaligen Mauerwerksgefügen	46
3.3.1	Versuchsprogramm	46
3.3.2	Baustoffe, Mauerwerksverbände und -gefüge	46
3.3.3	Versuchstechnik	50

3.3.4	Tragverhalten bei ebener Dehnungsverteilung	52
3.3.5	Tragverhalten bei Belastung der Innenschale	57
3.4	Zusammenfassung	58
4	TRAGMODELL FÜR EINSCHALIGE MAUERWERKSGEFÜGE	59
4.1	Bruchmodell	59
4.1.1	Stand der Erkenntnisse	59
4.1.1.1	Empirische Rechenansätze	59
4.1.1.2	Bruchmodell von Hilsdorf	61
4.1.1.3	Bruchkurven für Stein und Mörtel	63
4.1.1.4	Bruchmodell von Berndt	65
4.1.1.5	Bruchmodell von Sabha	67
4.1.1.6	Bruchmodell von Mann	69
4.1.2	Verifizierung der Bruchmodelle	71
4.1.2.1	Anpassung der Parameter	71
4.1.2.2	Beurteilung der Bruchmodelle	73
4.1.3	Verbessertes Bruchmodell	75
4.2	Werkstoffmodell	77
4.2.1	Stand der Erkenntnisse	77
4.2.2	Elastisch-plastisches Werkstoffmodell	77
4.2.3	Bruchschnittgrößen gedrungener Bauteile	79
4.3	Tragfähigkeit schlanker Bauteile	82
4.3.1	Schlankheit von Bauteilen aus Natursteinmauerwerk	82
4.3.2	Stand der Erkenntnisse	82
4.3.3	Deutung der Versuchsergebnisse unter exzentrischer Belastung	85
4.3.4	Ungewollte Exzentrizität	87
4.3.5	Einfluß von Schlankheit und Exzentrizität	90
4.3.6	Nachweis der Tragfähigkeit schlanker Bauteile	93
4.3.6.1	Gültigkeitsbereiche der Theorie I. und II. Ordnung	93
4.3.6.2	Nachweis nach Theorie I. Ordnung	94
4.3.6.3	Nachweis nach Theorie II. Ordnung	95
4.3.7	Vergleich mit dem Vorgehen bei künstlichem Mauerwerk	97
4.4	Zusammenfassung	99
5	TRAGMODELL FÜR MEHRSCHALIGE, KOHÄSIVE MAUERWERKSGEFÜGE	100
5.1	Ziel und Vorgehen	100
5.2	Stand der Erkenntnisse	102

5.3	Tragverhalten ungestörter Bereiche	103
5.3.1	Werkstoffmodell der Wetter- und Raumschale	103
5.3.2	Werkstoffmodell der kohäsiven Innenschale	103
5.3.3	Zusammenwirken der Schalen	105
5.3.4	Bruchschnittgrößen mehrschaliger Mauerwerksgefüge	106
5.3.4.1	Einflußgrößen	106
5.3.4.2	Einfluß der Schalenfestigkeit dreischaliger Mauerwerksgefüge	106
5.3.4.3	Einfluß der Schalendicke dreischaliger Mauerwerksgefüge	108
5.3.4.4	Einfluß der Schalenfestigkeit zweischaliger Mauerwerksgefüge	108
5.4	Tragverhalten in Störzonen	110
5.4.1	Überblick	110
5.4.2	Schalenverschiebung in der Störzone und Verbundansätze	112
5.4.3	Lastfälle und zugehörige Spannungszustände	113
5.4.4	Verbundmodell	115
5.4.4.1	Struktur des Schalenverbundes	115
5.4.4.2	Bruchkriterium der Grenzfläche	117
5.4.4.3	Verfügungen zum Lastabtrag des Schalenverbundes	118
5.4.4.4	Lasteinleitungslänge Lastfall I	120
5.4.4.5	Lasteinleitungslänge Lastfall II	122
5.4.5	Versagen der Innenschale	125
5.4.5.1	Bruchkriterium	125
5.4.5.2	Schub-Zugbruch der Konsole	127
5.4.5.3	Bruch der Innenschale	128
5.4.6	Biegebruch der Außenschale	129
5.5	Einfluß der Schlankheit	129
5.6	Zusammenfassung	129
6	TRAGMODELL FÜR MAUERWERKSGEFÜGE MIT NICHTKOHÄSIVER INNENSCHALE	131
6.1	Nichtkohäsive Innenschalen	131
6.2	Tragverhalten nichtkohäsiver Innenschalen	131
6.2.1	Druckbogenmodell	131
6.2.2	Silomodell	132
6.2.3	Modellübergänge und Anwendungskriterien	135
6.3	Tragverhalten des Mauerwerkgefüges	137
6.3.1	Anwendung des Silomodells	137

6.3.2	Abtrag äußerer Lasten	141
6.4	Zusammenfassung	142
7	SCHÄRFUNG DER TRAGMODELLE DURCH SONDIERUNG	144
7.1	Notwendigkeit und Umfang der Sondierung	144
7.2	Sondierung des Mauerwerkverbands	144
7.3	Sondierung des Mauerwerkgefüges	144
7.3.1	Sondierungsziele	144
7.3.2	Zerstörungsarme Verfahren	145
7.3.3	Zerstörungsfreie Verfahren	146
7.4	Sondierung der Baustoffeigenschaften	147
7.4.1	Wahl des Sondierungsverfahrens	147
7.4.2	Ermittlung der Druckfestigkeit von Stein- und Mörtelproben	147
7.4.3	Ermittlung der Mörteldruckfestigkeit in Abhängigkeit von der Bindemittelart und -struktur	149
7.4.4	Druckprüfung von Mauerwerkswürfeln	150
7.4.5	Prüfung von Fugenbohrkernen	151
8	BEURTEILUNG DER INTEGRITÄT	153
8.1	Merkmale der Integrität	153
8.2	Widerstand und Einwirkung	153
8.3	Nachweis der Integrität	154
8.4	Verifizierung der Integrität	155
9	UNTERSUCHUNGEN ZUR KONSOLIDIERUNG MEHRSCHALIGER MAUERWERKSGEFÜGE	157
9.1	Stand der Erkenntnisse	157
9.2	Eigene Untersuchungen zur Injektion und Vernadelung dreischaliger Mauerwerksgefüge	160
9.2.1	Versuchsprogramm	160
9.2.2	Konsolidierungstechnik	160
9.2.3	Einfluß der Injektion auf die Dehnsteifigkeit dreischaliger Mauerwerksgefüge	163
9.2.4	Einfluß der Injektion auf den Elastizitätsmodul der Innenschale	166
9.2.5	Einfluß der Injektion auf die Tragfähigkeit dreischaliger Mauerwerksgefüge	167

9.2.6	Einfluß der Injektion und Vernadelung auf die Lasteinleitungslänge	167
9.3	Stand der Erkenntnisse zum Auszieh Widerstand von Nadeln	168
9.3.1	Verbundverhalten von Nadeln	168
9.3.2	Ausziehversuche am Verbundkörper Nadel-Injektionsgut	171
9.3.3	Ausziehversuche am Verbundkörper Nadel-Injektionsgut-Naturstein	171
9.3.4	Ausziehversuche am Verbundkörper Nadel-Injektionsgut-Mauerwerk	174
9.4	Eigene Untersuchungen zum Auszieh Widerstand in der Fuge verankerter Nadeln	176
9.4.1	Versuchstechnik	176
9.4.2	Versagensmechanismen und Verbundbruchspannung	178
9.5	Zusammenfassung	181
10	WIRKUNGSMODELLE UND RISIKEN DER KONSOLIDIERUNG	183
10.1	Überblick und Vorgehen	183
10.2	Wirkungsmechanismen der Injektion	183
10.3	Hohlrauminjektion	186
10.3.1	Wirkungsmodell	186
10.3.2	Volumenbilanz der Injektion	188
10.3.3	Verifizierung des Wirkungsmodells	191
10.3.4	Risiken und Baustoffe	193
10.4	Penetration	196
10.4.1	Wirkungsmodell	196
10.4.2	Risiken und Baustoffe	198
10.5	Spaltinjektion	199
10.5.1	Wirkungsmodell	199
10.5.2	Risiken und Baustoffe	200
10.6	Vernadelung	200
10.6.1	Wirkungsmodell	200
10.6.2	Risiken und Baustoffe	202
10.7	Zusammenfassung	203
11	ZIELE UND PLANUNGSSCHRITTE DER KONSOLIDIERUNG	204
11.1	Konsolidierungsziele	204
11.2	Planungsschritte	205
11.3	Konsolidierung der Dauerhaftigkeit	206

11.4	Konsolidierung der Tragwirkung	206
11.5	Konsolidierung der Tragfähigkeit	208
12	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	210
13	LITERATUR	213
	ANHANG	224