



Universität Stuttgart

Institut für Werkstoffe im
Bauwesen

Abt. Befestigungs- und
Verstärkungsmethoden

Zusammenfassung

Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln in Vollsteinen unter Berücksichtigung der Materialeigenschaften und Materialzusammensetzung

Prof. Dr.-Ing. Jan Hofmann

Dipl.-Ing. Carolin Kurz

Die Vervielfältigung und Veröffentlichung des Prüfberichts in vollem als auch gekürztem Wortlaut sowie die Verwendung zur Werbung ist nur mit der schriftlichen Genehmigung des Instituts für Werkstoffe im Bauwesen und nur innerhalb eines Zeitraums von 2 Jahren nach der Ausstellung zulässig. Gerichtsstand und Erfüllungsort ist Stuttgart. Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die Prüfgegenstände.



Pfaffenwaldring 4
70569 Stuttgart

<http://iwb.uni-stuttgart.de>



1 Ziel des Forschungsvorhabens

Das Tragverhalten von Kunststoffdübeln in Mauerwerk ist bisher noch nicht ausreichend untersucht worden. In der Regel sind die Erfahrungen aus der Anwendung von Kunststoffdübeln in Beton auf der sicheren Seite liegend übertragen worden. Das Prüfprogramm für Versuche in Vollsteinmauerwerk ist bislang weitgehend identisch mit dem Prüfprogramm für Versuche in Beton. Dies gilt auch für die Ableitung der charakteristischen Lasten aus den Versuchsergebnissen. Diese geringeren Erfahrungswerte bzw. die geringere Anzahl an systematisch durchgeführten Versuchen in Steinen im Vergleich zu Beton werden bei der Bemessung durch einen erhöhten Materialteilsicherheitsbeiwert berücksichtigt. Vorversuche zeigen, dass Versuchsergebnisse trotz Berücksichtigung der Steindruckfestigkeit und Steinfeuchte stark streuen können. Grund hierfür ist, dass nicht nur die Steinfestigkeit und der Feuchtegehalt, sondern auch die Zug- und Biegezugfestigkeit, die chemische Zusammensetzung und der Sinterungsprozess einen Einfluss auf die Tragfähigkeit eines Kunststoffdübels in Voll- und Hohlmauerwerk haben können.

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, für die beiden Steinarten Kalksandvollstein und Mauerziegel mögliche Zusammenhänge zwischen Dübeltragfähigkeit, Steindruckfestigkeit, Zugfestigkeit, chemischer Zusammensetzung und Sinterungsprozess festzustellen und gegebenenfalls die einzelnen Einflüsse zu quantifizieren. Mit den Ergebnissen des Forschungsvorhabens soll Verbesserungspotential für die ETAG 020 überprüft und identifiziert und Vorschläge anhand der versuchstechnisch ermittelten Ergebnisse formuliert werden. Durch die Erarbeitung eines Modells zur Bestimmung des Einflusses maßgebender Mauersteineigenschaften auf die Dübeltragfähigkeit kann der Anwendungsbereich der ETAG 020 erweitert werden und Versuche vor Ort am Bauwerk vermieden werden.

2 Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm beinhaltete Kalksandvollsteine und Vollziegel. Dabei wurden aus jedem Material Steine zweier verschiedener Hersteller und je Hersteller drei verschiedener Chargen untersucht. Somit waren insgesamt zwölf Stein-Chargen zu untersuchen. Die Eigenschaften der Steine können in mechanische, physikalische, chemische und petrographische Eigenschaften unterteilt werden. Eine Übersicht der untersuchten Eigenschaften zeigt Tabelle 2.1.

Tabelle 2.1: Einteilung der Materialeigenschaften

Materialeigenschaften			
mechanische	physikalische	chemische	petrographische
Druckfestigkeit	Trockenrohddichte	kristalline	Gefüge
E-Modul	Reindichte	Zusammensetzung	Kornform
Biegezugfestigkeit	Porosität		Kornverteilung
Spaltzugfestigkeit			Porenverteilung

Die verwendeten Steine wurden direkt vom Hersteller bezogen. Bei den Ziegelvollsteinen konnten die verschiedenen Chargen durch Steine verschiedener Formate nachvollzogen werden. Untersucht wurden Steine der Formate NF, 2 DF, 3 DF und 4 DF. Die Kalksandvollsteine des ersten Herstellers hatten alle ein Format von 6 DF, die Steine des zweiten Herstellers ein Format von 4 DF. Die Steine wurden vor der Lieferung unter keinen bestimmten definierten Bedingungen, sondern im trockenen Innenraum gelagert.



Die Unterschiede zwischen den Chargen der jeweiligen Hersteller ergeben sich primär aus der Abfolge und der Dauer des Brenn- beziehungsweise des Härtungsvorgangs. Wenn Steine aus unterschiedlichen Chargen stammen bedeutet dies, dass die Steine zu verschiedenen Zeitpunkten und nicht aus derselben Grundmischung hergestellt wurden. Die Mischungsentwürfe bleiben dabei grundsätzlich die gleichen. Dennoch können auch Abweichungen durch unterschiedliche Brenntemperaturen und die unterschiedlichen Formate bedingt sein. Beispielsweise entstehen bei größeren Ziegelsteinen in der Regel mehr Brennrisse als bei kleineren Steinformaten.

3 Beschreibung der durchgeführten Versuche zur Bestimmung der Materialeigenschaften

Die Druckfestigkeit wurde zum einen an ganzen Steinen und zum anderen an zylindrischen Materialproben geprüft. Da die zylindrischen Prüfkörper einen Durchmesser von 55 mm besaßen und somit im Verhältnis zu den Steinen relativ klein waren, variierten die Ergebnisse zum Teil stark. Bevor der statische Elastizitätsmodul an diesen Probezylindern ermittelt werden konnte, musste zunächst die Druckfestigkeit bestimmt werden. Als Probekörper dienten auch hierzu Zylinder mit einem Durchmesser von 55 mm.

Die Prüfung des statischen Elastizitätsmoduls wurde in Anlehnung an die Norm für die Prüfung von Beton durchgeführt, da es für Mauersteine derzeit keine eindeutigen Vorschriften gibt. Für die Ermittlung der Biegezugfestigkeit wurden aus den Steinen Prüfkörper herausgesägt und im Drei-Punkt-Biegeversuch geprüft. Die Spaltzugfestigkeit wurde an zylindrischen Proben ebenfalls in Anlehnung an Versuche mit Betonprüfkörpern ermittelt.

Durch die Kenntnis der Trockenrohdichte und Reindichte kann die Gesamtporosität der Steine bestimmt werden. Dazu wurde zunächst die Trockenrohdichte bestimmt, indem Prüfkörper verschiedener Geometrien im Ofen getrocknet, vermessen und gewogen wurden. Die Reindichte wurde mit dem Verfahren der Helium-Pyknometrie ermittelt. Mit Hilfe der Analyse von Dünnschliffaufnahmen konnte auch das Quarzkorngefüge der Ziegel- und Kalksandsteine und das Porengefüge der Kalksandsteine untersucht werden. Dazu wurden zunächst mit einem Scanner digitale Aufnahmen der Dünnschliffe gemacht und diese dann mit einer speziellen Software untersucht. In zwei getrennten Auswertungen konnten die Eigenschaften der Poren sowie die Eigenschaften der Quarzkörner bestimmt werden. Die für diese Auswertung interessanten Eigenschaften sind die Gesamtanzahl der entsprechenden Flächen im Messbereich, die Gesamtfläche aller Körner bzw. Poren im Messbereich, die mittlere, minimale und maximale Fläche eines Kornes bzw. einer Pore, Länge und Breite eines Kornes bzw. einer Pore, das jeweilige Verhältnis Länge zu Breite und die Rundheit.

An ihre Grenzen stößt diese Ermittlungsmethode bei der Untersuchung der Porenanzahl und Porengestalt beim Ziegelstein. Bei den betrachteten Proben war es nicht möglich, den Porenanteil in der realistischen Größenordnung zu ermitteln. Grund hierfür war die sehr geringe Größe der Poren, sodass die kleinsten Poren entweder farblich nicht sichtbar waren oder auf der Aufnahme des Scanners nicht zu erkennen waren. Aus diesen Gründen konnte für die Proben aus Ziegelstein keine Auswertung der Porosität erfolgen. Jedoch ist es möglich, die Riss- und Porenstruktur der Ziegelproben qualitativ zu beschreiben. Es zeigte sich, dass die Proben der Steine größerer Formate mehr Risse, größere Risse und mehr zusammenhängende Porenräume aufweisen als Steine kleiner Formate.

Die Anteile und geometrischen Eigenschaften der im Stein enthaltenen Quarzkörner konnte für alle Chargen ermittelt werden. Dabei fällt auf, dass der Quarzanteil sehr schwankt. Bei den Ziegelsteinen konnte ein Quarzanteil zwischen ca. 14% und ca. 20% ermittelt werden, bei den Kalksandsteinproben wurden hingegen ein Anteil bis zu 40% Quarz festgestellt. Neben den geometrischen Eigenschaften wie Größe und Verhältnis Länge zu Breite der Körner konnte auch die Korngrößenverteilung ermittelt und in Histogrammen wiedergegeben werden.



Mit Hilfe der Röntgenbeugungsanalyse können die kristallinen Bestandteile der verwendeten Steine bestimmt werden. Die Röntgenbeugungsanalyse (auch Röntgendiffraktometrie genannt) arbeitet mit einer Röntgenstrahlung von bestimmter Wellenlänge und nutzt die auf den Netzebenen der Minerale gebeugten, durch Interferenz verstärkten Strahlen unter Registrierung ihres Beugungswinkels und ihrer Intensität. Die daraus zu berechnenden Abstände der Netzebenen sind eine mineralspezifische Kenngröße und erlauben durch Vergleich mit Röntgendiagrammen bekannter Mineralarten, den Mineralgehalt und Mineralanteil zu bestimmen. Anhand des gewählten Verfahrens ist nur eine qualitative Auswertung möglich, das heißt es kann nur grob bestimmt werden, wie groß der Anteil eines im Stein enthaltenen Minerals ist. Bei den Ziegelsteinen ist es unter bestimmten Umständen möglich, durch die Mineralgehalte einen Rückschluss auf den Brennvorgang ziehen zu können, da manche Minerale bei bestimmten Temperaturen während des Brennvorgangs gebildet werden beziehungsweise zerfallen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Unterschiede zwischen den verschiedenen Chargen der Ziegelsteine relativ gering waren. Auch bei den untersuchten Kalksandsteinen konnten nur sehr geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Proben festgestellt werden.

4 Dübelauszugversuche

Zur Ermittlung der Dübeltragfähigkeit wurden zentrische Zugversuche nach ETAG 020 im Einzelstein durchgeführt. Das Versuchsprogramm beinhaltete fünf verschiedene Kunststoffdübel verschiedener Hersteller und Größen. Alle gewählten Dübel besitzen entweder eine gültige europäisch technische Zulassung (ETA) oder eine bauaufsichtliche Zulassung. Die verwendeten Kunststoffdübel wurden alle aus Polyamid hergestellt. Die Montage der Dübel erfolgte nach Montageanleitung im Einzelstein. Die Bohrlöcher wurden gereinigt, anschließend wurden die Dübel in Durchsteckmontage gesetzt. Bohrerschneideneckmaß, Bohrmaschine, Bohrlochtiefe, und Anbauteilabmessungen wurden protokolliert.

Das Anbauteil war Teil einer Traverse, in die eine Gewindestange eingeschraubt war. Diese Gewindestange wurde durch den hydraulischen Lastzylinder und eine Kraftmessdose geführt und mit einer Mutter fixiert. Die Verschiebung des Dübels wurde mit einem Wegaufnehmer gemessen, der über einen an einem Drahtseil befestigten Magneten mit der Dübelschraube verbunden war. Last und Verschiebung wurden mit einem kommerziellen Messprogramm aufgezeichnet.

Durch eine leichte Einspannung der Ziegelsteine wurde versucht bei allen Versuchen ein Spaltversagen der Steine zu vermeiden. Vereinzelt kam es dennoch zu solch einem Spalten der Steine. Bei dem Großteil der Versuche konnte jedoch Dübelauszug oder Steinausbruch beobachtet werden. Bei den Versuchen in den Kalksandsteinen variierte die Höchstlast innerhalb einer Charge und auch innerhalb der Chargen eines Herstellers nur wenig. Trotz gleicher Verankerungstiefe und Schraubengröße konnten jedoch auch Unterschiede zwischen den Dübel festgestellt werden, da diese unterschiedlich verspreizen. Die Streuung der Versuchsergebnisse innerhalb der Chargen und Hersteller in Kalksandsteinen war mit ca.10 % eher gering.

Eine wesentlich höhere Streuung konnte bei den Versuchen in den Ziegelsteinen des einen Herstellers beobachtet werden. Hier wurde bei zwei Versuchsserien ein Variationskoeffizient von über 30% und bei weiteren vier Serien ein Variationskoeffizient von deutlich über 10% festgestellt. Vermutlich ist dies auf die in den Steinen vorhandenen Schwindrisse zurückzuführen. Die Streuung der Ergebnisse war bei den kleinformatigen Steinen (NF) tendenziell etwas geringer als bei den großformatigen Steinen. Die Höchstlasten aller Dübel in den Ziegelsteinen aus einer Charge mit Brennrisen lagen deutlich unter den Höchstlasten die in Ziegelsteinen zweiten Herstellers ermittelt wurden. Hier ist ein ausgeprägter Einfluss des Steinherstellers auf die Tragfähigkeit in Ziegelvollsteinen festzustellen.



5 Analyse der Zusammenhänge

5.1 Zusammenhang zwischen Dübeltragfähigkeit und Druckfestigkeit

Anhand einer Normierung der Versuchsergebnisse der Dübelauszugversuche auf eine einheitliche Steindruckfestigkeit konnte deren Zusammenhang dargestellt werden. Nach den aktuellen Normen ist bei Versuchen in Beton und Mauerwerk die Dübeltragfähigkeit über eine Wurzelfunktion auf eine einheitliche Druckfestigkeit zu normieren. Innerhalb der Chargen eines Herstellers können die Höchstlasten über die Normierung unter Ansatz einer Wurzelfunktion umgerechnet werden. Bei den Versuchen mit Kalksandsteinen ergeben sich innerhalb der Chargen eines Herstellers nach der Normierung vergleichbare Lasten, d.h. eine Normierung über die Wurzelfunktion zur Berücksichtigung der Steindruckfestigkeit ist weitestgehend möglich. Allerdings konnte hier nur der Zusammenhang der Dübeltragfähigkeit mit der Steindruckfestigkeit (an ganzen Steinen ermittelt) festgestellt werden. Ein Zusammenhang zwischen der Dübeltragfähigkeit und der Zylinderdruckfestigkeit (an zylindrischen Proben ermittelt) konnte nicht erkannt werden.

Grundsätzlich zeigte sich, dass die Höchstlasten in Ziegelvollsteinen um bis zu 60% unter den Höchstlasten der Versuche in Kalksandsteinen lagen. Auch innerhalb der Steine eines Ziegelsteinherstellers kam es zu großen Unterschieden hinsichtlich der Höchstlast. Bei Mauerziegeln bleibt die Beschaffenheit des Materials bisher gänzlich unberücksichtigt. Wird der Dübel jedoch direkt in einen klaffenden Schwindriss gesetzt, kann er nur geringere Last aufnehmen als in ungerissenem Material. Die vorhandenen Schwindrisse können damit die Tragfähigkeit der Dübel negativ beeinflussen. Die Steindruckfestigkeit wird hingegen kaum durch diese Schwindrisse beeinflusst.

5.2 Zusammenhang zwischen Dübeltragfähigkeit und statischen Elastizitätsmodul

Im Weiteren wurde der Zusammenhang zwischen Dübeltragfähigkeit und statischem Elastizitätsmodul analysiert. Für die Normierung in Abhängigkeit des statischen Elastizitätsmoduls wurde als erste Näherung eine Wurzelfunktion herangezogen. Beim Vergleich der normierten mit den gemessenen Lasten ist zu erkennen, dass sich wie bei der Steindruckfestigkeit eine gute Anpassung der Werte unterschiedlicher Chargen erzielen lässt. Vor allem in Kalksandsteinen kann durch die Normierung über den Elastizitätsmodul das Tragverhalten der Dübel gut abgeschätzt werden. Nach der Normierung der Höchstlasten liegen die Mittelwerte der Versagenslasten aller Chargen beider Hersteller auf vergleichbarem Niveau. Daraus kann festgestellt werden, dass das E-Modul eine starke Korrelation zur Dübeltragfähigkeit in Kalksandvollsteinen aufweist.

Bei den Ziegelsteinen hingegen wird ist kaum ein Einfluss des E-Moduls festzustellen. Betrachtet man allerdings die Werte aller Versuchsserien (Ziegel + Kalksandstein) als Ganzes, fällt auf, dass sich mit zunehmendem E-Modul auch höher Tragfähigkeiten ergeben. Werden nur die Ergebnisse der Ziegelsteine für sich betrachtet, kann nur ein sehr geringer Zusammenhang festgestellt werden.

Die Korrelation zwischen E-Modul und Dübeltragfähigkeit scheint jedoch am ehesten ausgeprägt zu sein, so dass hier vor allem für Mauerziegel mehr Versuche durchgeführt und die Bandbreite des E-Moduls vergrößert werden sollte.



5.3 Zusammenhang zwischen Dübeltragfähigkeit und Biegezugfestigkeit

Um den Zusammenhang zwischen Dübeltragfähigkeit und Biegezugfestigkeit zu ermitteln wurden die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen dahingehend ausgewertet. In erster Näherung wurde eine Normierung mit Hilfe einer Wurzelfunktion vorgenommen. Bei den Versuchen in Kalksandsteinen liegen die normierten Mittelwerte auf einem vergleichbaren Niveau, so dass hier auch eine Normierung über die Biegezugfestigkeit erfolgen kann. Bei den Ziegelvollsteinen lässt sich kein einheitlicher Trend erkennen. Bei einem Hersteller ist nahezu kein Einfluss der Biegezugfestigkeit auf das Tragverhalten der Dübel zu erkennen, bei dem anderen Hersteller ist dieser Einfluss ausgeprägter und fast mit dem bei Kalksandsteinen vergleichbar. Auch zur genaueren Analyse dieses Zusammenhangs sollten weitere Versuchsserien, vor allem mit einer großen Bandbreite von unterschiedlichen Ziegeln, durchgeführt werden.

5.4 Zusammenhang zwischen Dübeltragfähigkeit und Spaltzugfestigkeit

Im Gegensatz zur Biegezugfestigkeit konnte bei der Normierung auf eine einheitliche Spaltzugfestigkeit kein direkter Zusammenhang zwischen Dübeltragfähigkeit und Spaltzugfestigkeit hergestellt werden. Eine Berücksichtigung der Spaltzugfestigkeit zur Bemessung von Kunststoffdübeln in Vollsteinen scheint somit sowohl für Ziegel- als auch für Kalksandsteine nicht zielführend.

5.5 Zusammenhang zwischen Dübeltragfähigkeit und Roh- bzw. Reindichte

Sowohl bei der Trockenrohndichte als auch bei der Reindichte liegen die Messwerte aller Steine relativ nahe bei einander. Bei der Rohndichte liegen diese im Bereich zwischen $1,78 \text{ kg/dm}^3$ und $1,96 \text{ kg/dm}^3$ mit einem Variationskoeffizienten von rund 2%. Bei der Reindichte liegen die Minimal- und Maximalwerte mit $2,68 \text{ kg/dm}^3$ und $2,74 \text{ kg/dm}^3$ noch enger zusammen. Während bei der Rohndichte die Werte bei den Ziegeln etwas geringer sind als bei den Kalksandsteinen, ist bei der Reindichte keine Abgrenzung möglich. Die Werte der Ziegelsteine streuen lediglich etwas mehr als die Werte der Kalksandsteine. Auch unter Ansatz eines quadratischen Zusammenhangs zwischen Dübeltragfähigkeit und der Roh- und Reindichte konnte wegen der geringen Unterschiede zwischen den Proben keinerlei Zusammenhang festgestellt werden. Eine Berücksichtigung der Roh- oder Reindichte in der hier vorliegenden Größenordnung zur Bemessung von Kunststoffdübeln in Vollsteinen scheint somit nicht zielführend.

5.6 Zusammenhang zwischen Dübeltragfähigkeit und in den Ziegelsteinen vorhandenen Schwindrisse

Die kleinformatischen Ziegelsteine (NF) enthalten im Gegensatz zu den Steinen mit größeren Formaten kaum Schwindrisse oder zusammenhängende Poren. Es ist zu erkennen, dass die Mittelwerte der Höchstlasten unabhängig vom Dübeltyp in den Steinen des Formats NF über denen der anderen Chargen (größere Formate) liegen. Auch die Streuung der Höchstlasten ist bei den Versuchen in den Steinen des Formats NF etwas geringer als bei den Versuchen mit größeren Steinformaten.

Die meisten und am weitesten klaffenden Schwindrisse können in den Steinen der Charge mit dem größten Format (4DF) beobachtet werden. Sowohl auf den Dünnschliffaufnahmen als auch bei Betrachtung der Steine selbst ist zu erkennen, dass die Steine von Rissen durchzogen sind und diese im Millimeterbereich aufklaffen. Entsprechend dazu wurden mit allen Dübeln in Steinen dieser Charge die geringsten Auszuglasten erzielt. Die Variationskoeffizienten der Höchstlasten waren mit Werten bis zu 33% sehr hoch. Die Steine des Formats 3DF zeigten ebenfalls viele Schwindrisse mit großen Rissbreiten. Der Unterschied zwischen den Rissen in den großformatigen Steinen der beiden Hersteller bestand darin, dass sich die Risse in den Steinen des Formats 4DF geradlinig durch den gesamten Stein zogen.



Dahingegen verliefen die Risse in den Steinen des Formats 3DF eher von der Mitte aus dreidimensional durch den Stein.

Ein Problem besteht darin, den Einfluss der Schwindrisse in Bezug auf die Dübeltragfähigkeit zu quantifizieren, da es keinen greifbaren Wert für die „Gerissenheit“ der Steine gibt. Es ist jedoch deutlich zu erkennen, dass die Dübeltragfähigkeit in Ziegelsteinen mit einem hohen Anteil an Schwindrissen abnimmt. Bei Ziegelsteinen kann daher davon ausgegangen werden, dass das Format und die dadurch Herstellungsbedingten Risse einen großen Einfluss auf die zu erwartenden Dübeltragfähigkeit bzw. die zu erwartenden Streuung der Versuchsergebnisse hat.

5.7 Zusammenhang zwischen Dübeltragfähigkeit und Porosität der Kalksandsteine

Die Ergebnisse der Porenanalyse der Kalksandsteine zeigen, dass der Anteil und die mittlere Größe der Poren bei allen Chargen nahezu identisch sind. Unter diesen Gesichtspunkten kann keine Analyse des Zusammenhangs zwischen Poren und Dübeltragfähigkeit erfolgen. Die mittlere Porengröße und der Porenanteil in den hier vorliegenden Größenordnungen haben keinen Einfluss auf die Dübeltragfähigkeit. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass der Porenanteil und die Porengröße aller Chargen in einem sehr engen Bereich lagen. Bei größeren Abweichungen (extremen Porenanteilen) kann eine Abhängigkeit nicht unbedingt ausgeschlossen werden.

Die Auswertung des Verhältnisses Länge zu Breite der Poren zeigt, dass die Poren der Steine des zweiten Herstellers mit Werten von 3,0 bis 3,1 etwas länglicher sind als die Poren der Steine des ersten Herstellers mit Werten um 2,75. Jedoch sind auch diese Unterschiede sehr gering. Durch eine Normierung auf ein einheitliches Verhältnis von Porenlänge zu Porenbreite mit einer quadratischen Gleichung kann eine brauchbare Übereinstimmung erzielt werden. Der Einfluss dieses Verhältnisses könnte aufgrund der Rissbildung im Material einen Einfluss auf die Tragkraft haben, da durch die Porenform der bruchmechanische Rissfortschritt bestimmt wird. Allerdings sollte dieses Phänomen noch genauer untersucht werden, da bei den hier durchgeführten Versuchsserien die Unterschiede zwischen den einzelnen Chargen nur sehr gering waren.

5.8 Zusammenhang zwischen Dübeltragfähigkeit und Quarzkorngefüge

Da es beim Verhältnis von Länge zu Breite der Quarzkörner bei allen Steinen nur sehr geringe Unterschiede gibt, wird dieses zur Analyse der Zusammenhänge nicht weiter herangezogen. Sehr große Unterschiede bestehen dagegen bei der mittleren Größe der Quarzkörner. Während die Größe der Körner bei den Ziegelsteinen im Durchschnitt unter $5000 \mu\text{m}^2$ beträgt, sind die Körner der Kalksandsteine drei bis viermal so groß. Bei Betrachtung der Abhängigkeit der Dübeltragfähigkeit von der Korngröße ist jedoch zu erkennen, dass sich bei den Kalksandsteinen die mittleren Höchstlasten trotz großer Unterschiede bei der Korngröße nur geringe Abweichungen zeigen, während sich bei den Ziegelsteinen keine Tendenz erkennen lässt.

Die untersuchten Kalksandsteine weisen zudem einen höheren Anteil an Quarzkörnern als die Ziegelsteine auf. Den höchsten Anteil weisen die Steine des Hersteller HD mit bis zu 39% auf, den geringsten die Steine des Herstellers WB mit 14%. Beim Vergleich der Auszuglasten mit dem Quarzkornanteil ist erkennbar, dass bei den Kalksandsteinen eine ansteigende Tendenz besteht, während sich bei den Ziegelsteinen scheinbar kein Zusammenhang erkennen lässt. Bei den untersuchten Kalksandsteinen kann eine leichte Korrelation zwischen Größe der Quarzkörner und der Dübeltragfähigkeit festgestellt werden, bei den Ziegelsteinen kann kein Zusammenhang festgestellt werden.



5.9 Zusammenhang zwischen Dübeltragfähigkeit und mineralischen Inhaltsstoffen

Die Unterschiede der kristallinen Inhaltsstoffe bei den Ziegelsteinen bestehen zum einen darin, dass in den Steinen unterschiedliche Arten von Feldspäten enthalten sind. Da sich die Arten der einzelnen Feldspäte in ihren Eigenschaften nicht maßgeblich unterscheiden, kann über diesen Zusammenhang mit der Dübeltragfähigkeit ohne weitere Untersuchungen keine Aussage getroffen werden. Ein zweiter Unterschied besteht darin, dass manche Proben das Mineral Gehlenit enthalten. Dieses gilt als Indiz für einen schwachen Brand, da es ab Temperaturen von etwa 600°C zerfällt.

Bei den mineralischen Bestandteilen der Kalksandsteine gibt es nur geringe Unterschiede, zum Beispiel enthalten die Steine des einen Herstellers Dolomit in der Gesteinskörnung. Allerdings lässt sich keine Verbindung zwischen Inhaltsstoffen und Dübeltragfähigkeit erkennen.

5.10 Die Versagensart im Zusammenhang mit der Druckfestigkeit

Die überwiegende Versagensart war das Herausziehen des Kunststoffdübels aus dem Stein. Bei einem Dübel trat ausschließlich Herausziehen auf, bei drei weiteren Dübeln entweder Herausziehen oder Herausziehen mit oberflächlichem Steinausbruch. Nur ein Dübel konnte einen Steinausbruch über die volle Verankerungslänge hervorrufen. Ebenfalls ausschließlich bei diesem Dübel trat bei drei Chargen der Ziegelsteine Spalten auf. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die Versagensart in erster Linie vom verwendeten Dübel abhängt.

5.11 Unveröffentlichte Ergebnisse von Dübelherstellern / Forschungseinrichtungen

Durch die Auswertung der Ergebnisse von Dübelherstellern / Forschungseinrichtungen konnten die am IWB erzielten Ergebnisse weitgehend bestätigt werden. Allerdings wurden nur die Materialparameter Druckfestigkeit und Rohdichte ermittelt, sodass über alle anderen Zusammenhänge keine Auswertungen durchgeführt werden können.

6 Schlussfolgerung

Bei den Ziegelsteinen war nahezu kein bzw. nur ein sehr geringer Zusammenhang zwischen den hier untersuchten Materialeigenschaften und der Tragfähigkeit der verwendeten Kunststoffdübel erkennbar. Für die praktische Anwendung bedeutet dies, dass der aktuell gültige Teilsicherheitsbeiwert für die Bemessung von Kunststoffdübeln in Vollsteinmauerwerk von $\gamma_M = 2,5$ sicherlich gerechtfertigt ist und ohne weitere Untersuchungen nicht reduziert werden kann. Dies ist vor allem dadurch Begründet, dass die vorhandenen Schwindrisse bei der Herstellung einen großen Einfluss haben. Diese können jedoch bei einer Bemessung nicht Berücksichtigt werden. Zusätzliche Versuchsserien mit weiteren Steinen und Dübeln könnten in Bezug auf den statischen Elastizitätsmodul, die Biegezugfestigkeit und den Quarzgehalt erfolgen. Hier konnte ein geringfügiger Zusammenhang festgestellt werden. Die Bandbreite der hier durchgeführten Versuche reicht allerdings nicht aus, um eine Aussage über diese Zusammenhänge zu treffen, sodass weitere Versuchsergebnisse nötig wären um die Frage nach eventuellen Zusammenhängen zwischen der Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln und des statischen Elastizitätsmoduls, der Biegezugfestigkeit und des Quarzanteils von Ziegelsteinen zu klären.

Im Fall der Kalksandvollsteine konnte ein Zusammenhang zwischen der Tragfähigkeit der verwendeten Kunststoffdübel und den Materialeigenschaften Steindruckfestigkeit, statischer Elastizitätsmodul, Biegezugfestigkeit, Anteil an Quarz sowie des Verhältnisses Länge zu Breite der Poren festgestellt werden. In welchem Maß diese Eigenschaften Auswirkungen auf die Dübeltragfähigkeit haben, sollte in weiteren Versuchsserien eingehender untersucht



werden. Da hier nur Steine zweier verschiedener Hersteller untersucht wurden, sollte die Datenbasis um weitere Hersteller erweitert werden, um das breite Feld der auf dem Markt vorhandenen Steine besser abzudecken. Können die Materialeigenschaften der Kalksandsteine und deren Zusammenhang zur Dübeltragfähigkeit weiter eingegrenzt werden, so wäre eine Reduzierung des bisher zur Bemessung angewandten Sicherheitsbeiwertes für das Material von $\gamma_M = 2,5$ möglich.