

DIPLOMARBEIT
Master Thesis

**Experimentelle Untersuchungen von
nachträglich installierten Dübelsystemen an
Natursteinstufen der Wiener Gründerzeit**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs

unter Anleitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Andreas Kolbitsch**

und

Proj.Ass. Dipl.-Ing. **Gerhard Kidery**

E206

Institut für Hochbau und Technologie
Forschungsbereich für Hochbaukonstruktionen und Bauwerkserhaltung

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Tobias Studener, BSc

0928736

Gentzgasse 21/2/18, 1180 Wien
Lacknerbauernweg 7, 5411 Oberalm

Wien, April 2017

Tobias Studener

Danksagung

In erster Linie möchte ich mich bei Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Kolbitsch dafür bedanken, dass er mir ermöglicht hat diese Diplomarbeit am Institut für Hochbau und Technologie zu verfassen. Während des Studiums haben mich seine Vorlesungen stets inspiriert und letztendlich auch dazu motiviert, mich mit dem Thema der Natursteinsteigen auseinanderzusetzen

Ein ganz besonderer Dank gilt meinem Betreuer Proj.Ass. Dipl.-Ing. Gerhard Kidery, der stets ein offenes Ohr für mich hatte und mich sowohl fachlich als auch emotional sehr gut unterstützt hat.

Bei meinem langjährigen Schulfreund Dipl.-Ing. Michael Schwenn, Bsc möchte ich mich für die kompetente und fachliche Unterstützung bei Fragen zur Befestigungstechnik bedanken.

Des weiteren möchte ich mich bei den Mitarbeitern des Instituts bedanken, da sie mich sehr herzlich aufgenommen haben und mich auch fachlich bei dieser Arbeit unterstützt haben. Besonders erwähnen möchte ich, Barbara Bucher, Viktor Dunjic, Michael Höflinger, Michael Jamek, Aleksander Radoevski und Andreas Rudisch (in alphabetische Reihenfolge und ohne Titel).

Ohne meine Studienkollegen wäre das Studium vermutlich doppelt so hart gewesen. Besonders hervorheben möchte ich Katharina Rieger. In unseren gemeinsamen Lernheiten hat sie mich immer motiviert und ermutigt.

Für die schöne gemeinsame Studienzeit möchte ich, Kolo Fischbach, Patrick Gabriel, Barbara Laa, Benno Larch, Michael Ouschan, Daniel Peter, Dieter Plank, Stefan Pillwein, Benno Schmieder, Felix Schobesberger, Max Steiner und Anja Ziniel danken (in alphabetische Reihenfolge und ohne Titel). Durch sie wurde die Studienzeit zu einer wunderbaren Erfahrung.

Meiner Freundin Lisa möchte ich dafür danken, dass sie mir als verlässliche Partnerin stets zur Seite gestanden ist und mich auch in schwierigen Situationen immer unterstützt hat.

Zu guter Letzt möchte ich noch meinen Eltern für ihre großzügige Unterstützung und ihren Rückhalt während meiner Studienzeit danken.

Abstract

The subject of this master thesis are mountings on natural stones, in particular mountings of handrails on stone stairs from the Gründerzeit period (late 19th century). In the course of this thesis, 84 anchor pulling tests in three different materials were conducted, evaluated and analyzed. Here the load capacity of anchor systems with axial load was examined exclusively. The load capacity under shear force and bending moment will be investigated in further research projects by G.KIDERY. In addition, the effect of the drilling method on the load capacity of the anchors was analyzed.

Investigating mountings on stone stairs is important, as a large number of stair cases in Vienna are stone stairs from the Gründerzeit period. With the change of the use category the handrails often have to be renewed and adapted. Planers and executers are therefore frequently confronted with the task of finding modern mountings for handrails on stone stairs.

The evaluations of the tests showed that the mean failure loads of the examined anchor systems only deviate slightly from each other. Failure modes, however deviate significantly and partially also varied within the test series. Overall, tests executed for this thesis provide a good overview about the potential loads for mountings on natural stone stairs. The geometry of the stairs was identified to be a key factor influencing the load of the anchors. Smaller distances to the edges due to the stair's cross section reduces failure load.

Kurzfassung

Die vorliegende Diplomarbeit behandelt Befestigungen an Natursteinen, insbesondere Geländerbefestigungen an Natursteinstiegen der Gründerzeit. Im Zuge dieser Arbeit wurden 84 Dübelauszugsversuche mit Verbundankern und Betonschrauben in drei verschiedenen Grundmaterialien durchgeführt, ausgewertet und analysiert. Dabei wurde ausschließlich die Tragfähigkeit verschiedener Dübelssysteme auf Normalkraft untersucht, die Tragfähigkeit bei Querkraft- und Momentenbelastung wird in weiterführenden Forschungsarbeiten von G.KIDERY behandelt. Außerdem wurde im Zuge der Versuche die Auswirkung der Bohrmethode (Kernbohren, Hammerbohren) auf die Belastbarkeit der Dübel untersucht.

Befestigungen an Natursteinstiegen sind vor allem deshalb von Bedeutung, weil in Österreich eine beträchtliche Anzahl an gründerzeitlichen Natursteinstiegen vorhanden ist. Bei einer Änderung der Nutzungskategorie müssen die Stiegen Geländer solcher Stiegen in vielen Fällen erneuert oder adaptiert werden. Sowohl Planer als auch Ausführende stehen deshalb häufig vor der Aufgabe, eine zeitgemäße Befestigung für Geländer an Natursteinstiegen zu finden.

Die Auswertung der Auszugsversuche zeigte, dass die mittleren Bruchlasten der untersuchten Dübelssysteme nicht stark von einander abweichen. Deutlichere Unterschiede gab es jedoch bei der Versagensform, welche teilweise auch innerhalb der Versuchsserien variierte. Die durchgeführten Versuche geben einen guten Überblick über die theoretisch möglichen Belastungen bei Befestigungen an Natursteinstiegen. Als wesentlicher Faktor für die Belastbarkeit der Dübel stellte sich die Geometrie der Stufen heraus. Da sich aufgrund der geringen Randabstände der Stufenquerschnitte die Auszugslasten reduzieren.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung	2
1.3	Zitier-Methode	2
2	Grundlagen	3
2.1	Natursteinstiegen der Gründerzeit	3
2.1.1	Geschichtliche Entwicklung	4
2.1.2	Stiegentypen	6
2.1.3	Lastabtragung	9
2.1.4	Verwendete Gesteinsarten	10
2.1.5	Geländer	11
2.2	Befestigungstechnik	14
2.2.1	Wirkungsprinzipien von Befestigungssystemen	14
2.2.2	Bohrverfahren	15
2.2.3	Dübelsysteme für nachträgliche Befestigungen	16
2.2.4	Versagensformen unter Zuglast	22
2.2.5	Versagensformen unter Querlast	23
3	Experimentelle Untersuchungen	24
3.1	Untersuchte Befestigungssysteme	25
3.2	Verwendete Bohrverfahren	27
3.3	Probekörper	28
3.3.1	Probekörper aus Beton	28
3.3.2	Probekörper aus Kalksandstein	29
3.3.3	Probekörper aus Quarzsandstein	30
3.4	Versuchsprogramm	31
3.5	Auszugsgerät	32
3.6	Vorversuche	35
3.6.1	Vorversuche A und B	35
3.6.2	Vorversuche 1 und 2	36
3.6.3	Vorversuch 3	36
3.6.4	Vorversuche 4 und 5	37
3.6.5	Vorversuche 6 und 7	38

3.6.6	Vorversuche 8 und 9	38
3.6.7	Vorversuch 10	39
3.7	Versuchsaufbau	39
3.7.1	Messtechnik	41
3.8	Versuchsdurchführung	42
4	Versuchsergebnisse	45
4.1	Methode zur Auswertung der Ergebnisse	45
4.2	Ergebnisse der Dübelauszugsversuche	49
4.2.1	Ergebnisse der Auszugsversuche in Kalksandstein	50
4.2.2	Ergebnisse der Auszugsversuche in Quarzsandstein	54
4.2.3	Ergebnisse der Auszugsversuche in Beton	58
5	Interpretation der Ergebnisse	63
5.1	Festigkeitseigenschaften der Probekörper	64
5.2	Interpretation der Auszugsversuche	66
5.2.1	Interpretation der Auszugsversuche in Kalksandstein	67
5.2.2	Interpretation der Auszugsversuche in Quarzsandstein	68
5.2.3	Interpretation der Auszugsversuche in Beton	69
5.2.4	Zusammenfassung	70
6	Folgerungen und Ausblick	71
6.1	Folgerungen	71
6.2	Ausblick	72
7	Zusammenfassung	73
	Abbildungsverzeichnis	77
	Tabellenverzeichnis	78
	Literaturverzeichnis	80
	Anhang A	81
A.1	Ergebnisse der Auszugsversuche in Kalksandstein	82
A.2	Ergebnisse der Auszugsversuche in Quarzsandstein	83
A.3	Ergebnisse der Auszugsversuche in Beton	84
	Anhang B	85
B.1	Kraft-Verschiebungs-Diagramme	85

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit modernen Befestigungssystemen für Geländer an Natursteinstiegen der Wiener Gründerzeit. Im speziellen mit der Belastbarkeit von Verbundankern und Betonschrauben in Natursteinstufen.

Der große Anteil an Gründerzeithäusern am Wiener Gebäudebestand, erfordert eine ständige Auseinandersetzung mit der Sanierung und der Erhaltung dieser Gebäude. Diese historische Bausubstanz gibt der Stadt einen großen Teil ihrer Identität. Deshalb ist es mir ein Anliegen, mit dieser Arbeit einen Teil zum technischen Fortschritt, im Bezug auf die Sanierung dieser gründerzeitlichen Gebäude beizutragen.

In nahezu jedem Gründerzeithaus, wurde zur vertikalen Erschließung eine Natursteinstiege eingebaut. Bei Umbau- oder Ausbauarbeiten ist es deshalb häufig nötig diese alten Natursteinsiegen zu sanieren oder anzupassen. Vor allem die Geländer der Stiegen entsprechen in vielen Fällen nicht mehr den heute geltenden Vorschriften. Besonders bei einer Änderung der Nutzungskategorie kommt es vor, dass die Stiegingeländer erneuert oder adaptiert werden müssen. Aus diesem Grund stehen sowohl Planer als auch Ausführende häufig vor der Aufgabe, eine zeitgemäße Befestigung für Geländer an Natursteinstiegen zu finden.

Die anzusetzenden Einwirkungen auf Absturzsicherungen sind in der ÖNORM EN 1991-1-1 geregelt. In Österreich sind zusätzlich die Angaben des nationalen Anhangs B 1991-1-1 zu berücksichtigen. Befestigungen von Stiegingeländern werden je nach Einwirkung durch Normalkraft, Querkraft oder durch ein Moment belastet. Diese drei Belastungsarten treten im Regelfall in kombinierter Form auf. Für die experimentellen Untersuchungen wurden die Belastungen in die Hauptbelastungsrichtungen aufgeteilt und getrennt untersucht

In dieser Arbeit wird ausschließlich die Belastungsfähigkeit der Befestigungen auf Normalkraft untersucht. Eine Normalkraftbelastung von Geländerbefestigungen kann vor allem bei fallenden Personen auftreten (weicher Stoß). Die Belastungsfähigkeit der Geländerbefestigungen auf Querkraft und Moment werden in weiterführenden Forschungsarbeiten von G.KIDERY behandelt.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Diplomarbeit ist es durch Auszugsversuche, zwei moderne Dübelsysteme an Naturstufen unterschiedlicher Gesteine zu testen. Durch die empirischen Untersuchungen sollen folgende Punkte näher untersucht werden:

- Qualitative und quantitative Beurteilung der Einsetzbarkeit von Betonschrauben und Verbundankern als Befestigungsmittel an Naturstufen, unter Normalkraftbelastung.
- Analyse der Unterscheidungsmerkmale von Betonschrauben und Verbundankern anhand der Ergebnisse der Dübelauszugsversuche.
- Beurteilung des Einflusses der Bohrmethode auf die Belastbarkeit der beiden Dübelsysteme bei Anwendungen in Naturstein, unter Normalkraftbelastung.

1.3 Zitier-Methode

Zu Beginn sei hier kurz auf die verwendete Zitier-Methode hingewiesen. In dieser Diplomarbeit wurde durchgängig nach der HARVARD-METHODE zitiert. Besonders in Kapitel 2, war es notwendig auf Fachliteratur zurückzugreifen um die erforderlichen Grundlagen beschreiben zu können. Bei paraphrasierten Texten wird am Ende des Absatzes die Quelle angegeben. Wörtliche Zitate werden vom Text eingerückt dargestellt und im Anschluss mit der Quelle gekennzeichnet. Die Literaturangabe erfolgt durch die Angabe des Autors und des Erscheinungsjahres: (AUTOR Erscheinungsjahr) oder im Text mit AUTOR (Erscheinungsjahr).

Bei Abbildungen oder Tabellen, die sinngemäß übernommen wurden, wird die Quelle in der Beschriftung in folgender Form angegeben: nach AUTOR (Erscheinungsjahr). Auf direkt übernommene Abbildungen, wird in der Beschriftung folgendermaßen verwiesen: (AUTOR Erscheinungsjahr). Wenn keine Quellen angegeben sind stammen die Abbildungen, Diagramme oder Tabellen vom Autor dieser Arbeit.

Im Literaturverzeichnis ist eine detaillierte Auflistung der verwendeten Literatur zu finden. Die Quellenangaben sind dort nach Autoren alphabetisch gereiht.

Kapitel 2

Grundlagen

2.1 Natursteinstiegen der Gründerzeit

Diese Arbeit behandelt Befestigungen an Natursteinen, insbesondere an Natursteinstiegen¹. Aus diesem Grund wird in Abschnitt 2.1.1 ein Überblick über die Gründerzeit geben. In den nachfolgenden Unterkapiteln werden außerdem wesentliche Grundlagen zum Thema Natursteinstiegen beschrieben.

Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt jedoch auf den experimentellen Untersuchungen, weshalb bei größerem Interesse auf weiterführende Literatur empfohlen wird, wie: BRIK (1896); BOBEK (1966); AHNERT (2002); HÖFLINGER (2014).

Ein Großteil der in Österreich vorhandenen Bausubstanz sind Wohngebäude mit insgesamt 3,9 Mio. Wohnungen. In etwa 15 % dieser Gebäude wurden vor 1919 errichtet, diese Wohnungen stellen einen Wiederbeschaffungswert von etwa 83 Mrd. € dar. Ein weiterer Teil von etwa 21 % der Gebäude wurde zwischen 1919 und 1960 errichtet und stellt einen Wiederbeschaffungswert von 100 Mrd. € dar. Als Vergleich dazu, betrug der Bauproduktionswert für den Wohnungs- und Siedlungsbau in Österreich 2005 in etwa 4,2 Mrd. €. Diese Zahlen zeigen, dass ein großer Teil der in Österreich vorhandenen Bausubstanz aus älteren Gebäuden besteht, welche in Anbetracht des Wiederbeschaffungswertes unabhängig von ihrer kulturellen Bedeutung eine große volkswirtschaftliche Bedeutung haben. (ONR 24009, 2013)

Der Gebäudebestand an gründerzeitlichen Gebäuden ist vor allem in Wien immer noch beträchtlich. Diese machen zur Zeit circa ein Drittel des Wiener Gebäudebestandes aus. In der Gründerzeit wurden auch die meisten der heute in Österreich vorhanden

¹In den EN Normen wird heute einheitlich der Begriff „Treppe“ verwendet. Es ist jedoch üblich im Altbau weiterhin den Begriff „Stiege“ zu verwenden. In dieser Arbeit wird bewusst der in der Gründerzeit gebräuchliche Begriff „Stiege“ verwendet.

Natursteinstiegen erbaut, da damals die meisten Hauptstiegen aus Naturstein errichtet wurden. Diese Stiegen dienen ihrem Zweck nun teilweise seit über 100 Jahren und haben heute immer noch einen sehr hohen Anteil an den derzeit bestehenden Stiegen. Es gab und gibt viele verschiedenen Arten von Natursteinstiegen aus unterschiedlichen Gesteinen (siehe Abschnitt 2.1.2). (HÖFLINGER 2014)

2.1.1 Geschichtliche Entwicklung

Die Gründerzeit begann in Wien in der Mitte des 19. Jahrhunderts und dauerte bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts an. Eine genaue Datierung ist nur schwer möglich da auch in der Literatur unterschiedliche Angaben gemacht werden. Die Märzrevolution 1848 war jedoch ein markanter Wendepunkt in der Monarchie, mit der auch der Beginn der Gründerzeit eingeleitet wurde. (HÖFLINGER 2014)

„Diese im Zeichen der uneingeschränkten Entfaltung liberalistisch- kapitalistischer Ideen stehende Periode von etwa acht Jahrzehnten (1840-1918), unter deren Impulsen die Industrialisierung der Monarchie erfolgte, soll hier unter dem Namen „Gründerzeit“ zusammengefasst werden. Sie ist die bisher bedeutendste Bauperiode Wiens, als deren Hauptvertreter Maszinzinshaus und Fabrik erscheinen.“ (BOBEK 1966, S. 26)

In der Zeit von 1840 bis 1910 stieg die Einwohnerzahl in Wien von 440.000 auf nahezu zwei Millionen an. Drei Viertel der damals vorhanden Wohnhäuser wurden abgerissen und durch neue Häuser ersetzt. In dieser Zeit wurden auch viele städtische Einrichtungen geschaffen von denen Wien noch heute profitiert. Die zahlreichen Bahnhöfe Wiens aber auch die städtischen Eisenbahntrassen und viele andere infrastrukturelle Errungenschaften stammen aus der Gründerzeit. Eines der bedeutendsten Großbauvorhaben dieser Zeit war der Bau der Ringstraße mit all seinen Gebäuden und der Ringstraße selbst. Das Großbauvorhaben wurde ab 1857 durch das Abtragen der städtischen Befestigungsanlagen möglich. (BOBEK 1966)

Das Foto, das in Abbildung 2.1 zu sehen ist zeigt den Schottenring in Blickrichtung Donaukanal um 1875. Man sieht hier die gründerzeitlichen Gebäude links und rechts der Ringstraße und die bereits vorhanden Straßenbahngleise am Schottenring.



Abbildung 2.1: Schottenring um 1875, (ARCHITEKTUR-AKTUELL 2015, Photograph unbekannt)

In nahezu jedem der gründerzeitlichen Gebäude, wurde zur vertikalen Erschließung eine Natursteinstiege eingebaut. Dabei wurden viele verschiedene Konstruktionen für unterschiedliche Zwecke entwickelt. Die Ausbildung dieser Stiegen hing stark von der Nutzung des Gebäudes ab. In Repräsentationsbauten wurden meist prunkvolle und breite Stiegen eingebaut. Klassische Zinshäuser besitzen in den meisten Fällen eher einfache und zweckmäßige Stiegen.

Ein Hauptgrund für die Verwendung von Naturstein war der Brandschutz. Dieser spielte schon damals eine zentrale Rolle. Als im Jahr 1881 das Ringtheater während ein Vorstellung abbrannte und dabei viele Menschen ums Leben kamen, wurden die Brandschutzvorschriften deutlich verschärft. In Wien mussten Stiegen laut der Bauordnung von 1883 „feuersicher“ erreicht werden. Naturstein galt damals als „Brandsicher“ und wurde so zum Hauptbaustoff für Stiegen. (HÖFLINGER 2014)

2.1.2 Stiegentypen

Je nach Nutzung und Repräsentationszweck eines Gebäudes baute man Stiegen mit unterschiedlichem Grundriss, Lagerungsart und Stufenform. In Abbildung 2.2 ist ein Beispiel für eine typische Natursteinstiege der Wiener Gründerzeit zu sehen. Hierbei handelt es sich um zweiläufige, freitragende (eingespannte) Natursteinstiege mit schmiedeeisernem Geländer. Das Geländer wurde hier an der Stirnseite der Stufen befestigt.

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden weitere in der Gründerzeit übliche Stiegentypen vorgestellt. Diese werden nach den Kategorien Lagerungsart, Grundriss und Stufenform aufgeschlüsselt und beschrieben.



Abbildung 2.2: Zweiläufige Natursteinstiege aus der Gründerzeit

2.1.2.1 Lagerungsarten

Für die Lastabtragung von Natursteinstiegen ist die Lagerung der Einzelstufen maßgebend. Es wird nicht wie bei Stahlbetontreppen der Treppenlauf als Gesamtes betrachtet, sondern die Lagerung der einzelnen Stufe definiert. Abbildung 2.3 zeigt die typischen Lagerungsarten von Naturstufen. Nach AHNERT (2002) werden fünf verschiedene Lagerungsarten unterschieden :

- Stufen beidseitig eingemauert
- Stufen frei aufliegend
- Stufen mit Steinwange
- Stufen einseitig eingemauert mit I-Profil
- Stufen einseitig eingespannt

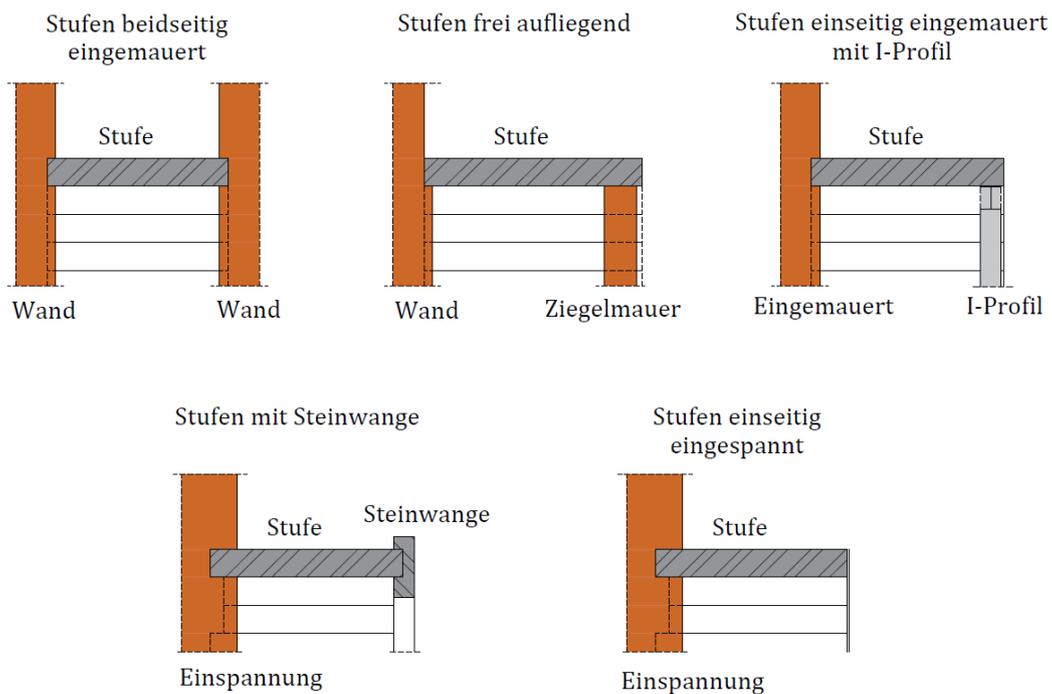


Abbildung 2.3: Lagerungsarten nach AHNERT (2002)

2.1.2.2 Grundrissformen

Bei Stiegen gibt es eine Vielzahl an möglichen Grundrissgestaltungen. Die Laufformen der Stiegen hängen stark vom Grundriss und der Größe des Gebäudes ab. Bei prestigeträchtigen Bauten wurden meist gerade, klare Linien gewählt. In Arbeitermietshäusern ging es mehr darum Platz zu sparen, daher wurden häufig gewendelte Grundrissformen bevorzugt. In Abbildung 2.4 sind einige der gängigsten Grundrissformen abgebildet. Links oben ist eine zweiläufige geradlinige Stiege mit Zwischenpodest zu sehen. In der Mitte der Abbildung 2.4 ist eine weitere zweiläufige Stiege mit einem gewandeltem Mittelteil dargestellt. Die Grundrissformen sind in Wien besonders häufig anzutreffen. Des weiteren sind noch, eine dreiläufige Stiege mit Podesten, eine halbkreisförmig gewendelte Stiege und eine elliptische Wendeltreppe dargestellt.

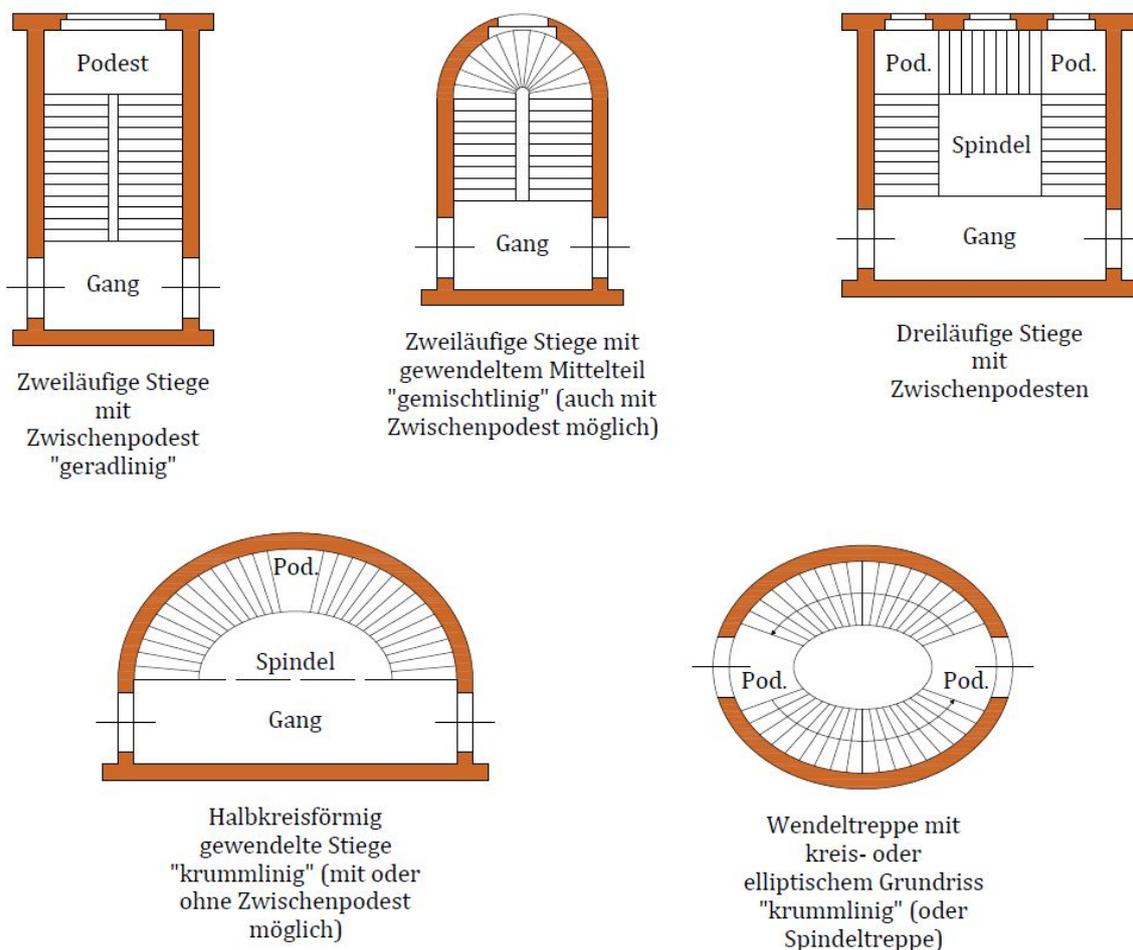


Abbildung 2.4: Grundrissstypen nach KOLBITSCH (1989)

2.1.2.3 Stufenformen

Es gibt unzählige verschiedene Typen von Stufenquerschnitten. Die Querschnittsabmessungen sind sowohl von der Form als auch vom Steigungsverhältnis der Stiege abhängig. Grundsätzlich ist zwischen keilförmigen und rechteckigen Stufenquerschnitten zu unterscheiden. Keilförmige Stufen haben ein geringeres Gewicht als Stufen mit rechteckigem Querschnitt. Die Querschnittsform ist daher meist keilförmig und nur in seltenen Fällen rechteckig. Das Gewicht der Stufe ist nicht nur bezüglich der Tragwirkung ein wichtiger Faktor, sondern spielte auch beim Einbau der Stufen eine große Rolle. Bei einseitig eingespannten Stufen ist der eingemauerte Teil der Stufe häufig rechteckig ausgeführt, da dies die Einbindung der Stufe in den Mauerwerksverband erleichtert. Ein weiteres wichtiges Detail der Stufenquerschnitte ist die Falzausbildung. Sie hat eine große Bedeutung für die Lastabtragung, da in etwa die Hälfte der Last über die Verbundwirkung des Stiegenlaufes abgetragen wird. (BRIK 1896; HÖFLINGER 2014)

In Abbildung 2.5 sind einige unterschiedliche Stufenquerschnitte und Falzausbildungen dargestellt. Ganz links ist eine rechteckige Stufenform abgebildet, welche jedoch selten wie zuvor beschrieben, eher verwendet wurde. Rechts daneben, ist eine Stufenform mit abgerundeten Untersicht zu sehen. Die drei verbleibenden Stufenformen von der Mitte bis zur rechten Seite, haben einen keilförmigen Querschnitt. Diese Stufenformen unterscheiden sich vor allem durch die Falzausbildung. Für detailliertere Informationen zu Stufenformen, wird auf die Werke von AHNERT (2002) und HÖFLINGER (2014) verwiesen.

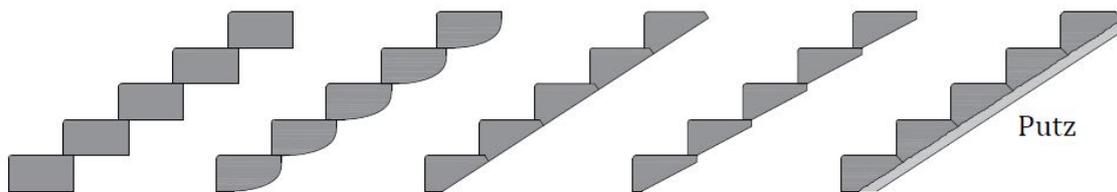


Abbildung 2.5: Stufentypen nach AHNERT (2002)

2.1.3 Lastabtragung

Die wichtigsten Erkenntnisse zur Lastabtragung von Natursteinstiegen stammen aus der Zeit des Stiegenstufenausschusses. Aufgrund einer Häufung von Schäden an freitragenden Natursteinstiegen wurde 1896 der sogenannte „Stiegenstufen-Ausschuss“ gegründet. Dieser wurde vom Österreichischen Ingenieur- und Architekten Verein (ÖIAV) ins Leben gerufen. Der Ausschuss beschäftigte sich intensiv mit Natursteinstiegen und führte zahlreiche experimentelle Untersuchungen durch. Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden anschließend in den „Normalien des ÖIAV“ veröffentlicht. (HÖFLINGER 2014; KOLBISTCH 1989)

Die wesentlichsten Erkenntnisse des Ausschusses werden nachfolgend kurz zusammengefasst.

- Die Tragwirkung einer einseitig eingespannten Natursteinstiege ergibt sich aus der Kombination der Einspannung und der Verbundwirkung des Stiegenlaufes. (BRIK 1896; HÖFLINGER 2014)
- Eine einseitig eingespannte Einzelstufe trägt in etwa die Hälfte einer Stufe im Stiegenverband. (BRIK 1896; HÖFLINGER 2014)
- 50 % der Belastung werden durch die Einspannung direkt in das Auflager übertragen. Die restlichen 50 % der Belastung werden über die Verdrehungssteifigkeit der Stufen und die Verspannung im Verband abgetragen. (BRIK 1896; HÖFLINGER 2014)

2.1.4 Verwendete Gesteinsarten

Naturstein ist auf Grund seiner Festigkeit und Dauerhaftigkeit seit jeher ein beliebter Baustoff. Für den Bau von Stiegen wurden im Wien der Gründerzeit hauptsächlich Sand- und Kalksteine verwendet, da sich diese auf Grund ihrer Eigenschaften und der Verfügbarkeit im Umkreis von Wien besonders gut eigneten. HÖFLINGER stellt in seiner Dissertation fest:

„Die Palette der eingesetzten Natursteine für Stiegen reicht von diversen Sand- und Kalksteinen, über sehr robuste Gesteinsarten wie z.B. Granit bis hin zu eher teureren Vertretern der Natursteine wie Marmor (Carrara Marmor).“ (HÖFLINGER 2014, S. 17)

Im wesentlichen wurden in Wien jedoch folgende Natursteine eingesetzt:

- **Rekawinkler Stein** (Quarzsandstein aus Rekawinkel)
Der Rewinkler Stein ist ein Quarzsandstein aus der Flyschzone im Wienerwald. Er wurde in den Steinbrüchen in Rekawinkel und Pressbaum abgebaut. Der Hauptbestandteil des Gesteins ist Quarzsand, der von einer Matrix aus Tonmineralen zusammengehalten wird. (ROHATSCH 1999)
- **Kaiserstein** (Kalkstein aus dem Leithagebirge)
Kaiserstein ist ein Kalksandstein aus dem der Gegend des Kaisersteinbruchs im Leithagebirge. Es handelt sich dabei um ein klassisches Sedimentgestein, aus Bruchstücken von Kalkalgen, Muschelschalen und dergleichen. Er wird manchmal auch nur als Kalkstein, Schuttkalk, oder Leithakalk bezeichnet. (ROHATSCH 2007)
- **Karststein** (Karstmarmor)
Karststein ist ein sehr hochwertiges Gestein. Dieses wurde aber nicht so häufig eingesetzt, wie die beiden anderen Gesteine, weshalb heute in Wien nur noch wenige Karststeinstiegen zu finden sind. (HÖFLINGER 2014)

In der späten Gründerzeit wurde auch Beton, Eisenbeton und Kunststein zur Herstellung von Stufen verwendet. (HÖFLINGER 2014)

Um ein Bild der Leitungsfähigkeit der einzelnen Materialien zu vermitteln wird in Tabelle 2.1 ein Auszug aus den Ergebnissen des Stiegenstufenausschusses angeführt. Die Ergebnisse gelten für eine einseitig eingespannte (freitragende) Stiege, bei einer Belastung von $4,0 \text{ kN/m}^2$. Es sind die zulässige Biegezugspannung, das Eigengewicht des Gesteins und die maximal mögliche Länge der Auskragung angegeben.

Tabelle 2.1: Ergebnisse zu eingespannten Natursteinstiegen, bei einer Nutzlast (p) von $4,0 \text{ kN/m}^2$, aus den Ergebnissen des Stiegenstufen-Ausschusses von 1896, nach KOLBITSCH 1989

Material/Eigenschaften	zul. σ_{BZ} [N/mm^2]	[kg/m^3]	max.l [m]
Rekawinkler Stein	0,3	2420	0,84
Beton	0,4	2450	0,97
Kaiserstein	1,0	2490	1,52
Karststein	1,2	2580	1,66

2.1.5 Geländer

Das Geländer von Natursteinstiegen wurde in der Gründerzeit in den meisten Fällen aus schmiedeeisernen oder gusseisernen Geländerstehern und einem Handlauf aus Holz hergestellt. Es gibt in prestigeträchtigen Bauten auch Stiegen mit Brüstungen aus Naturstein oder Mauerwerk, dies kommt aber fast ausschließlich bei Natursteinstiegen mit massiven Unterkonstruktionen oder bei Stiegen mit Seitenwangen vor.

Es ist wichtig zu beachten, dass bei Gründerzeitstiegen das Geländer nicht immer den heute geltenden Vorschriften entspricht. Besonders die Geländerhöhe und der Abstand der Geländerstäbe ist häufig nicht mehr regelkonform. Laut dem Urteil (11Os36/98) des obersten Gerichtshofes ist jeder Hauseigentümer dazu verpflichtet, alle Gänge und Treppen in einem für Dritte verkehrssicheren und gefahrlosen Zustand zu erhalten. Somit ist es nicht nur bei Sanierungsarbeiten manchmal nötig das Geländer zu ersetzen oder anzupassen. In manchen Fällen wird das bestehende Geländer, aber auch um ein zweites höheres Geländer ergänzt, um die Einhaltung der aktuellen Vorgaben wieder sicherzustellen.

2.1.5.1 Geländer-Befestigungen

Die Befestigung der Geländerstehere erfolgte in der Gründerzeit entweder am Stufenkopf oder direkt auf der Trittlfläche (siehe Abbildung 2.10), in seltenen Fällen auch an der Setzstufe. Bei Befestigungen auf der Trittlfläche, wurde das Geländer meist an jeder Stufe befestigt. Seitliche Geländerbefestigungen wurden in Wien häufig mit einem Eisenband ausgeführt, das ungefähr an jeder dritten Stufe befestigt wurde. An diesem

Eisenband wurden dann wiederum die Geländerstehler montiert, wie in Abbildung 2.8 zu sehen. Die Befestigung erfolgte in den meisten Fällen mit einem Eisendorn. Dieser wurde in schwalbenschwanzförmigen Löchern verankert, die abschließend mit Blei oder Zement vergossen wurden. (FRICK 1927)

In Abbildung 2.6 sind einige Befestigungsdetails zu sehen, die zeigen wie die Geländerbefestigungen in der Gründerzeit ausgeführt wurden. Links sind Befestigungsmöglichkeiten für den Stufenkopf und rechts für die Trittfläche dargestellt. Die Löcher für die Befestigungen hatten in der Regel eine Tiefe von 50 mm bis 80 mm und einen Durchmesser von 40 mm. (AHNERT 1989)

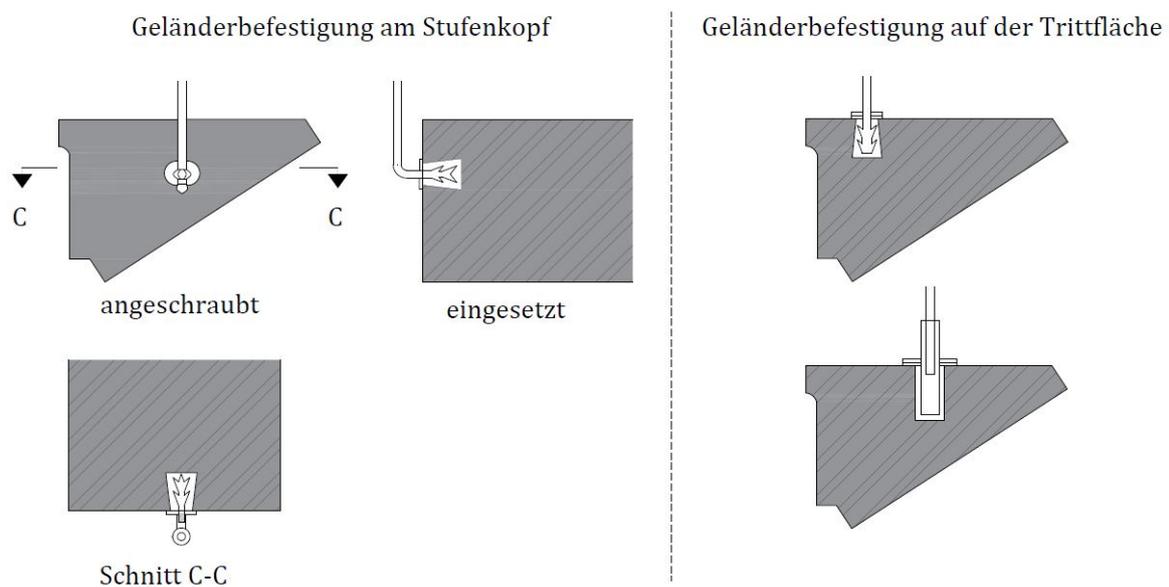


Abbildung 2.6: Geländerbefestigungen am Stufenkopf nach AHNERT (1989)

In den Abbildungen 2.7 bis 2.10 sind ausgeführte Beispiele von Geländerbefestigungen der Gründerzeit abgebildet. Die Abbildungen 2.7 und 2.8 zeigen die Geländerbefestigung an einer zweiläufigen Stiege mit Zwischenpodest. Das Geländer wurde hier über ein Eisenband an der Seite der Stiege befestigt, das wiederum an jeder dritten Stufe mit der Stiege verbunden ist. Die Verbindung zwischen dem Eisenband und den Stufenköpfen erfolgte vermutlich über Eisendorne wie in Abbildung 2.6 dargestellt.

In den Abbildungen 2.9 und 2.10 ist eine Wendeltreppe mit elliptischem Grundriss zu sehen. Die Geländerbefestigung erfolgte bei dieser Stiege auf den Trittstufen. Dabei ist am Rand jeder Trittstufe ein Geländerstehler befestigt.



Abbildung 2.7: Zweiläufige Stiege mit seitlichem Geländer



Abbildung 2.8: Geländerbefestigung an der Stirnseite mit Eisenband



Abbildung 2.9: Wendeltreppe mit elliptischem Grundriss



Abbildung 2.10: Geländerbefestigung auf der Trittfläche

2.2 Befestigungstechnik

Das Verbinden von Bauteilen ist seit jeher eine wichtige Aufgabe der Bautechnik. Abhängig von Baustoff und Nutzung wurden im Laufe der Zeit verschiedene Verbindungsmittel entwickelt: Schweißen und Schrauben im Stahlbau; Versätze, Nägel und Schrauben im Holzbau; Einlegeteile und Dübel im Betonbau. Immer höhere Anforderungen an die Belastbarkeit der Verbindungen führte dazu, dass aus einer handwerklichen Teilleistung eine eigene technische Disziplin entstanden ist: die Befestigungstechnik. Durch den technischen Fortschritt sind viele neue Anwendungsgebiete entstanden, wie das Verbinden von Fertigteilen oder das Befestigen von vorgehängten Fassaden und Konsolen. (MALLÉE 2016)

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die wichtigsten nachträglichen Befestigungsmethoden für Verankerungen in Bauteilen aus Beton und Naturstein gegeben. (MALLÉE 2016)

2.2.1 Wirkungsprinzipien von Befestigungssystemen

In der Befestigungstechnik werden im Allgemeinen drei Wirkungsprinzipien unterschieden. Diese drei Wirkungsprinzipien sind nachstehend aufgelistet und sind zusätzlich in Abbildung 2.11 schematisch dargestellt. (ELIGEHAUSEN 2000)

a) Formschluss

Dabei wird eine mechanische Verzahnung zwischen Dübel und Ankergrund hergestellt, um die Last zu übertragen (siehe Abbildung 2.11 a) Dieses Wirkungsprinzip kommt bei Hinterschnittdübeln und Betonschrauben zur Anwendung.

b) Reibung

Das Wirkungsprinzip Reibung kommt bei Spreizdübeln zur Anwendung. Beim Setzvorgang werden Spreizkräfte erzeugt, die eine Reibungskraft hervorrufen über die, die äußere Last in den Ankergrund übertragen wird (siehe Abbildung 2.11 b).

c) Verbund

Der Verbund zwischen Ankergrund und Dübel wird durch einen Kleber hergestellt. (siehe Abbildung 2.11 c) Dieses Wirkungsprinzip wird bei Verbundankern eingesetzt.

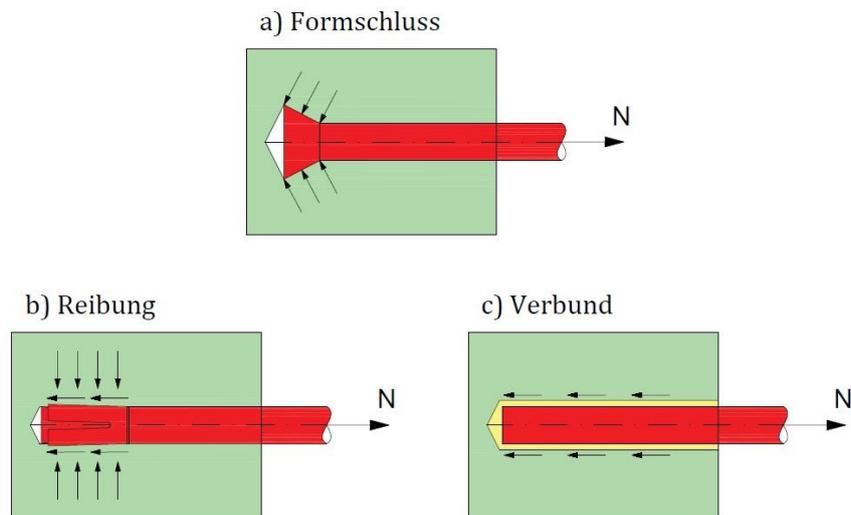


Abbildung 2.11: Wirkungsprinzipien, nach ELIGEHAUSEN (2000) und MALLÉE (2016)

2.2.2 Bohrverfahren

Um einen Dübel setzen zu können, benötigt man zuerst ein Bohrloch. Daher sind Bohrverfahren ein wesentlicher Bestandteil der Befestigungstechnik. Heute kommen fast ausschließlich die beiden Bohrverfahren, Hammerbohren und Diamantbohren zum Einsatz.

Beim Hammerbohren wird über einen Kolben im Bohrer eine Hammerwirkung auf das Werkstück ausgeübt während sich der Bohrer dreht. Der Bohrer hat dabei eine hohe Schlagzahl und eine vergleichsweise geringe Drehgeschwindigkeit. Die Bohrkronen sind mit Hartmetallschneideplatten versehen, die beim Bohren einem natürlichen Verschleiß unterliegen. Neue Bohrkronen sind deshalb etwas größer als der Nenndurchmesser und werden, durch den Gebrauch stetig kleiner.

Beim Diamantbohren wird das Loch durch einen diamantbesetzten Hohlbohrer aus dem Werkstück geschliffen. Dabei bleibt im Hohlraum ein Kern stehen, weshalb auch der Begriff Kernbohren weit verbreitet ist. Der Bohrvorgang wird im Regelfall wassergekühlt ausgeführt. Das Bohrgerät ist häufig mit einer Führung am Bauteil befestigt um eine möglichst hohe Genauigkeit zu erreichen. Diamantbohrer ermöglichen auch das Durchbohren von Bewehrung in beliebigen Durchmessern. (ELIGEHAUSEN 2000; MALLÉE 2016)

2.2.3 Dübelsysteme für nachträgliche Befestigungen

Hinterschnittdübel

Bei Hinterschnittdübeln wird eine mechanische Verzahnung zwischen Dübel und Bauteil für die Kraftübertragung genutzt. Die dafür erforderliche Verzahnung wird über einen Hinterschnitt erreicht. Das Wirkungsprinzip, das hier zur Anwendung kommt ist Formschluss. Die Verzahnung wird entweder durch ein spezielles Bohrverfahren oder durch den Dübel selbst erzeugt. (MALLÉE 2016)

In den Abbildungen 2.12 und 2.13 sind Hinterschnittdübel abgebildet, bei denen die Hinterschneidung durch ein spezielles Bohrverfahren erzeugt wird.

Es gibt zwei Möglichkeiten den Hinterschnitt mit einem Bohrgerät herzustellen. Eine Möglichkeit ist die Verwendung eines schwenkbaren Hinterschnittbohrers. Mit diesem wird zuerst ein zylindrisches Loch gebohrt und in einem zweiten Schritt durch kreiselförmiges Schwenken ein zum Bohrlochgrund gerichteter Hinterschnitt erzeugt (siehe Abbildung 2.13). Die zweite Möglichkeit ist, die Verwendung eines speziellen wassergekühlten Bohrgerätes mit ausklappbaren diamantbesetzten Schneidwerkzeugen. Dazu wird ebenfalls in einem ersten Schritt ein zylindrisches Bohrloch erzeugt und anschließend mit dem speziellen Bohrgerät der Hinterschnitt hergestellt. Der erzeugte Hinterschnitt kann dabei sowohl zum Bohrlochgrund, als auch zur Bohrlochöffnung geneigt sein (siehe Abbildung 2.12). (MALLÉE 2016; EAD 330232, 2016)

Der in Abbildung 2.12 dargestellte Dübel wird drehmomentkontrolliert gesetzt. Dazu wird mit einem Drehmomentschlüssel ein vorgegebenes Moment aufgebracht um den Dübel zu setzen.

Der Dübel in Abbildung 2.13 wird wegkontrolliert gesetzt. Bei diesem System wird eine Sprezhülse über einen Konusbolzen getrieben. Der Dübel gilt als gesetzt, wenn die Sprezhülse einen vorgegebenen Weg zurückgelegt hat.

In der Abbildung 2.14 ist ein selbstschneidender Hinterschnittdübel dargestellt. Der Dübel wird schlagend und drehend gesetzt. Bei dieser Bewegung schiebt sich eine Hülse über einen Konus und schneidet dabei einen Hinterschnittbereich frei.

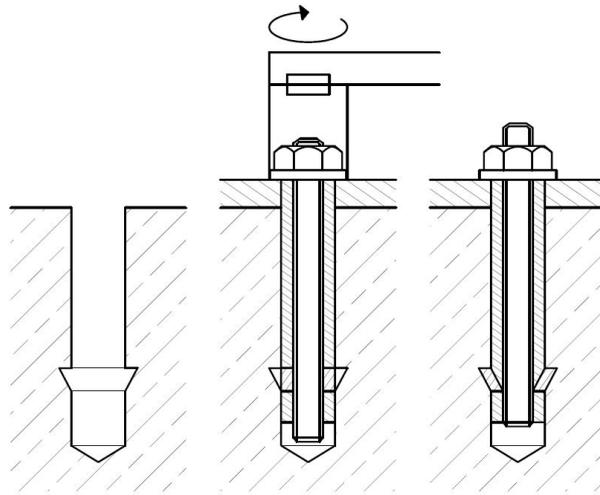


Abbildung 2.12: Drehmomentkontrollierter Hinterschnittdübel, nach EAD 330232 (2016)

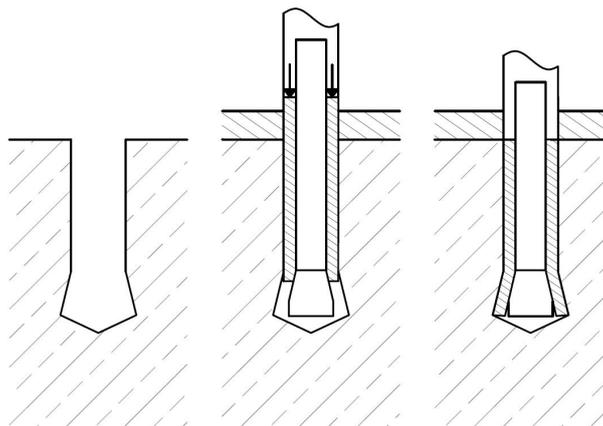


Abbildung 2.13: Wegkontrollierter Hinterschnittdübel, nach EAD 330232 (2016)

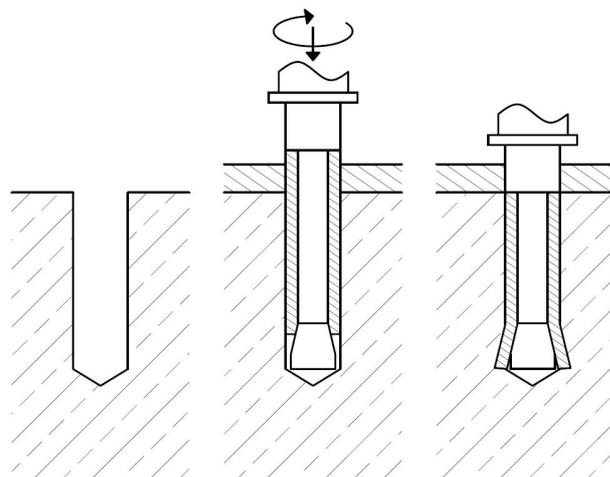


Abbildung 2.14: Selbst schneidender wegkontrollierter Hinterschnittdübel, nach EAD 330232 (2016)

Betonschrauben

Betonschrauben nutzen wie Hinterschnittdübel eine mechanische Verzahnung zwischen Dübel und Bauteil für die Kraftübertragung. Diese Art der Kraftübertragung dem Wirkungsprinzip Formschluss zuzuordnen, wie in Abschnitt 2.2.1 beschrieben. Vor dem Setzvorgang wird ein zylindrisches Loch in das Bauteil gebohrt. Die Betonschraube wird anschließend durch Drehen in das Loch geschraubt. Dies kann entweder händisch mittels Drehmomentschlüssel oder maschinell mittels Schlagschrauber erfolgen. Das Gewinde der Betonschraube schneidet sich dabei in das Bauteil und erzeugt so eine formschlüssige Verbindung. Ein zweimaliges Herausdrehen um wenige Millimeter zum Justieren des Anbauteiles ist bei den meisten Produkten zulässig. Abbildung 2.15 zeigt eine Betonschraube mit der Erklärung der einzelnen Schraubenabschnitte. (EAD 330232 2016)

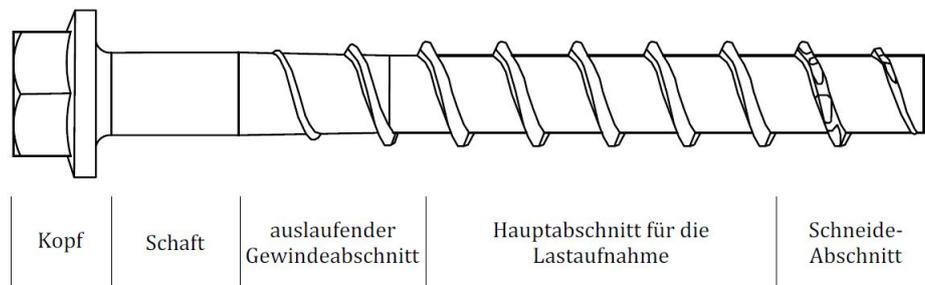


Abbildung 2.15: Betonschraube, nach EAD 330232 (2016)

Metallspreizdübel

Es gibt zwei Gruppen Metallspreizdübel: drehmomentkontrolliert spreizende Dübel und wegkontrolliert spreizende Dübel. Die Dübel beider Gruppen übertragen die Kräfte durch Reibung (siehe Abbildung 2.11 c). Die drehmomentkontrolliert spreizenden Dübel werden wiederum in zwei Untergruppen eingeteilt: Hülsentyp und Bolzentyp. (MALLÉE 2016)

Abbildung 2.16 zeigt einen drehmomentkontrolliert spreizenden Dübel des Hülsentyps. Dübel des Hülsentyps können auch als Innengewindedübel ausgeführt sein, die Funktionsweise bleibt dabei jedoch die Selbe. In Abbildung 2.17 ist ein drehmomentkontrolliert spreizender Dübel des Bolzentyps dargestellt. Bei beiden Untergruppen wird ein vorgeschriebenes Drehmoment aufgebracht, um die Spreizhülse bzw. die Spreizsegmente zu verspreizen. Dadurch entstehen Spreizkräfte, die wiederum Reibungskräfte hervorrufen, um die Last in das Bauteil einzuleiten. Eine durch den Spreizvorgang hervorgerufene plastische Verformung der Bohrlochwand, führt zusätzlich zu einer geringen Verzahnung. Die Setzkontrolle erfolgt über das aufgebrachte Drehmoment. Die Dübel gelten erst dann als gesetzt, wenn das vorgeschriebene Drehmoment während des Setzvorganges erreicht wird. (MALLÉE 2016; EAD 330232, 2016)

Wegkontrolliert spreizende Dübel sind nur als Hülsentyp verfügbar. Dabei wird ein Spreizstift wegkontrolliert in die Spreizhülse eingeschlagen. Die Spreizkräfte sind meist höher als bei drehmomentkontrolliert spreizenden Dübeln, was unter gewissen Umständen zu Abplatzungen am Bauteil führen kann. In Abbildung 2.18 ist ein wegkontrolliert spreizender Dübel abgebildet. (MALLÉE 2016)

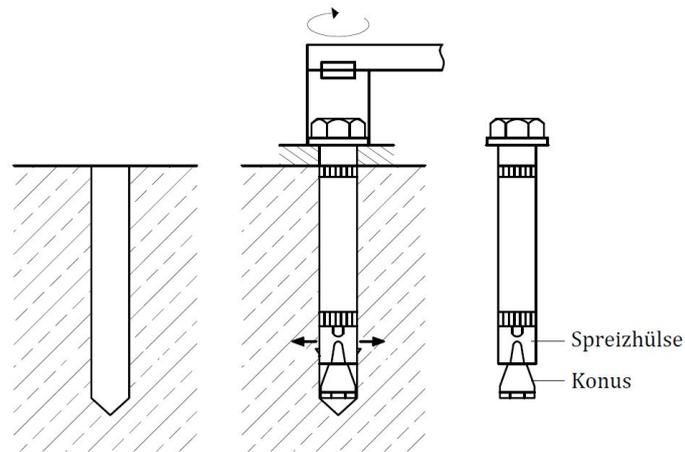


Abbildung 2.16: Drehmomentkontrollierter Spreizdübel, Hülse typ nach EAD 330232 (2016)

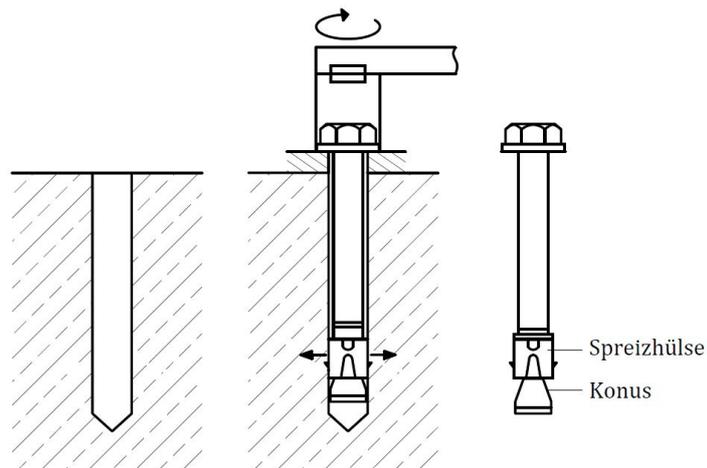


Abbildung 2.17: Drehmomentkontrollierter Spreizdübel, Bolzentyp nach EAD 330232 (2016)

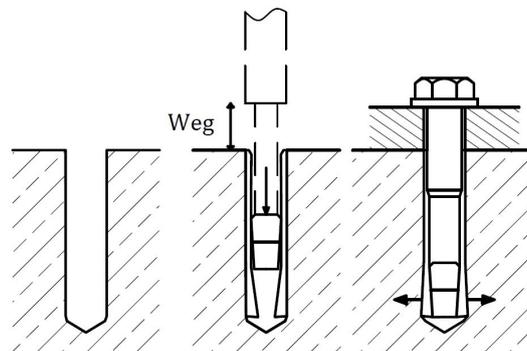


Abbildung 2.18: Wegkontrollierter Spreizdübel, nach EAD 330232 (2016)

Verbunddübel

Verbunddübel werden in Kapselsysteme und Injektionssysteme unterteilt. Bei Kapselsystemen wird der Verbundmörtel in Form von Glaspatronen oder Folienbeuteln ins Bohrloch eingebracht. Injektionssysteme nutzen eine Auspresspistole mit einer Kartusche um den Verbundmörtel ins Bohrloch zu injizieren. Verbunddübel werden auch nach der Verwendung in gerissenen und ungerissenen Beton unterscheiden. Dabei muss immer das gesamte Dübelssystem für eine Anwendung in gerissenen Beton zugelassen sein. (MALLÉE 2016; ETAG 001-5, 2013)

In Abbildung 2.19 ist ein Verbunddübel mit Kapselsystem dargestellt. Die Abbildung 2.20 zeigt einen Verbunddübel mit Injektionssystem.

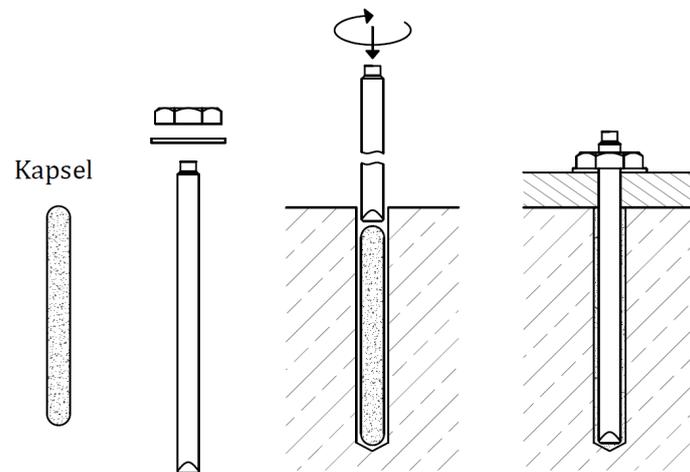


Abbildung 2.19: Verbunddübel mit Kapselsystem, nach ETAG 001-5 (2013)

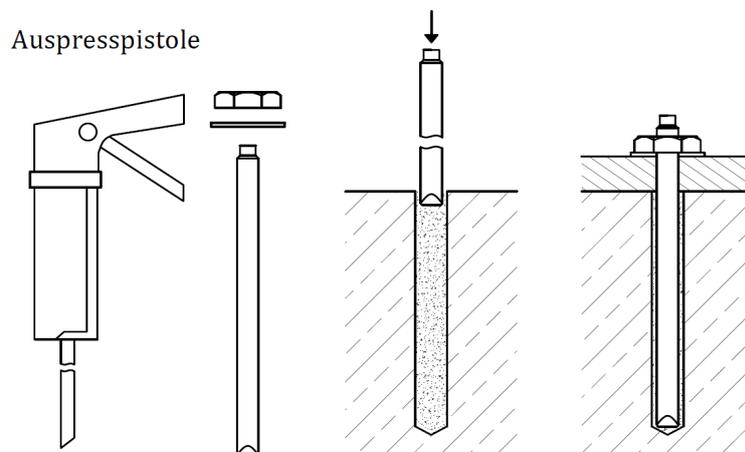


Abbildung 2.20: Verbunddübel mit Injektionssystem, nach ETAG 001-5 (2013)

2.2.4 Versagensformen unter Zuglast

In der Befestigungstechnik werden unter Zuglast vier Versagensformen unterscheiden. Diese können auch in kombinierter Form auftreten. Die Versagensformen unterscheiden sich im wesentlichen durch ihr Bruchverhalten.

a) Herausziehen

Wird der Dübel durch die Belastung aus dem Bohrloch gezogen, so nennt man diese Versagensart Herausziehen (siehe Abbildung 2.21 a). Es kann vorkommen, dass dadurch auch ein oberflächennaher Materialausbruch entsteht. Herausziehen kann auftreten, wenn die Spreizkräfte (bei Spreizdübeln) oder der Verbund (bei Verbunddübeln) zu gering sind. Auch Hinterschnittdübel können durch Herausziehen versagen, wenn die mechanische Verzahnung nicht ausreichend ist. (ELIGEHAUSEN 2000; MALLÉE 2016)

b) Ausbruch

Wenn die Zugfestigkeit des Ankergrundes überschritten wird, entsteht ein kegelförmiger Materialausbruch (siehe Abbildung 2.21 b). Die Tiefe des Bruchkegels beträgt in etwa das 0,8- 1,0 fache der Verankerungslänge. Der Winkel des Bruchkegels beträgt dabei etwa 35° zur Bauteiloberfläche. Dieser muss innerhalb der Kegels nicht konstant sein und kann von Versuch zu Versuch variieren. Ausbruchversagen kann dann eintreten, wenn genügend Randabstand vorhanden ist und der Dübel nicht vorher durch Herausziehen oder Stahlbruch versagt hat. (ELIGEHAUSEN 2000; MALLÉE 2016)

c) Stahlversagen

Stahlversagen tritt dann auf, wenn ein Materialversagen im Dübel entsteht (siehe Abbildung 2.21 c). Dies stellt im Normalfall die obere Grenze der erreichbaren Tragfähigkeit dar. (ELIGEHAUSEN 2000; MALLÉE 2016)

d) Spalten

Spalten tritt häufig dann auf, wenn die Bauteilabmessungen zu klein sind, oder die Randabstände nicht eingehalten werden können (siehe Abbildung 2.21 d). Dabei entstehen Spaltrisse, die das gesamte Bauteil spalten können. Es stellt sich ein ähnliches Last- Verschiebungsverhalten wie bei einem Ausbruchversagen ein, die Bruchlast ist jedoch geringer. Nach ETAG 001-C wird zusätzlich zwischen Spalten bei der Dübelmontage und Spalten unter Belastung unterschieden. (ELIGEHAUSEN 2000; MALLÉE 2016; ETAG 001-C, 2010)

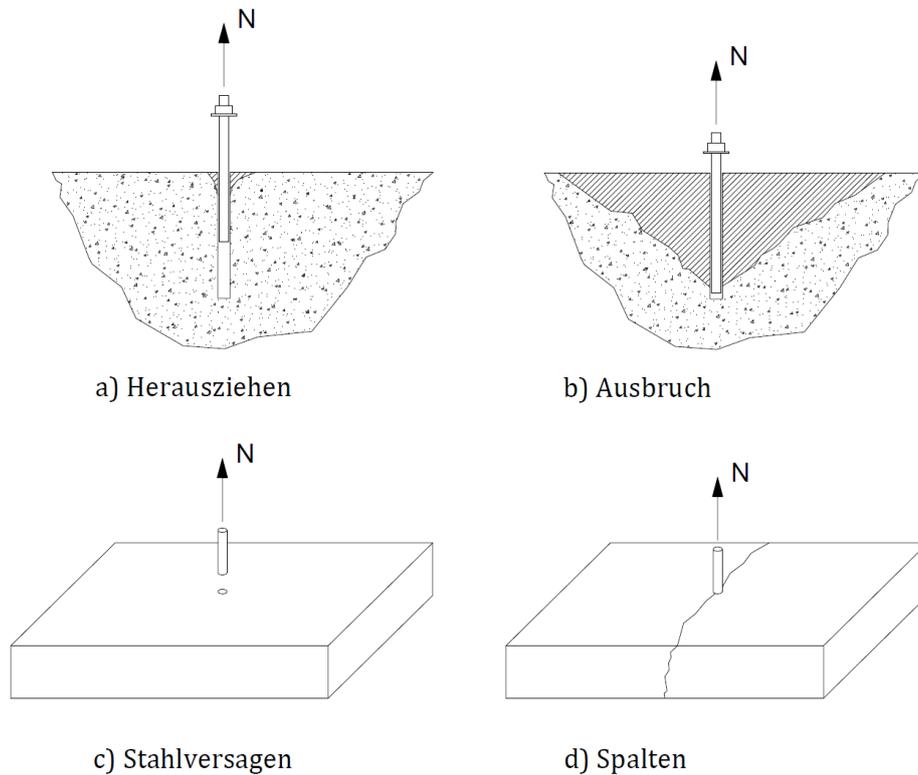


Abbildung 2.21: Versagensformen, nach ELIGEHAUSEN (2000) und MALLÉE (2016)

2.2.5 Versagensformen unter Querlast

Bei Dübelversagen unter Querlast werden drei Versagensformen unterschieden.

a) Stahlversagen

Stahlversagen tritt meist bei großen Randabständen auf. Dabei schert der Dübel unter Querlast ab. Es wird zusätzlich zwischen Stahlversagen mit und ohne Hebelarm unterschieden. (ETAG 001-C, 2010; MALLÉE 2016)

b) Pryout-Versagen

Das Pryout-Versagen tritt meist bei steifen nicht ausreichend tief verankerten Dübeln auf. Dabei entsteht ein Betonausbruch auf der Last abgewandten Seite des Dübels. (ETAG 001-C, 2010; MALLÉE 2016)

c) Betonkantenbruch

Betonkantenbruch tritt häufig bei kleinen Randabständen auf. Dabei bricht in der Regel die gesamte Betonkante aus. (ETAG 001-C, 2010; MALLÉE 2016)

Kapitel 3

Experimentelle Untersuchungen

In diesem Kapitel wird der Ablauf, der Aufbau und die Durchführung der experimentellen Untersuchungen erklärt. Zur Untersuchung der Thematik von modernen Befestigungsmethoden an Natursteinstiegen wurden Dübelauszugsversuche an Natursteinstufen im Labor des Institutes für Hochbau und Technologie - Forschungsbereich für Hochbaukonstruktionen und Bauwerkserhaltung an der TU Wien durchgeführt.

Die Grundidee war es, zwei verschiedene Befestigungssysteme bei gleichbleibendem Bohrlochdurchmesser mit zwei verschiedenen Bohrmethoden in Kalkstein und Quarzsandstein zu testen und miteinander zu vergleichen. Diese Idee wurde im Zuge der Anfangsüberlegungen um Versuche in Betonprobekörpern erweitert, um einen Vergleich mit einem weitgehend homogenen Material zu ermöglichen. Die Wahl der Dübelssysteme fiel auf Betonschrauben und Verbundanker der Firma HILTI. Beide sind einfach zu handhaben und werden im Betonbau bei ähnlichen Problemstellungen genutzt. Für Befestigungen in Naturstein werden derzeit hauptsächlich Verbundanker eingesetzt. Betonschrauben sind aber auf Grund ihrer technischen Eigenschaften für Natursteinbefestigungen ebenfalls interessant. Als Probekörper dienten einerseits Natursteinstufen aus Abbruchhäusern und zusätzlich im Labor hergestellte Betonprobekörper.

3.1 Untersuchte Befestigungssysteme

Betonschraube: Hilti HUS3-H8 (8x75)

Die untersuchten Betonschrauben sind vom Fabrikat Hilti HUS3-H8 (8x75) und bestehen aus galvanisch verzinktem Stahl. Sie sind laut ETA-13/1038 (2016) für Beton im gerissen und ungerissen Zustand zugelassen. Eine Zulassung besteht jedoch nur für hammergebohrte Bohrlöcher und der Einsatzbereich ist auf Bauteile in trockenen Innenräumen beschränkt. Es gibt jedoch sehr ähnliche Produkte aus korrosionsbeständigem Stahl die auch im Freien oder in Nassräumen zugelassen sind. Als besondere Vorteile der Betonschrauben sind hier noch die sofortige Belastbarkeit nach dem Setzen, und die Möglichkeit des Nachtjustierens zu erwähnen. In denkmalgeschützten Häusern sind Betonschrauben außerdem interessant, da man die Schraube vollständig entfernen kann, wenn die Befestigung nicht mehr benötigt wird. Derzeit besteht noch keine Zulassung für Befestigungen in Naturstein. (ETA-13/1038, 2016)

In Abbildung 3.1 ist eine Betonschraube des Fabrikats für die gegenständlichen Versuche zu sehen. Die Einbindetiefe der Dübel wurde für die experimentellen Untersuchungen mit 60 mm festgelegt. Diese konnte durch ein simuliertes Anbauteil mit einer Höhe von 15 mm sichergestellt werden. Der zulässige Randabstand für Beton beträgt $1,5 h_{ef}$, wobei h_{ef} die effektive Verankerungstiefe ist. Bei einer Einbindetiefe von 60 mm ergibt sich nach ETA-13/1038, (2016) eine effektive Verankerungstiefe 46,4 mm und somit ein zulässiger Randabstand von 70 mm. (ETA-13/1038, 2016)



Abbildung 3.1: Betonschraube, Hilti HUS3-H8 (8x75)

Verbundanker: Hilti HIT-V 5.8 M8x110 mit Hilti HIT- HY270

Das Befestigungssystem der Verbundanker setzt sich aus der Ankerstange vom Fabrikat Hilti HIT-V 5.8 M8 x 110 mm und dem Injektionsmörtel vom Fabrikat Hilti HIT-HY 270 zusammen. Als Verankerungsgrund sind laut der Zulassung ETA-13/1036 (2015) Voll- und Lochziegel sowie, Kalksandvollsteine und Betonsteine zugelassen. In Lochsteinen sind zusätzlich Siebhülsen zu verwenden. Die Ankerstange besteht aus verzinktem Stahl und ist nur für den Einsatz in Trocknen Innenräumen zugelassen. Es ist jedoch auch eine korrosionsbeständige Version der Ankerstange verfügbar. Als Bohrmethoden sind Drehbohren für Hohlsteine und Hammerbohren für Vollsteine zugelassen. (ETA-13/1036, 2015)

Zu Beachten ist, dass die Zulassung immer nur für das System, also für einen bestimmten Injektionsmörtel mit einer bestimmten Gewindestange gilt. Verbundanker sind derzeit die gebräuchlichsten Dübel bei Befestigungen in Naturstein. Zulassungen für Befestigungen in Natursteinen sind aufgrund der großen Schwankungen im Ankergrund eher eine Ausnahme. Für dieses Produkt besteht derzeit noch keine Zulassung als Befestigungsmittel in Naturstein. In Abbildung 3.2 ist eine Ankerstange des untersuchten Verbundankers mit Beilagscheibe und Mutter zu sehen. Die Einbindetiefe wurde für die Versuche mit 60 mm festgelegt. Dies wurde beim Setzen mittels einer Markierung an der Ankerstange überprüft. Der zulässige Randabstand für Kalksandmauersteine beträgt 50 mm. Dieser Wert ist jedoch als Referenzwert zu verstehen und kann nicht direkt auf die Probekörper dieser Arbeit umgelegt werden. (ETA-13/1036, 2015)

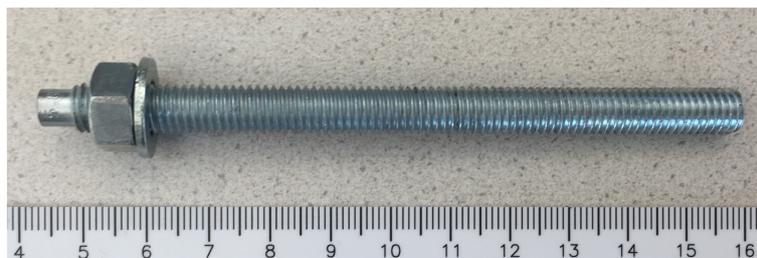


Abbildung 3.2: Verbundanker, Hilti HIT-V 5.8 M8x110

3.2 Verwendete Bohrverfahren

Die eingesetzten Bohrverfahren Hammerbohren und Kernbohren sind die in der Befestigungstechnik üblichen Bohrverfahren. Beide untersuchten Dübelsysteme sind jedoch derzeit nicht für die Verwendung in kerngebohrten Bohrlöchern zugelassen. Es gab die Überlegung, dass Kernbohren das Natursteingefüge, auf Grund der geringeren Erschütterungen weniger schädigt und somit höhere Auszugslasten erreicht werden können. Vor allem bei kleinen Querschnitten von Natursteinstiegen könnte es von Vorteil sein, wenn der Bohrvorgang ohne die Erschütterungen des Hammerbohrens auskommt. Für die Untersuchungen wurden deshalb folgende Bohrmethoden gewählt:

- **Hammerbohren**

mit dem Hammerbohrer Hilti TE-CX 8/17

- $D = 8 \text{ mm}$
- $l = 100 \text{ mm}$
- Bohreckmaß = 8,3 mm

und dem Bohrhammer Makita HR 2470 T

- **Kernbohren/Diamantbohren**

mit dem Diamantbohrer Hilti DD-C 8/70 T2

- $D = 8 \text{ mm}$
- $l = 100 \text{ mm}$
- Bohreckmaß = 7,9 mm

und dem Diamantbohrgerät Hilti DD EC-1

3.3 Probekörper

3.3.1 Probekörper aus Beton

Die Betonprobekörper wurden mit dem Trockenbeton, BAU MIT Hobby Beton C25/30 GK = 4 mm im Labor hergestellt. Dazu wurden fünf Holzschalungen angefertigt, und anschließend in mehreren Durchgängen 15 Probekörper betoniert. Zur Verdichtung wurden die gefüllten Schalungen auf einem Rütteltisch gerüttelt. Die Proben wurden nach ca 24h ausgeschalt und anschließend 28 Tage bei Raumtemperatur (ca 23°C) trocken gelagert.

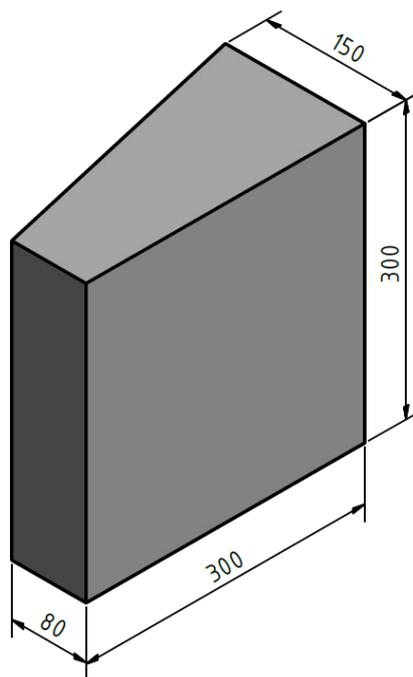


Abbildung 3.3: Betonprobekörper, Maße in [mm]

Die Querschnittsabmessungen der Betonprobekörper orientieren sich an den durchschnittlichen Abmessungen der Steinstufenprobekörper. Die Höhe der Proben wurde bei allen der drei Materialien einheitlich mit 30 cm festgelegt (siehe Abbildung 3.3). Diese Höhe kommt zustande, weil an jeder Probe zwei Versuche, einmal an der Oberseite und einmal an der Unterseite durchgeführt wurden und eine gegenseitige Beeinflussung verhindert werden sollte.

3.3.2 Probekörper aus Kalksandstein

Die Probekörper wurden aus Kalksandsteinstufen hergestellt, die aus einem Abbruchhaus in der Äußeren Mariahilferstraße im 15. Wiener Gemeindebezirk stammen. Für die Probenherstellung wurden die Stufen händisch gereinigt und im Labor in 30 cm lange Probekörper geschnitten. Es wurde darauf geachtet, dass die Proben keine beschädigten Stellen oder größere Inhomogenitäten enthalten. In Abbildung 3.4 sind die ausgebauten Stufen im Originalzustand zu sehen. Die Stufen hatten im Schnitt eine Länge von 1,45 m. Aus einer Stufe konnten somit bis zu vier Probekörper hergestellt werden. Abbildung 3.5 zeigt die Schnittfläche eines Kalksandstein- Probekörpers.



Abbildung 3.4: Kalksandsteinstufen



Abbildung 3.5: Kalksandsteingefüge

3.3.3 Probekörper aus Quarzsandstein

Die Quarzsandsteinstufen stammen aus einem Haus am Rennweg im 3. Wiener Gemeindebezirk. Vor der Probeherstellung erfolgte wie bei den Kalksandsteinstufen eine händische Reinigung. Die Abbildung 3.6 zeigt die ausgebauten Quarzsandsteinstufen im Originalzustand. Sie hatten ähnlich wie die Kalksandsteinstufen eine durchschnittliche Länge von 1,45 m. In Abbildung 3.7 ist eine Schnittfläche eines Quarzsandsteinprobekörpers zu sehen. Man sieht hier sehr gut, dass die beiden Gesteine ein unterschiedlich dichtes Gefüge aufweisen. Anhand der Abbildungen 3.5 und 3.7 kann man erkennen, dass der Quarzsandstein über ein feineres Gefüge verfügt.



Abbildung 3.6: Quarzsandsteinstufen



Abbildung 3.7: Quarzsandsteingefüge

3.4 Versuchsprogramm

Durch die Kombination der beiden Dübelssysteme, mit den beiden Bohrmethoden, in den drei verschiedenen Materialien ergeben sich 12 Versuchskonfigurationen. Zu jeder dieser Versuchskonfigurationen wurden sieben Versuche durchgeführt. In weiterer Folge werden die Versuchskonfigurationen mit je sieben Versuchen, als Serien bezeichnet. Jede dieser Serien hat einen genau definierten Namen, der sich aus der Versuchskombination ergibt. Tabelle 3.1 zeigt die Anzahl der Versuche mit den jeweiligen Kombinationen. Man kann hier die Summen der Versuche in den verschiedenen Konfigurationen ablesen. Im Zuge der gegenständlichen Arbeit wurden 84 Auszugsversuche durchgeführt, aufgezeichnet und ausgewertet. Dazu waren je Probekörpermaterial 14 Probekörper nötig, an denen jeweils zwei Versuche durchgeführt wurden.

Tabelle 3.1: Versuchsprogramm

	Verbundanker (KA)		Betonschraube (SA)		Summe
	Hammerbohren (H)	Kernbohren (K)	Hammerbohren (H)	Kernbohren (K)	
Beton (B)	7	7	7	7	28
Kalksandstein (K)	7	7	7	7	28
Quarzsandstein (R)	7	7	7	7	28
Summe	21	21	21	21	84

Nachfolgend werden die während der Versuche verwendeten Bezeichnungen/Abkürzungen aufgeschlüsselt. Jedem Versuch ist eine exakte Bezeichnung und eine Nummer zwischen eins und sieben zugeordnet. Die Versuchsbezeichnungen setzen sich aus vier Teilen zusammen, dem Probekörpermaterial, der Bohrmethode, der Dübelart und der laufenden Nummer in der Serie. Dabei wurden folgende Abkürzungen verwendet:

- Probekörpermaterial
 - (B) Beton
 - (K) Kalksandstein
 - (R) Quarzsandstein
- Bohrmethode
 - (H) Hammergebohrt
 - (K) Kernebohrt
- Dübelart
 - (KA) Verbundanker
 - (SA) Betonschraube

Die Bezeichnung RHSA 5 beispielsweise bezeichnet daher einen Versuch an einem Quarzsandsteinprobekörper mit einem hammergebohrten Bohrloch und einer Betonschraube.

3.5 Auszugsgerät

Das Auszugsgerät wurde eigens für die Versuche dieser Arbeit entwickelt und im Labor zusammengesetzt. Es besteht im wesentlichen aus folgenden Elementen: einem Trägerprofil U 160, einem Hydraulikzylinder, einer Kraftmessdose, drei verstellbaren Gerätebeinen, einer Verbindungsmittelaufnahme, einer Zugstange und einer Lastverteilungsplatte. Diese Einzelkomponenten wurden speziell aufeinander abgestimmt und zu dem in Abbildung 3.8 dargestellten Auszugsgerät zusammengesetzt. Für einige der Bestandteile wurden bereits fertige Produkte verwendet, wie der Hydraulikzylinder, die Kraftmessdose und die Verbindungsmittelaufnahme. Die restlichen Teile hatten zwar einen gewissen Vorfertigungsgrad, mussten aber zur Fertigstellung noch weiter bearbeitet werden.

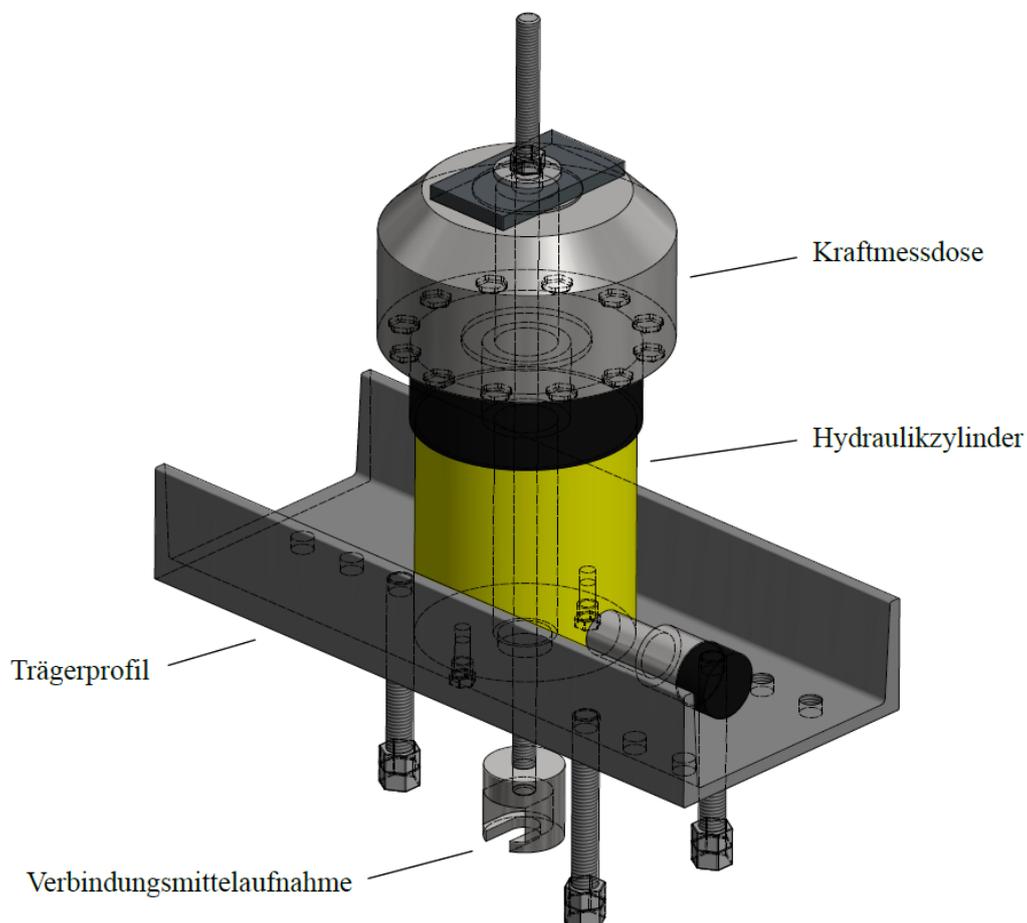


Abbildung 3.8: Auszugsgerät

Als Hydraulikzylinder wurde ein Hohlzylinder der Firma ENERPAC vom Fabrikat RCH302 eingesetzt. Dieser eignet sich auf Grund der Größe und Leistungsfähigkeit, gut für die geplanten Versuche. Mit dem Zylinder kann eine maximale Kraft von 300 kN erreicht werden. Als Basis für das Auszugsgerät kommt ein Trägerprofil aus Stahl

zum Einsatz. Es dient als Brücke zwischen dem Hohlzylinder und den verstellbaren Gerätebeinen. Das Trägerprofil besteht aus einem 378 mm langen U-160 Stahlprofil.

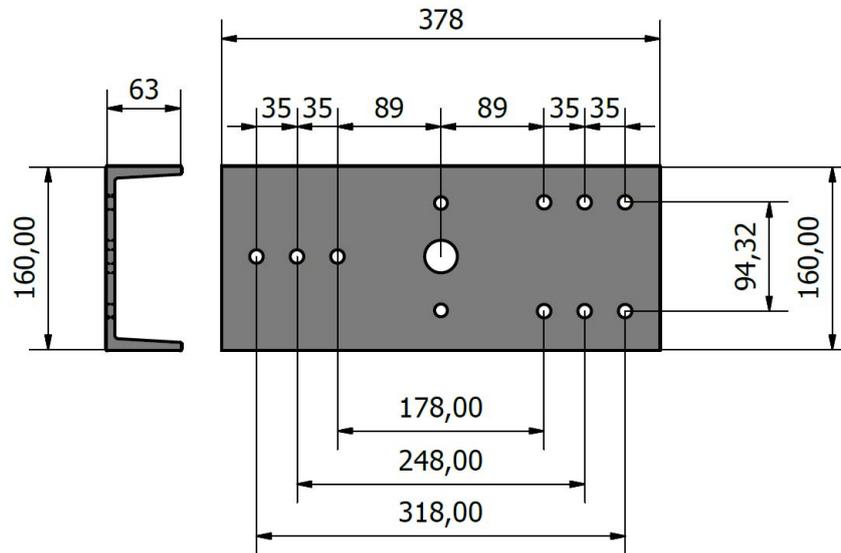


Abbildung 3.9: Träger-Profil

In das Trägerprofil wurden Löcher für die Gerätebeine, die Befestigung des Hydraulikzylinders und die Durchführung der Zugstange gebohrt. Die Löcher für die Gerätebeine verfügen außerdem über ein Innengewinde um die Höhe des Auszugsgerätes verstellen zu können. Durch das Gewinde ist es ebenfalls möglich, das Auszugsgerät waagrecht auszurichten. Es gibt für jedes Standbein drei Löcher, in einem Abstand von 35 mm, wodurch die Position der Gerätebeine je nach Bedürfnis und Größe des Ausbruchkegels verändert werden kann. Die Gerätebeine bestehen aus Gewindestangen M14 und zwei Schraubenmuttern am Ende, um die Aufstandsfläche zu erhöhen. Die genaue Anordnung der Bohrungen ist in Abbildung 3.9 dargestellt.

Abbildung 3.10 zeigt einen errechneten Ausbruchkegel für eine der untersuchten Betonschrauben in einem Betonprobekörper. Für die Abbildung wurde bewusst ein Betonprobekörper zur Veranschaulichung gewählt, da dieser in etwa die durchschnittlichen Abmessungen der Natursteinprobekörper widerspiegelt. Die effektive Einbindetiefe h_{ef} beträgt 46,4 mm. Der Radius des Ausbruchkegels ergibt sich durch: $r = 1,5 \cdot h_{ef}$. Es ist zu erkennen, dass der Ausbruchkegel etwas über die Abmessungen des Probekörpers hinausgeht. Wie in Kapitel 2.2.4 angeführt, ist daher ein Versagen des Dübels durch Spalten oder Herausziehen wahrscheinlich.

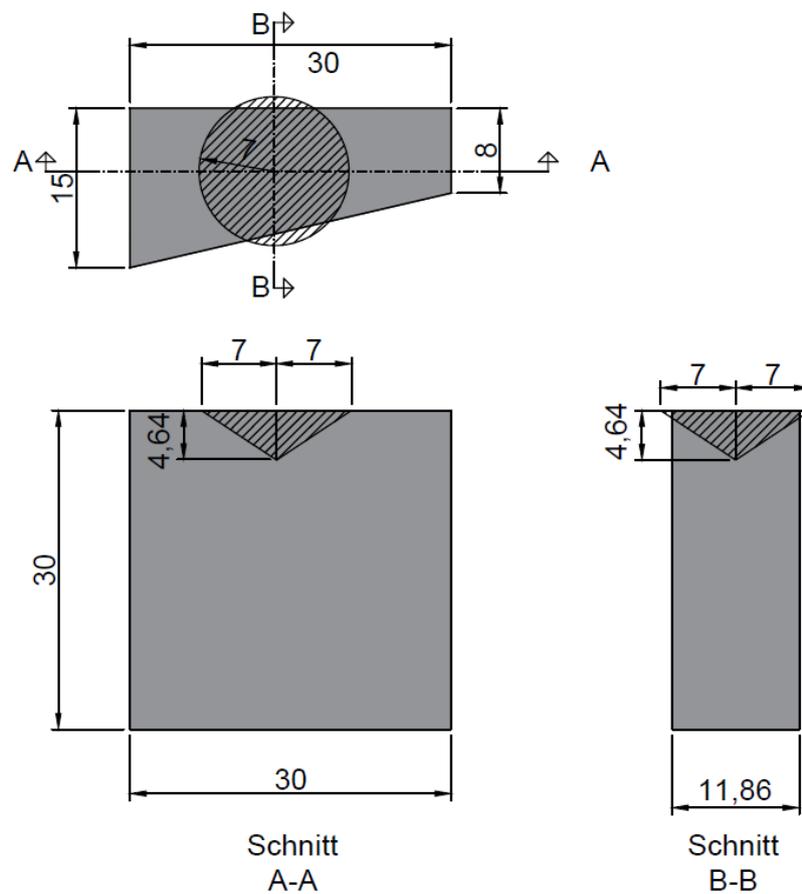


Abbildung 3.10: Probekörper mit errechnetem Ausbruchskegel ($h_{ef} = 46,4$ mm)

Der obere Teil des Auszugsgerätes besteht aus dem Hydraulikzylinder und der Kraftmessdose. Der Zylinder ist mit zwei Schrauben in der Mitte des Trägerprofils befestigt. Mittels eines speziell angefertigten Verbindungsteils (siehe Abbildung 3.11) ist wiederum die Kraftmessdose mit dem Hohlzylinder verbunden.

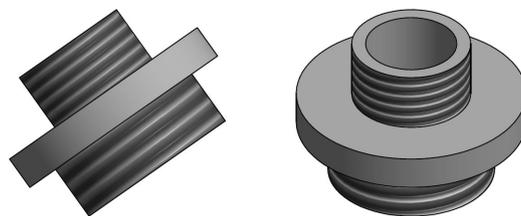


Abbildung 3.11: Verbindungsteil Hohlzylinder/Kraftmessdose

Der Hohlzylinder und die Kraftmessdose haben in der Mitte ein durchgängiges vertikales Loch, durch das eine Zugstange führt. Die Durchführungen beider Bauteile sind mit einem Innengewinde versehen, in die das Verbindungsteil eingeschraubt ist. Dadurch

ist eine kraftschlüssige Verbindung der Kraftmessdose mit dem Hydraulikzylinder gegeben. Die Zugstange, eine Gewindestange M12, ist über eine Lastverteilungsplatte und eine Schraubenmutter auf der Kraftmessdose aufgehängt. Durch das durchgängige Loch in der Mitte des Auszugsgerätes führt die Zugstange bis zur Verbindungsmittelaufnahme. An der Zugstange ist die Verbindungsmittelaufnahme befestigt (siehe Abbildung 3.12), welche von der Firma HILTI AUSTRIA GES.M.B.H. zur Verfügung gestellt wurde. Die Aufnahme ist ein Bestandteil des Dübelprüfgerätes HAT28, kann aber durch eine Gewindebohrung an der Oberseite ohne Probleme an jeder Gewindestange (M12) befestigt werden.



Abbildung 3.12: Verbindungsmittelaufnahme

3.6 Vorversuche

Für die Entwicklung des Versuchsaufbaus waren einige Vorversuche nötig. Es wurden 12 Vorversuche mit verschiedenen Konfigurationen durchgeführt. Der Versuchsaufbau wurde dabei stetig anhand der gewonnenen Erkenntnisse weiterentwickelt. Während der Vorversuchsphase wurden ausschließlich Betonschrauben mit hammergebohrten Bohrlöchern verwendet, da diese sofort nach dem Setzvorgang voll belastbar sind. An einem Probekörper wurden mit Ausnahme von Vorversuch 3 immer zwei Versuche der selben Konfiguration durchgeführt.

3.6.1 Vorversuche A und B

Die ersten beiden Versuche wurden an Kalksandsteinquadern durchgeführt. Dabei wurde ausschließlich die mechanische Funktion des Auszugsgerätes überprüft und keinerlei Verschiebungsmessungen vorgenommen. Die Versuche zeigten, dass die Verbindung zwischen Kraftmessdose und Hydraulikzylinder zu schwach war, um zu gewährleisten, dass die beiden Elemente des Auszugsgerätes beim Versagen der Verankerung fest verbunden bleiben. Die Verbindung dieser beiden Elemente bestand bis zu diesem Zeitpunkt aus einem Blechrohr, das nur eine seitliche Verschiebung verhinderte, aber keine Zugkräfte aufnehmen konnte, die aber durch den Ruck beim Versagen entstehen.

Um die Problematik zu lösen, wurden die Innengewinde, die sowohl in im Hydraulikzylinder, als auch in der Kraftmessdose vorhanden sind, genutzt und mit einem speziell angefertigten Verbindungsstück verbunden (siehe Abbildung 3.11).

3.6.2 Vorversuche 1 und 2

Für die Vorversuche 1 und 2 sowie 3 bis 5 wurden ausschließlich Quarzsandstein-Probekörper verwendet. Mit den Vorversuchen 1 und 2 wurde die gewählte Probengeometrie (Probenhöhe von 30 cm) überprüft und bestätigt. Es stellte sich allerdings heraus, dass die ursprünglich angedachte Positionierung des Auszugsgerätes, mit den Füßen auf der Probe stehend, problematisch ist. Die Versagensform Spalten, die hier bei beiden Versuchen aufgetreten ist, führt zu einem Versagen der Probekörper über die gesamte Breite (siehe Abbildung 3.13). Durch das auf der Probe stehende Auszugsgerät wird der Ausbruchskörper allerdings überdrückt, was zu einem verfälschten Ergebnis führt.

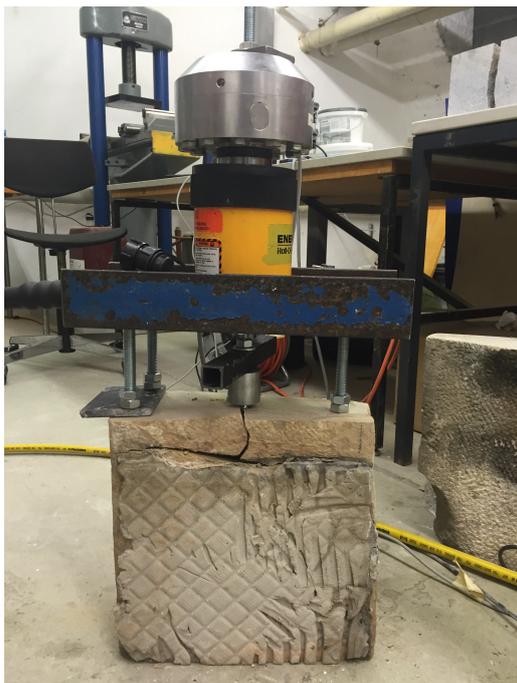


Abbildung 3.13: Vorversuch 2



Abbildung 3.14: Vorversuch 3

3.6.3 Vorversuch 3

Um den Auszugsversuch durchführen zu können, muss sich das Auszugsgerät am Probekörper abstützen. Bei Vorversuch 1 und 2 stütze sich das Auszugsgerät direkt auf der Oberfläche der Probekörper ab. Dies führte jedoch dazu, dass der Ausbruchskörper überdrückt wurde, was zu einer Verfälschung des Messergebnis führte. Es musste eine Lösung gefunden werden bei der das Auszugsgerät nicht auf der Probekörperoberfläche steht, sich jedoch trotzdem auf dem Probekörper abstützen kann.

Eine Möglichkeit ist, den Probekörper in einen Sockel zu betonieren und das Auszugsgerät auf diesen Sockel zu stellen. Dies wurde bei Vorversuch 3 ausprobiert (siehe Abbildung 3.14). Die Auszugskraft wird über den Betonsockel in den Probekörper übertragen. Die Verbindung zwischen dem Betonsockel und dem Probekörper wurde durch Steckisen gewährleistet. Um den Sockel zu versteifen wurden an der Zugseite des Sockels zwei Schraubzwingen angebracht.

Das Ergebnis des Vorversuchs 3 war ähnlich den Ergebnissen der Vorversuche 1 und 2, allerdings konnte hierbei eine Überdrückung des Probekörpers ausgeschlossen werden. Diese Lösung ist auf Grund des hohen Materialaufwands allerdings nicht für eine größere Anzahl von Versuchen geeignet.

3.6.4 Vorversuche 4 und 5

Bei den Vorversuchen 4 und 5 kam eine andere Lösung zum Einsatz, bei der die Probekörper auf halber Höhe durchbohrt und mit zwei durchgesteckten Gewindestangen versehen wurden. Das Auszugsgerät stützt sich über die Gewindestangen auf dem Probekörper ab. Durch diese Lösung wurde es möglich einen Auszugsversuch, ohne großen Materialaufwand durchzuführen, bei dem das Auszugsgerät nicht auf der Probekörperoberfläche steht (siehe Abbildung 3.15).



Abbildung 3.15: Vorversuch 4



Abbildung 3.16: Vorversuch 6

3.6.5 Vorversuche 6 und 7

Für die Vorversuche 6 bis 10 wurden ausschließlich Betonprobekörper, wie unter Punkt 3.3.1 beschrieben, mit hammergebohrten Bohrlöchern und Schraubankern verwendet. Die Verschiebungsmessung erfolgte bis einschließlich Versuch 5 mit einem Wegaufnehmer, der mittels einem justierbaren Arm auf der Grundplatte des Auszugsgerätes befestigt war. Da sich die Gewindestangen auf denen das Auszugsgerät steht unter der Belastung durchbiegen, verschiebt sich die Grundplatte mit dem Hydraulikzylinder nach unten. Diese Verschiebung würde zu einer verfälschten Messung führen, deshalb wurde bei den Vorversuchen 6 und 7 die Verschiebungsmessung über einen Querbalken direkt über der Aufnahme und zwei am Boden stehenden Wegaufnehmern links und rechts des Probekörpers realisiert (siehe Abbildung 3.16).

3.6.6 Vorversuche 8 und 9

Um die Einbindetiefe der Anker konstant zu halten und die Verbindung mit der Aufnahme zu erleichtern wurde ein Anbauteil entwickelt. Das Anbauteil soll das Bauteil simulieren, das mit dem Dübel an der Stufe befestigt werden soll. Es besteht aus zwei Beilagscheiben und einem 6,8 mm hohem Eisenring. Die Höhe des Anbauteiles beträgt 15 mm. Die Vorversuche 8 und 9 dienten dazu, die Auswirkungen des Anbauteils zu überprüfen. Außerdem wurde bei Vorversuch 9 zusätzlich die Verschiebung an der Oberseite des Auszugsgerätes, mit einem außerhalb des Systems angebrachten Wegaufnehmer gemessen (siehe Abbildung 3.17).



Abbildung 3.17: Vorversuch 9



Abbildung 3.18: Vorversuch 10

3.6.7 Vorversuch 10

Bei Vorversuch 10 kam ein Rahmen zum Einsatz, um die Verschiebung an der Oberseite des Auszugsgerätes zu messen (siehe Abbildung 3.18). Der Wegaufnehmer wurde in der Mitte des Rahmens angebracht und setzt auf der Platte oberhalb der Kraftmessdose an. Die dadurch mitgemessene Dehnung der Gewindestange im Auszugsgerät kann bei der Auswertung mittels Hooke'schem Gesetz herausgerechnet werden.

3.7 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau wurde in Anlehnung an die *Europäischen technischen Leitlinien (ETAG) für Metalldübel zur Verankerung im Beton* entwickelt. Dieser besteht im wesentlichen aus dem Auszugsgerät und den messtechnischen Elementen. Für den ordnungsgemäßen Versuchsablauf spielt aber besonders die Anordnung der einzelnen Elemente und deren Verknüpfung eine große Rolle. Bei Dübelauszugsversuchen im Betonbau werden meist große Betonplatten eingesetzt, an denen dann mehrere Versuche durchgeführt werden. Die Probengeometrie der Naturstufen ist jedoch vorgegeben und der Versuchsaufbau musste erst entwickelt werden. Versuche an großen Natursteinplatten kamen nicht in Frage, da besonders die Ergebnisse bei den kleinen Querschnitten untersucht werden sollten. Durch die Vorversuche (siehe Unterkapitel 3.6) war es möglich, den Versuchsaufbau für die Versuche an Natursteinstiegen anzupassen.

Eine besondere Herausforderung stellte dabei die geringe Probenfläche der Stufenquerschnitte dar. Im Normalfall stützt sich ein Dübelauszugsgerät direkt auf dem Ankergrund ab. Dabei ist darauf zu achten, dass die Abstützung den Ausbruchskegel nicht beeinflusst. Die Vorversuche zeigten jedoch, dass die Probenflächen der Naturstufen zu klein sind um das Auszugsgerät direkt auf dem Ankergrund abstützen zu können, ohne die Messung zu beeinflussen. Aus diesem Grund wurde im Zuge der Vorversuche eine indirekte Abstützung entwickelt. Das Auszugsgerät stützt sich während der Versuche auf zwei Gewindestangen ab, die durch zwei Löcher in halber Höhe der Probekörper geführt werden (siehe Abbildung 3.19). Als Brücke zwischen den beiden Gewindestangen dienen Holzbalken, durch welche auch die Höhendifferenz zwischen den Gewindestangen und der Probekörperoberfläche überbrückt wird. Um die Last der Gerätebeine besser zu verteilen, wurde auf den Holzbalken eine 4 mm starke Stahlplatte als Unterlage verwendet. Mit den Gerätebeinen wurde das Auszugsgerät vor den Versuchen in eine lotrechte Position gebracht.

Für die Verschiebungsmessung wurde rund um den Versuchsaufbau eine Rahmenkonstruktion gebaut. Auf die Messung der Verschiebungen wird im Abschnitt 3.7.1 Messtechnik noch detaillierter eingegangen. Die Probekörper stehen während der Versuche auf eine Platte, die sich wie eine Schublade unter den Rahmen schieben lässt. Dies ermöglicht ein unkompliziertes Zusammensetzen des Versuchsaufbaus, außerhalb der Rahmenkonstruktion, ohne dabei durch diesen behindert zu werden. Für den Versuch

wird die Platte mit dem justierten Versuchsaufbau unter den Rahmen geschoben und der Wegaufnehmer am Rahmen auf der Platte oberhalb der Kraftmessdose angesetzt.

In Abbildung 3.19 ist der gesamte Versuchsaufbau inklusive der Rahmenkonstruktion zu sehen. Die Messinstrumente und der Hydraulikzylinder sind farbig dargestellt. In Dunkelgrau sind alle Stahlbauteile und in Hellgrau der Probekörper dargestellt. Die Weiß dargestellten Elemente sind aus Holz, das betrifft vor allem den Rahmen, die Holzbalken auf den Gewindestangen und die Halterungen für die Wegaufnehmer. In der Mitte des Probekörpers ist strichliert die Durchführung für die Gewindestangen abgebildet.

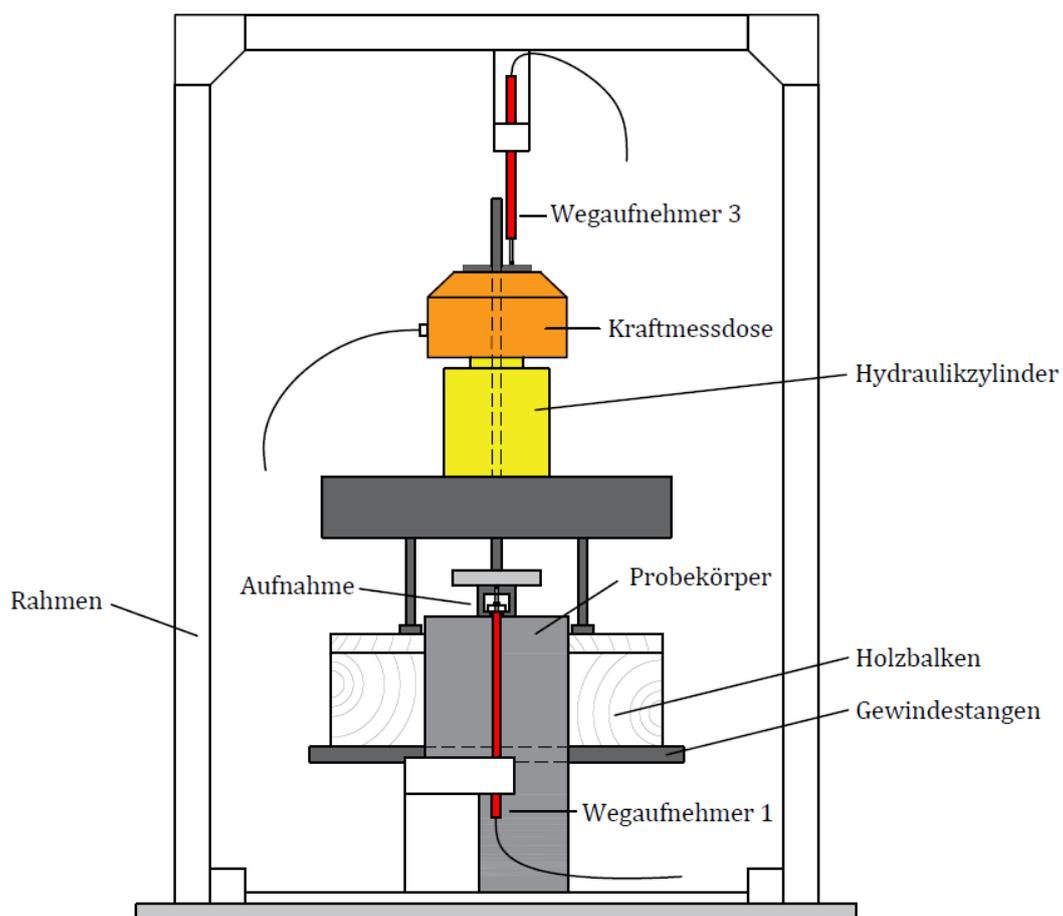


Abbildung 3.19: Versuchsaufbau, Ansicht von Vorne

3.7.1 Messtechnik

Während des Versuchsablaufes wurde zu jeder Zeit die aufgebrachte Kraft und die Verschiebung des Dübels gemessen. Die Messtechnik des Versuchsaufbaus besteht aus folgenden Bestandteilen:

- Eine Kraftmessdose (HBM U10M / 125 kN)
- Drei Wegaufnehmer (HBM WA 50 mm)
- Ein QUANTUM X Universalmessverstärker (HBM MX840A)

Alle Bestandteile die für die Messtechnik eingesetzt wurden, sind Fabrikate der Firma HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK GMBH (HBM). Die vom Hydraulikzylinder erzeugte Kraft wurde durch eine Kraftmessdose des Fabrikats HBM U10M erfasst. Die drei Wegaufnehmer werden für die Verschiebungsmessung während der Auszugsversuche eingesetzt. Der Messverstärker Quantum X dient dabei als Bindeglied zwischen den Aufnehmern, sowie der Kraftmessdose und der EDV gestützten Messdatenerfassung.

Die Verschiebungsmessung erfolgte an zwei Punkten des Versuchsaufbaues. Zum einen wurde die Verschiebung an einem Punkt auf der Platte oberhalb der Kraftmessdose gemessen und zum anderen direkt über der Verbindungsmittelaufnahme. Die Auswertung der beiden Messpunkte der Verschiebungsmessung erfolgte getrennt. Der Wegaufnehmer zur Verschiebungsmessung oberhalb der Kraftmessdose ist an einer unabhängigen Rahmenkonstruktion befestigt (siehe Abbildung 3.19). Dieser Wegaufnehmer wird in weiterer Folge auch als WA 3 bezeichnet. Die gemessene Verschiebung dieses Wegaufnehmers wurde bei der Versuchsauswertung um die Dehnung der Zugstange bereinigt.

Die Verschiebungsmessung direkt auf der Verbindungsmittelaufnahme erfolgte mittels zwei Wegaufnehmern links und rechts des Probekörpers und einem Balken der an der Aufnahme befestigt wurde (siehe Abbildung 3.20). Diese Wegaufnehmer werden im Zuge dieser Arbeit auch als WA 1 und WA 2 bezeichnet. Als Befestigungsebene der beiden Wegaufnehmer diente die verschiebbare Platte, auf der auch der Probekörper steht. Dazu wurden zwei Wegaufnehmerhalterungen aus Holz an der Platte befestigt. Die Verschiebung am Messpunkt ergibt sich aus dem Mittelwert der Verschiebungen an den beiden Wegaufnehmern.

In Abbildung 3.19 und Abbildung 3.20 sind die Wegaufnehmer in roter Farbe dargestellt. Die Rahmenkonstruktion ist in Abbildung 3.20 nicht dargestellt.

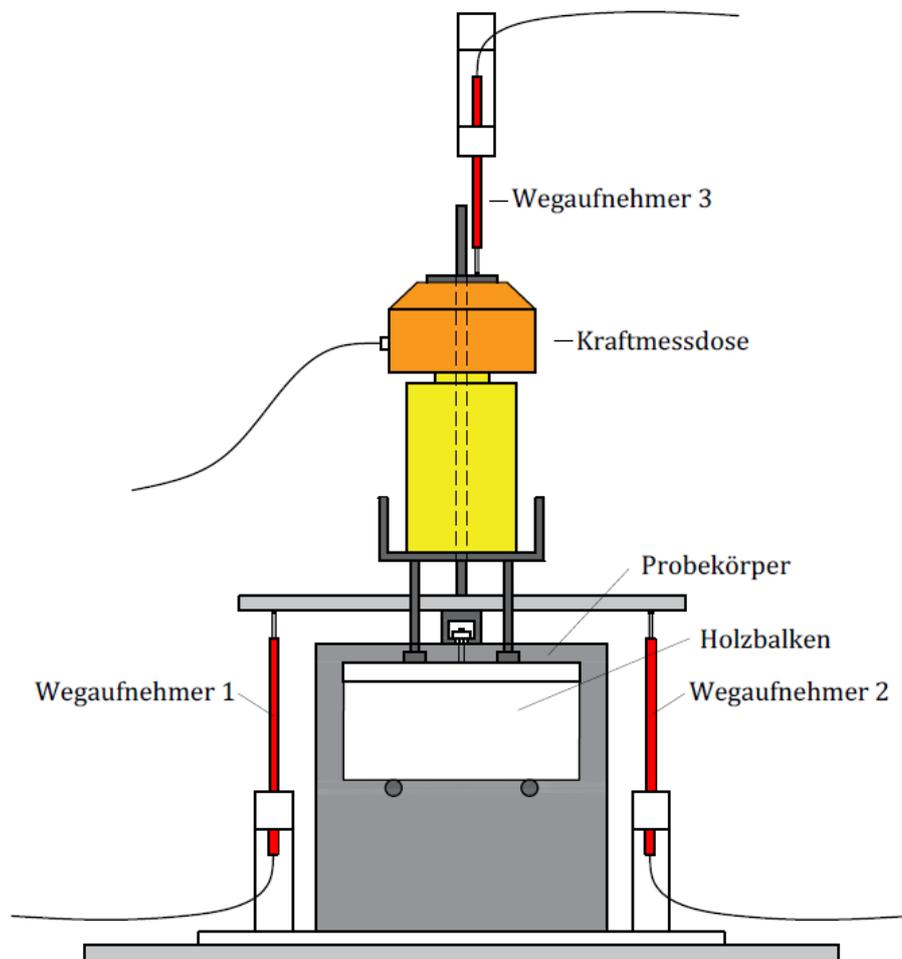


Abbildung 3.20: Darstellung des Versuchsaufbaus mit Messtechnik von der Seite

3.8 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung bedurfte einer strukturierten Vorbereitung und Planung, um bei der großen Anzahl an Probekörpern und Versuchskonfigurationen den Überblick zu behalten. Es musste schon zu Beginn an festgelegt werden an welchen Probekörpern welche Versuche durchgeführt werden. Außerdem war es nötig eine einheitliche Position für die Bohrlöcher zu definieren, da jeder Probekörper der Naturstufen eine andere Querschnittform und Größe hat. Jeder Versuchsablauf wurde mittels einer Checkliste überwacht. Während der Versuchsdurchführung wurde zusätzlich zur EDV-gestützten Messdatenerfassung ein händisches Protokoll geführt, das alle wesentlichen Daten sowie besondere Vorkommnisse enthält.

Alle Probekörper wurden vor den Versuchen an der Unterseite und an der Oberseite mit der Versuchsbezeichnung beschriftet. Ab diesem Zeitpunkt war genau festgelegt an welchem Probekörper welcher Versuch durchgeführt wird. Um Verwechslungen zu

vermeiden, wurden die Probekörper anschließend nach Serien sortiert.

Die Bohrlochposition wurde einheitlich für alle durchgeführten Versuche derart gewählt, dass die Dübel immer im Flächenmittelpunkt der Probenflächen gesetzt werden. Dazu ermittelte man den Flächenmittelpunkt der Probekörper. Der Umriss der Proben wurde auf Papier nachgezeichnet und eingescannt. Die Flächeninhalte und der Flächenmittelpunkt konnten anschließend mittels Software ausgewertet werden. Um die Flächenmittelpunkte auf die Proben übertragen zu können, wurden Schablonen erstellt und der Flächenmittelpunkt auf jeder Probenfläche markiert. An diesen Markierungen konnten später die Bohrungen gesetzt werden.

Als nächster Schritt war es nötig jeden Probekörper auf halber Höhe zweimal zu durchbohren um die Gewindestangen für den Versuchsaufbau anbringen zu können. Dies erfolgte mit einem Diamantbohrgerät, um möglichst keinen Materialausbruch beim durchstoßen der Probekörper zu erzeugen. Während der Versuche konnte festgestellt werden, dass sich Hammerbohren für diesen Zweck nicht eignet.

Die Herstellung der Bohrungen für die Dübel erfolgten alle in einem Zug. Es wurden zuerst die hammergebohrten Löcher und anschließend alle kerngebohrten Löcher hergestellt. Vor dem Setzen der Dübel wurde jedes Bohrloch laut Herstellerangaben ausgeblasen und gereinigt.

Um eine zügige Versuchsdurchführung zu ermöglichen, erfolgte das Setzen der Verbundanker zumindest einen Tag vor den Auszugsversuchen. Die Aushärtezeit des Injektionsmörtels beträgt laut Produktbeschreibung 45 Minuten bei 20 °C bis 29 °C. Bei den Betonschrauben erfolgte das Setzen der Dübel stets unmittelbar vor dem Auszugsversuch. Das Eindrehen der Dübel wurde dabei händisch mittels Drehmomentschlüssel ausgeführt. Vor dem Setzen der Dübel wurde die Tiefe und der Durchmesser jedes Bohrlochs mit einer Schublehre vermessen und im Prüfprotokoll vermerkt.

Zur Durchführung des Versuchs wurden die Probekörper auf die Bodenplatte des Versuchsaufbaus gehoben. Dort wurden die beiden Gewindestangen durch die Probekörper gesteckt und die Holzbalken in Position gebracht. In manchen Fällen mussten zum Höhenausgleich Holzplättchen eingesetzt werden, die unter die beseitigten Stahlplatten gelegt wurden. Das Auszugsgerät wurde anschließend auf die Konstruktion gesetzt und mit den verstellbaren Gerätefüßen justiert.

Nachdem Platte mit dem Probekörper unter den Rahmen geschoben wurde, mussten die drei Wegaufnehmer auf Kontakt mit den Messpunkten gebracht werden. Vor dem Versuchsstart erfolgte eine Nullung sowie eine Funktionskontrolle der Messgeräte.

Der Hydraulikzylinder wurde mit einer Handpumpe der Firma Enerpac betrieben. Der Kraftanstieg erfolgte deshalb nicht komplett linear, sondern aufgrund der Pumpbewegung stufenförmig. Das Versagen der Dübel trat meist plötzlich und ohne Vorankündigung ein und das Auszugsgerät musste vor dem Herunterfallen geschützt werden. Das Auszugsgerät musste daher kurz vor dem Versagen immer mit einer Hand gesichert werden. Vor und nach den Versuchen wurde jeder Probekörper fotografiert.

In Abbildung 3.21 ist der Versuchsablauf bis zum Versagen in vier Bildern dargestellt. Bild eins zeigt den Versuchsstart. Links im Bild ist die händische Hydraulikpumpe zu sehen. Vor dem Start wurden alle Wegaufnehmer auf null gestellt und die EDV-Aufzeichnung gestartet. In Bild zwei sieht man den ersten Pumpvorgang, dieser wurde dann bis zum Versagen wiederholt. Dabei wird Hydrauliköl in den Hohlzylinder gepumpt, welcher dadurch nach oben ausfährt. Bild drei zeigt den Versuch kurz vor Erreichen der Auszugslast. Gegen Ende des Versuchs wurde der Versuchsaufbau mit einer Hand gesichert, um ein Herunterfallen zu verhindern. In Bild vier hat der Probekörper bereits versagt. Das hier aufgetretene Versagen ist „Spalten“.

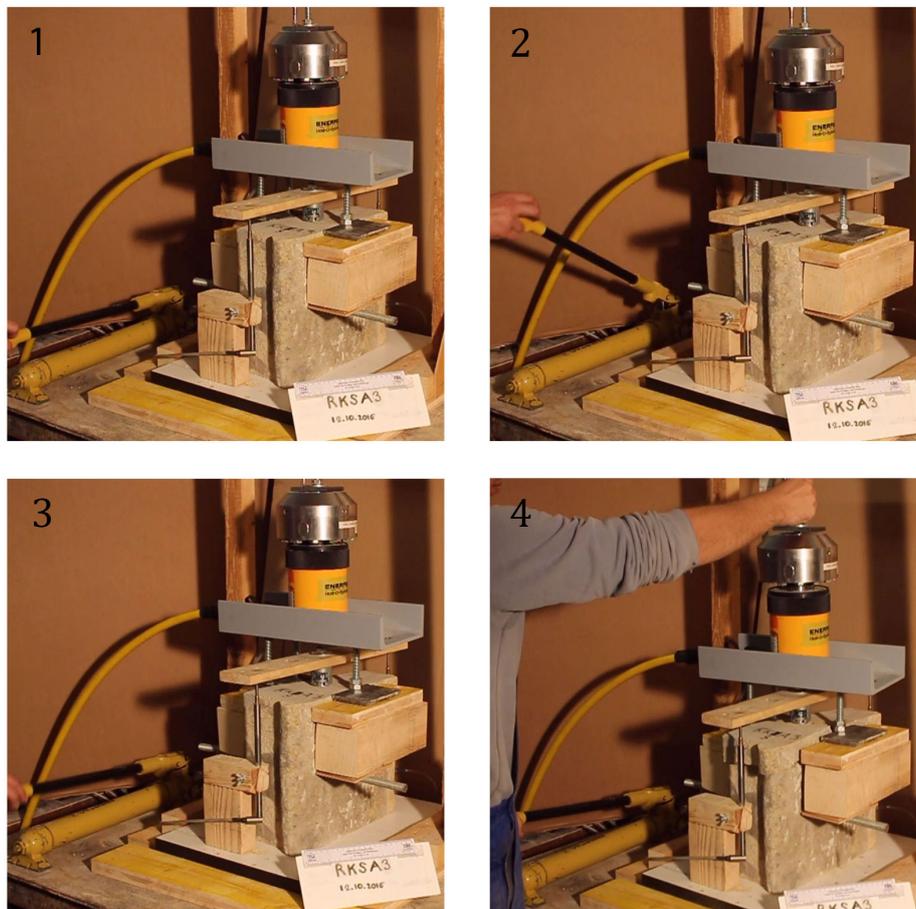


Abbildung 3.21: Versuchsablauf

Kapitel 4

Versuchsergebnisse

In diesem Kapitel werden die Auswertungsmethode, und die Ergebnisse im Detail beschrieben. Die Ergebnisse der Versuche basieren auf den Messungen, die während der Versuche durchgeführt wurden. Wie in Abschnitt 3.7.1 beschrieben, wurde bei jedem Auszugsversuch kontinuierlich die aufgebrachte Kraft und die zugehörige Verschiebung des Ankers gemessen. Zur Verarbeitung der Ergebnisrohdaten wurde ein Auswertungsprogramm in MS Excel erstellt, welches in Abschnitt 4.1 näher beschrieben wird. Die Ergebnisse werden im Abschnitt 4.2 in Tabellen und Diagrammen dargestellt und im Text beschrieben.

4.1 Methode zur Auswertung der Ergebnisse

Die Auswertung der Versuchsdaten erfolgte in einem speziell dafür erstellten Auswertungsprogramm, das mit MS Excel erstellt wurde. Das Programm ermöglicht es, wahlweise verschiedene Versuche automatisiert in einem Kraft-Verschiebungs-Diagramm darzustellen. Dadurch ist es möglich sehr schnell unterschiedliche Versuche miteinander zu vergleichen. Auf eine Auswertung mit SPSS oder ähnlichen Programmen wurde bewusst verzichtet, da das entwickelte Excel Programm für die vorhandene Aufgabenstellung ausreichend war und sehr leicht auf die gewünschten Anforderungen angepasst werden konnte.

Das im Zuge dieser Arbeit entwickelte Programm wurde mit der rS1.Methode nach SCHECK (2009), ohne Makros und VBA-Code programmiert. Die Programmierung erfolgte basierend auf einem modularen Aufbau. Ein Modul entspricht dabei einem Tabellenblatt in der Datei. Es gibt Module zur Programmsteuerung und Darstellung der Ergebnisse, für den Berechnungskern, und diverse Module zur Dateneingabe und Datenspeicherung. Jedes Tabellenblatt ist entsprechend seiner Nutzung unterschiedlich gestaltet. Alle Module sind dennoch nach einem bestimmen Schema erstellt wor-

den, das sich an der rS1.Methode orientiert. Das besondere der rS1.Methode ist die strukturierte Einteilung der Excel Datei in Tabellenblätter und die Verwendung einer speziellen Namenskonvention für Variablen (Zellennamen). Durch diese Struktur und den kombinierten Einsatz der Funktionen („bereich.verschieben“) und („indirekt“) ist es möglich, auch bei größeren Datenmengen gezielt und automatisiert auf ausgewählte Datenbereiche zuzugreifen.

Dadurch ist es möglich alle Versuchsdaten in einem Programm zu verwalten. Die Ergebnisdaten wurden während den Versuchen als *.csv. Dateien gespeichert. Diese Daten wurden in das Auswertungsprogramm eingelesen und dort in den dafür vorgesehenen Tabellenblättern abgespeichert. Das Programm ist so aufgebaut, dass jeweils eine Serie zu je sieben Versuchen in einem eigenen Tabellenblatt gespeichert wird. Zusätzlich sind in anderen Tabellenblättern Bilder und andere versuchsbezogene Daten wie beispielsweise die Versagensform und die Bohrlochdurchmesser gespeichert.

In Abbildung 4.1 ist die Auswahlmaske für die automatisierte Diagrammerstellung abgebildet. Mit dem Programm ist es über Drop-Down-Menüs möglich, bis zu sieben verschiedene Kraft-Verschiebungs-Kurven auszuwählen. Diese werden dann automatisch in einem Kraft-Verschiebungs-Diagramm dargestellt. Die Auswahl der Versuche erfolgt getrennt nach Probekörpermaterial, Bohrmethode, Dübelart und Nummer (siehe Abbildung 4.1). Man kann so jede beliebige Versuchskombination darstellen. Die weiteren Drop-Down-Menüs dienen zur Auswahl der gemessenen Verschiebungen nach Wegaufnehmern und der Möglichkeit die Dehnung der Zugstange herauszurechnen. Es besteht ebenfalls die Möglichkeit einzelne Kurven auszuschalten, die dann nicht im Diagramm dargestellt werden. Durch das Programm wird außerdem die maximale Kraft zu des jeweiligen Versuchs ermittelt. Diese wird automatisch im Diagramm angegeben und zusätzlich als Punkt dargestellt. In der Legende wird neben den Versuchsbezeichnungen auch die Versagensform angegeben (siehe Abbildung 4.2). Diese automatisierte Ergebnisverarbeitung ermöglicht eine unkomplizierte und einheitliche Auswertung sowie Darstellung der Versuchsergebnisse. Zu jedem der dargestellten Versuche zeigt das Programm zusätzlich je nach Versagensbild ein oder zwei Fotos. Im Auswahlmenü ist es weiters möglich zwischen den gemessenen Verschiebungen der Wegaufnehmer 1 & 2 sowie dem Wegaufnehmer 3 auszuwählen. Bei Auswahl des Wegaufnehmers 3 besteht zusätzlich die Option die berechnete Dehnung der Zugstange aus den Verschiebungen herauszurechnen.

	Stein	Bohrmethode	Dübel	Nr.	Wegaufnehmer	Dehnung Zugstange	Ein/Aus
1	Rekawinklerstein	Hammergebohrt	Schraubanker	1	Wegaufnehmer 1 & 2		<input checked="" type="checkbox"/>
2	Rekawinklerstein	Hammergebohrt	Schraubanker	2	Wegaufnehmer 1 & 2		<input checked="" type="checkbox"/>
3	Rekawinklerstein	Hammergebohrt	Schraubanker	3	Wegaufnehmer 1 & 2		<input checked="" type="checkbox"/>
4	Rekawinklerstein	Hammergebohrt	Schraubanker	4	Wegaufnehmer 1 & 2		<input checked="" type="checkbox"/>
5	Rekawinklerstein	Hammergebohrt	Schraubanker	5	Wegaufnehmer 1 & 2		<input checked="" type="checkbox"/>
6	Rekawinklerstein	Hammergebohrt	Schraubanker	6	Wegaufnehmer 1 & 2		<input checked="" type="checkbox"/>
7	Rekawinklerstein	Hammergebohrt	Schraubanker	7	Wegaufnehmer 1 & 2		<input checked="" type="checkbox"/>

Abbildung 4.1: Auswahlmöglichkeiten bei der automatisierten Auswertungsdatei

In Abbildung 4.2 ist exemplarisch ein mit dem Programm erstelltes Kraft-Verschiebungs-Diagramm abgebildet. Dieses Diagramm zeigt sieben Kraft-Verschiebungs-Kurven, der Serie Quarzsandstein-Hammergebohrt-Betonschraube. Auf der vertikalen Achse wird die gemessene Kraft in kN angegeben. Die horizontale Achse gibt die gemessene Verschiebung in mm an. Das Diagramm ist zur einfacheren Lesbarkeit mit einem quadratischen Raster hinterlegt. In der Legende sind die Versuchsbezeichnungen in abgekürzter Form angegeben, wie in Unterkapitel 3.4 angeführt. Jede Versuchsbezeichnung ist mit der Farbe der jeweiligen Kurve hinterlegt. Rechts neben den Versuchsbezeichnungen wird außerdem die Versagensform angegeben. Diese wurde für jeden Versuch nach den in Abschnitt 2.2.4 angegebenen Versagensformen ausgewertet. Zusätzlich zu den klassischen Versagensformen ist bei den durchgeführten Dübelauszugsversuchen ein kombiniertes Versagen aufgetreten. Dabei versagt der Dübel durch eine Kombination aus Herausziehen und einem oberflächlichem Materialversagen. Nachfolgend wird dieses Versagen kurz kombiniertes Versagen genannt.

In den Diagrammen und den Ergebnistabellen werden die Versagensformen wie folgt abgekürzt:

- (H) Herausziehen
- (A) Ausbruch
- (S) Stahlversagen
- (Sp) Spalten
- (KV) Kombiniertes Versagen

Rechts neben der Legende sind die Fotos der Probekörper abgebildet, diese sind immer der Versuchsbezeichnung links davon zugehörig. Die Fotos wurden jeweils nach den Versuchen aufgenommen und zeigen die Probekörper mit den versagten Ankern. Diese zusätzliche Information erleichtert die weitere Auswertung. In weiterer Folge werden die Diagramme aus Platzgründen ohne Fotos dargestellt. In Anhang B ist jedoch für jede Serie ein Diagramm mit allen zugehörigen Kraft-Verschiebungs-Kurven inklusive Fotos zu finden.

Die maximalen Kräfte, also die Bruchlasten oder auch Auszugslasten, wurden durch das Auswertungsprogramm ausgelesen und nochmals separat ausgewertet. In MS Excel erfolgte eine statistische Auswertung der Auszugslasten. Die Ergebnisse der statistischen Auswertung sind im Abschnitt 4.2 in Tabellenform dargestellt und beschrieben.

Es wurde für jede Serie der Minimalwert, der Maximalwert, der Mittelwert, die Standardabweichung und das 5 %- Quantil ermittelt. Zusätzlich wurden Balkendiagramme erstellt in denen die mittlere Auszugslast und die zugehörige Standardabweichung für jede Serie dargestellt ist. Die Balkendiagramme wurden dabei für jedes Probenmaterial getrennt erstellt.

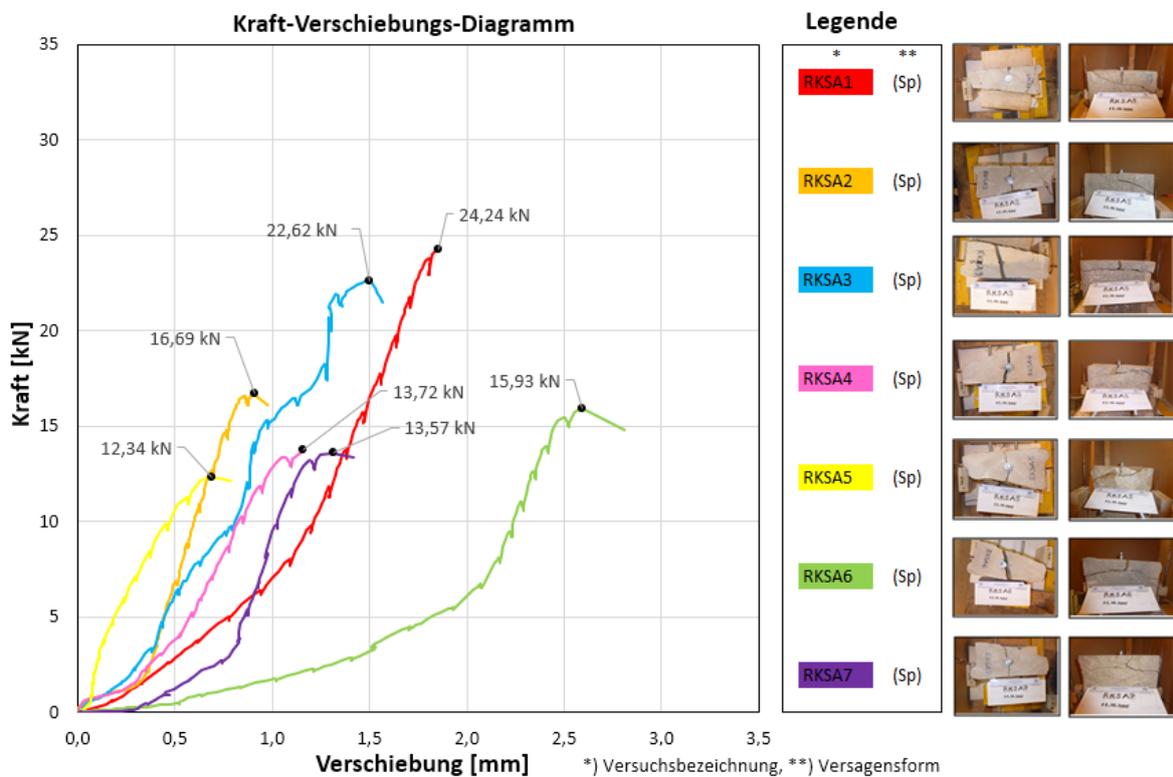


Abbildung 4.2: Exemplarische Ergebnisdarstellung des Auswertungsprogramms

4.2 Ergebnisse der Dübelauszugsversuche

In diesem Unterkapitel werden die Ergebnisse der Auszugsversuche dargestellt und beschrieben. Dazu werden die Ergebnisse in Gruppen nach Probekörpermaterial zusammengefasst und in der Reihenfolge Kalksandstein, Quarzsandstein und Beton angeführt. Zur leichteren Beschreibung werden die Serienbezeichnungen teilweise abgekürzt, wie unter Abschnitt 3.4 erläutert.

Die Auszugslasten sind Gruppenweise in Wertetabellen aufgelistet. Zu jeder Auszugslast wird auch die zugehörige Versagensform angeführt. Falls ein Versuch aus diversen Gründen von der weiteren Auswertung ausgeschlossen wurde, sind die Angaben zu diesem Versuch in der Wertetabelle durchgestrichen dargestellt. In einer zweiten Tabelle sind zu jeder Serie der Minimalwert, der Maximalwert, der Mittelwert, die Standardabweichung und das 5 %-Quantil der Auszugslasten sowie die Anzahl der gewerteten Versuche angegeben. Die mittleren Auszugslasten der Serien sind zusätzlich graphisch als Balkendiagramm abgebildet. Außerdem sind jeweils am Ende der Ergebnisbeschreibung ausgewählte Kraft-Verschiebungs-Diagramme dargestellt und näher beschrieben.

Bei den dargestellten Kraft-Verschiebungs-Diagrammen wurde immer auf die Verschiebungsmessung der Wegaufnehmer 1 & 2 zurückgegriffen. Mit diesen wurde die Verschiebung direkt über der Verbindungsmittelaufnahme gemessen. Dies hat den Vorteil, dass die Dehnung der Zugstange nicht berücksichtigt werden muss und etwaige Verdrehungen des Auszugsgerätes keinen Einfluss haben.

Die in Anhang B dargestellten Kraft-Verschiebungs-Diagramme beziehen sich ebenfalls auf die gemessenen Verschiebungen der Wegaufnehmer 1 & 2. Bei Versuchen, bei denen die Verschiebungsmessung der Wegaufnehmer 1 & 2 keine verwertbaren Ergebnisse lieferte, wurde auf die Werte des Wegaufnehmers 3 zurückgegriffen. In diesem Fall wurde die Dehnung der Zugstange rechnerisch kompensiert. Dies betrifft jedoch ausschließlich Kraft-Verschiebungs-Verläufe, die in Anhang B dargestellt sind. Die betroffenen Versuche sind: KKKA 1, RHKA 5, RHKA 6, RKKA 2, RHSA 4, BKKA 3, BKSA 3

Bei der Auswertung der Ergebnisse wurde von einer Normalverteilung der Auszugslasten ausgegangen. Zur Überprüfung, wurden die Auszugslasten einem Normalverteilungstest nach ANDERSON DARLING unterzogen. Der Test ergab, dass die Auszugslasten aller untersuchten Versuchskonfigurationen normalverteilt sind. Die Berechnung der Quantilwerte erfolgte unter Zugrundelegung der Student-t-Verteilung, die eine Sonderform der Normalverteilung darstellt. Die Quantilwerte wurden mittels t-Tabelle nach KAISER (1983) berechnet.

4.2.1 Ergebnisse der Auszugsversuche in Kalksandstein

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Auszugsversuche an den Kalksandsteinprobekörpern angeführt und beschrieben. In Tabelle 4.1 sind die Auszugslasten der Serien KHKA, KKKA, KHSA, KKSA mit den jeweiligen Versagensformen angegeben. Zunächst wird auf die Versuche eingegangen, die von der weiteren Auswertung ausgeschlossen wurden. Bei der Versuchsreihe KKSA konnten die Ergebnisse der Versuche 1,3,4 und 5 für die weitere Auswertung nicht herangezogen werden. Die Betonschrauben dieser Versuche waren nicht ordnungsgemäß gesetzt, diese Ergebnisse mussten deshalb ausgeschieden werden. Auf Grund eines defekten Diamantbohrkopfes waren die Bohrlochdurchmesser um ein bis zwei Millimeter zu groß, was zu einem unvollständigen Hinterschnitt der Betonschrauben führte. Dies zeigt sich auch in den niedrigen Bruchlasten dieser vier Versuche.

Die gewerteten Auszugslasten der vier Serien bewegen sich in einem Bereich zwischen 10,00 kN und 21,00 kN. Dabei kommen drei verschiedene Versagensformen vor, Herausziehen, Spalten und kombiniertes Versagen.

Innerhalb der Serien variieren die Bruchlasten abhängig von der Versuchskonfiguration unterschiedlich stark. Eine einheitliche Versagensform weist nur die Serie KKKA auf.

Das Versagen Herausziehen führte tendenziell zu niedrigeren Auszugslasten als die anderen beiden Versagensformen. Die höchsten Auszugslasten kamen beim Versagen Spalten zustande.

Tabelle 4.1: Gemessene Auszugslasten für Kalksandstein (durchgestrichene Werte wurden von der weiteren Auswertung ausgeschieden)

KHKA			KKKA			KHSA			KKSA		
Auszugslast	Versagen		Auszugslast	Versagen		Auszugslast	Versagen		Auszugslast	Versagen	
[kN]	-		[kN]	-		[kN]	-		[kN]	-	
1	13,14	H	1	16,86	Sp	1	13,08	H	1	3,93	H
2	18,06	Sp	2	15,04	Sp	2	18,58	Sp	2	16,21	KV
3	15,83	Sp	3	14,10	Sp	3	10,95	H	3	4,00	H
4	15,30	Sp	4	17,09	Sp	4	10,30	H	4	6,59	H
5	15,81	H	5	16,28	Sp	5	20,01	Sp	5	7,93	H
6	16,88	H	6	20,06	Sp	6	14,07	H	6	15,59	KV
7	15,49	KV	7	16,19	Sp	7	15,64	Sp	7	20,31	Sp

In Tabelle 4.2 werden der Minimalwert, der Maximalwert, der Mittelwert, die Standardabweichung und das 5% - Quantil der Auszugslasten sowie die Anzahl der gewerteten Versuche je Serie angegeben. Dies ermöglicht einen einfachen Vergleich der beiden Dübelssysteme und der beiden Bohrmethoden. Beim Vergleich der Dübelssysteme ist jedoch immer darauf zu achten, dass Ergebnisse der selben Bohrmethode miteinander verglichen werden. In Abbildung 4.3 ist ein Balkendiagramm mit den mittleren Bruchlasten der Auszugsversuche dargestellt.

Tabelle 4.2: Statistische Auswertung der Auszugslasten für Kalksandstein

Serie	Anzahl	Minimalwert	Maximalwert	Mittelwert	STABW	STABW	5% - Quantil
	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[kN]
KHKA	7	13,14	18,06	15,79	1,51	9,56	12,22
KKKA	7	14,10	20,06	16,52	1,88	11,38	12,07
KHSA	7	10,30	20,01	14,66	3,67	25,00	5,99
KKSA	3	15,59	20,31	17,37	2,57	14,78	9,20

Die Mittelwerte der Auszugslasten der Serien KHKA, KKKA, KHSA, KKSA unterscheiden sich nur geringfügig (siehe Tabelle 4.2). Innerhalb der Serien schwanken die Bruchlasten der einzelnen Versuche jedoch deutlicher.

Bei den hammergebohrten Verbundankern (KHKA) beträgt der Mittelwert der Auszugslast 15,79 kN, mit einer Standardabweichung von 9,56 %. In dieser Serie traten die Versagensformen Herausziehen, Spalten und kombiniertes Versagen auf. Das kombinierte Versagen, ist eine Kombination aus Herausziehen mit einem oberflächlichen Materialausbruch. Die höchste Bruchlast von 18,06 kN kam bei der Versagensform Spalten zustande. Das Versagen Herausziehen führte mit 13,14 kN zur kleinsten Bruchlast.

Bei den kerngebohrten Verbundankern (KKKA) liegt der Mittelwert der Auszugslasten mit 16,52 kN etwas höher als bei der Serie KHKA. Die Standardabweichung beträgt hier 11,38 %. Alle sieben Verbundanker dieser Serie versagten durch Spalten, wobei die minimale Bruchlast bei 14,10 kN und die maximale Bruchlast bei 20,06 kN lag.

Die Bruchlasten beider Serien weisen im Vergleich wenige Unterschiede auf, die Mittelwerte beider Serien sind etwa gleich groß und die Standardabweichung liegt in einem ähnlichen Bereich. Auffallend ist, dass in der KHKA dreimal das Versagen Herausziehen austritt.

Bei den Betonschrauben liegen die Auszugslasten der kerngebohrten Anker (KKSA) etwas höher als die der hammergebohrten Anker (KHSA). Die Auszugslasten der hammergebohrten Serie (KHSA) liegen im Mittel bei 14,66 kN, mit einer Standardabweichung von 25 %. In dieser Serie, trat bei den Versuchen 1, 3, 4 und 5 das Versagen Herausziehen auf. Des weiteren trat in dieser Serie die Versagensform Spalten auf. Herausziehen führte im Vergleich zu Spalten zu niedrigeren Bruchkräften, wodurch auch die Standardabweichung von 25 % zustande kommt. Die höchsten Bruchlasten kamen wie erwartet bei der Versagensform Spalten zustande.

Die Serie der kerngebohrten Betonschrauben (KKSA) erzielte einem Mittelwert von 17,37 kN, bei einer Standardabweichung von 14,74 %. Dieser Mittelwert ist der höchste der in den Kalksandsteinprobekörpern erreicht wurde. Es ist jedoch anzumerken, dass bei der Serie KKSA nur drei Versuche für die Auswertung herangezogen werden konnten. Die aufgetretenen Versagensformen sind Spalten und kombiniertes Versagen.

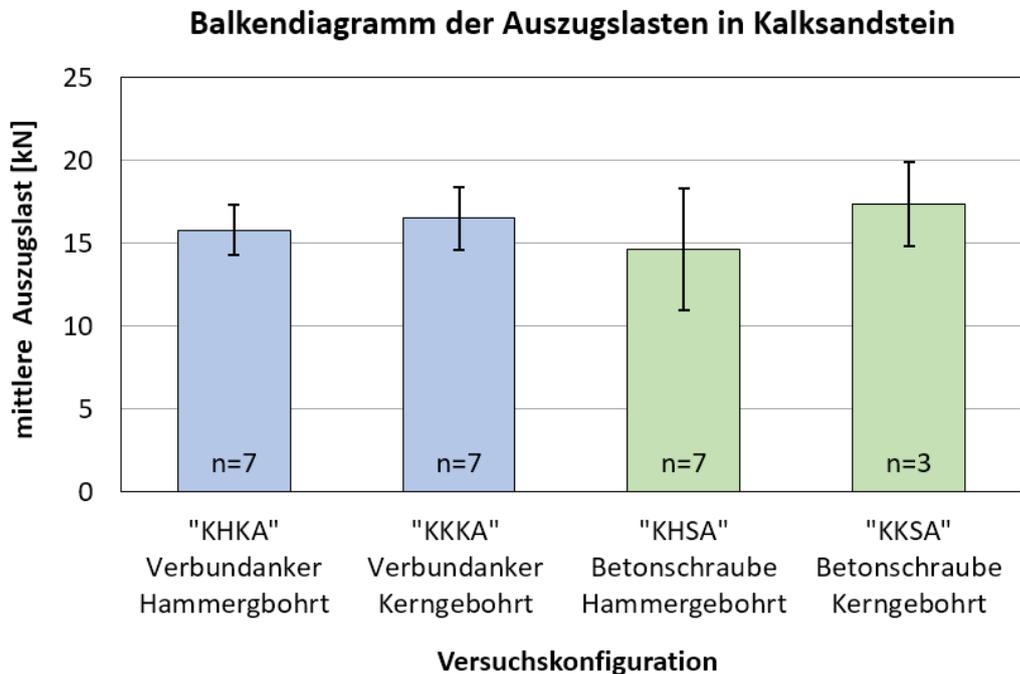


Abbildung 4.3: Balkendiagramm der Auszugslasten in den Kalksandstein

In Abbildung 4.3 ist ein Balkendiagramm mit den mittleren Bruchkräften der vier Serien zu sehen. Die Balken der Serien mit Verbundankern sind links dargestellt und sind blau hinterlegt. Die Balken der Serien mit Betonschrauben sind rechts dargestellt und sind grün hinterlegt. Als Fehlerindikator wird zu jedem Balken (Serie) die Standardabweichung dargestellt. Zusätzlich ist in jedem Balken die Anzahl der gewerteten Versuche angeführt.

Bei den kerengebohrten Serien (KKKA, KKSA) liegen die Mittelwerte im Vergleich etwas höher als bei den hammergebohrten Serien (KHKA, KHSA). Betrachtet man allerdings die Standardabweichungen und das gesamte Spektrum der einzelnen Bruchlasten, relativiert sich dieser Unterschied jedoch.

Ein deutlicher Unterschied bezüglich der Bruchlasten ist auch beim Vergleich der beiden Befestigungssysteme nicht auszumachen.

Bei den hammergebohrten Serien, liegt die mittlere Bruchlast der Verbundanker geringfügig höher, bei den kerengebohrten Serien ist wiederum die mittlere Bruchlast der Betonschrauben etwas größer.

In Abbildung 4.4 ist ein mit dem Auswertungsprogramm erstelltes Kraft-Verschiebungs-Diagramm dargestellt. Es zeigt exemplarisch ausgewählte Versuche aus allen vier Serien. Dazu wurden die Versuche KHKA 7, KKKA 7, KHSA 1 und KKSA 2 ausgewählt. Es wurde darauf geachtet, Versuche mit möglichst unterschiedlichen Versagensformen darzustellen.

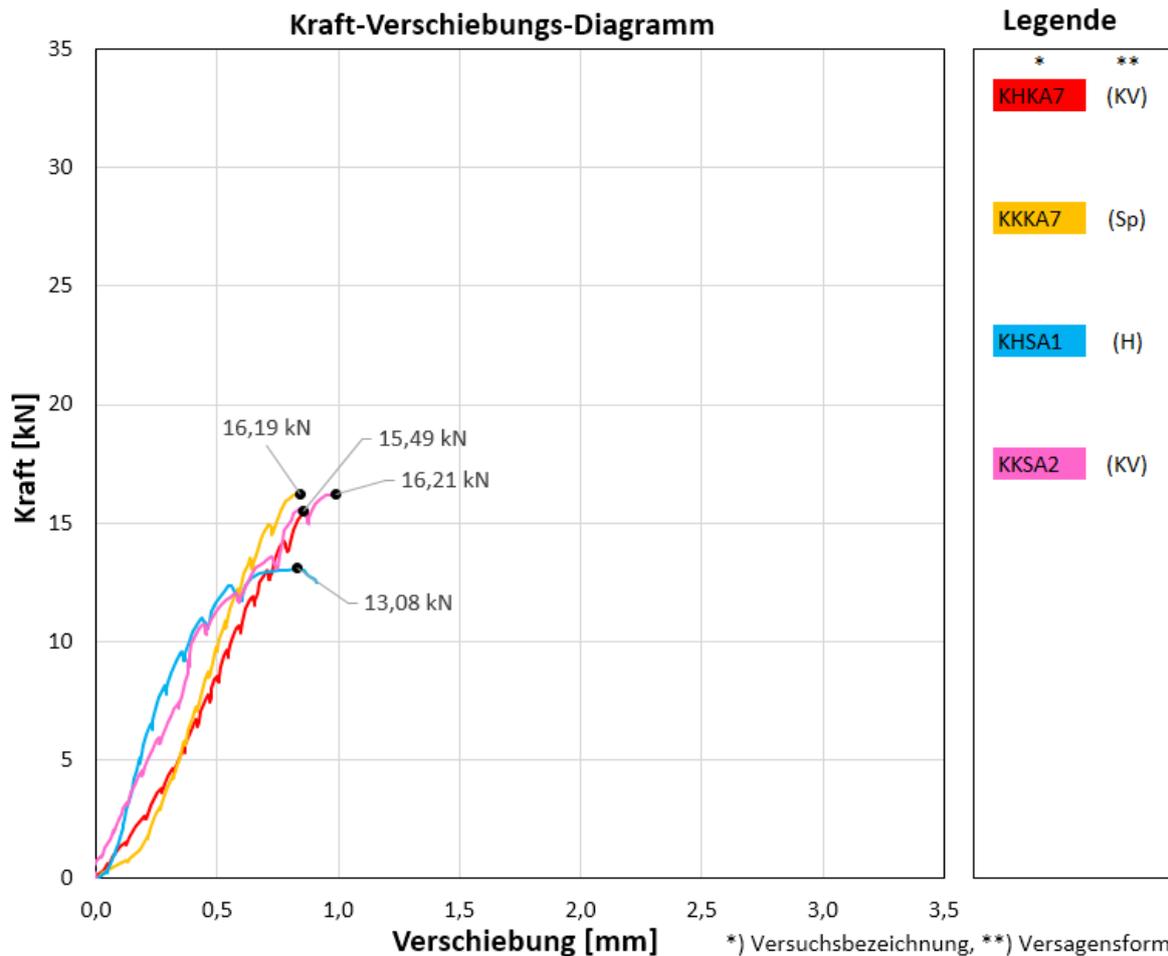


Abbildung 4.4: Vier Exemplarische Kraft-Verschiebungs-Kurven der Versuche in Kalksandstein, mit verschiedenen Versagensformen

Die Zacken die in allen Kraft-Verschiebungs-Kurven dieser Arbeit zu finden sind, lassen sich durch die Pumpvorgänge der Handpumpe erklären, mit der das Hydrauliksystem betrieben wurde, wie bereits in Abschnitt 3.8 genauer erläutert.

Nachfolgend werden die einzelnen Kurven näher beschrieben. Die Kraft-Verschiebungslinie des Versuchs KHKA 7 (rot) zeigt einen annähernd konstanten, linearen Verlauf bis zum Versagensereignis. Der Versuch wurde mit einem Verbundanker in einem hammergebohrten Loch durchgeführt. Das Versagen trat dabei durch kombiniertes Versagen bei 15,49 kN ein.

Der Versuch KKKA 7 (orange) wurde mit einem Verbundanker, einem kerngebohrten Loch durchgeführt. Dieser Verbundanker versagte durch Spalten bei 16,19 kN. Der Verlauf der Kraft-Verschiebungslinie steigt nach einem kurzen flachen Stück steil an und verläuft dann ähnlich wie die des Versuches KHKA 7 linear bis zu Bruch.

Der Versuch KHSA 1 (blau) wurde in einem hammergebohrten Loch mit einer Betonschraube durchgeführt. Diese Betonschraube versagte durch Herausziehen bei 13,08 kN. Der Verlauf der Kraft-Verschiebungslinie ist bis circa 10 kN nahezu linear, dann

nimmt die Verschiebung deutlich schneller zu und der Verlauf wird flacher. Ein flacher Verlauf deutet darauf hin, dass die Verschiebung rasch zunimmt, die Kraft hingegen nur langsam anwächst, dies ist typisch für die Versagensart Herausziehen.

Der Versuch KKSA 2 (magenta) wurde mit einer Betonschraube in einem kerngebohrten Loch ausgeführt. Die Betonschraube versagte dabei durch kombiniertes Versagen mit einer Bruchkraft von 16,21 kN. Die Kraft-Verschiebungs-Linie weist zu Beginn einen nahezu linearen Anstieg auf der kurz vor dem Erreichen der Bruchkraft geringfügig flacher wird.

Die hier näher beschriebenen Versuche stellen lediglich einen Auszug der durchgeführten Versuche dar. In Anhang B sind die Kraft-Verschiebungs-Kurven aller im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Messungen zu finden.

4.2.2 Ergebnisse der Auszugsversuche in Quarzsandstein

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Auszugsversuche in Quarzsandstein dargestellt und erläutert. Tabelle 4.3 zeigt die einzelnen Bruchlasten und Versagensformen der Versuchs-Serien RHKA, RKKA, RHSA, RKSA. In diesen Serien konnten alle Versuche ordnungsgemäß durchgeführt werden. Es war nicht notwendig einzelne Versuchsergebnisse auszuscheiden.

Die Auszugslasten dieser Serien liegen in einem Bereich zwischen 12 kN und 25 kN. Es gibt ähnlich wie bei den Versuchen in Kalksandstein große Schwankungen der Auszugslasten innerhalb der Serien. In Tabelle 4.3 ist zu sehen, dass bei den meisten Versuchen dieser Gruppe die selbe Versagensform eingetreten ist. Bis auf wenige Ausnahmen trat bei den meisten Versuchen in Quarzsandstein die Versagensform Spalten auf. In den Abbildungen 5.5 und 5.6 ist Probekörper RKKKA4 nach dem Versagen des Dübels durch Spalten abgebildet.

Tabelle 4.3: Gemessene Auszugslasten für Quarzsandstein

RHKA			RKKA			RHSA			RKSA		
Auszugslast	Versagen										
[kN]	-		[kN]	-		[kN]	-		[kN]	-	
1	18,79	H	1	24,15	S	1	15,81	Sp	1	24,24	Sp
2	17,83	Sp	2	23,96	Sp	2	16,20	Sp	2	16,69	Sp
3	19,46	Sp	3	16,14	Sp	3	15,96	Sp	3	22,62	Sp
4	21,11	Sp	4	20,13	Sp	4	12,07	Sp	4	13,72	Sp
5	18,78	Sp	5	22,73	Sp	5	17,49	Sp	5	12,34	Sp
6	20,25	Sp	6	15,36	Sp	6	17,54	Sp	6	15,93	Sp
7	20,10	KV	7	15,08	H	7	20,27	Sp	7	13,57	Sp

In Tabelle 4.4 werden die statistisch ausgewerteten Daten der Auszugslasten nach Serien angeführt. Dargestellt sind der Minimalwert, der Maximalwert, der Mittelwert,

die Standardabweichung und das 5 %-Quantil der Auszugslasten sowie die Anzahl der gewerteten Versuche je Serie.

Tabelle 4.4: Statistische Auswertung der Auszugslasten für Quarzsandstein

Serie	Anzahl	Minimalwert	Maximalwert	Mittelwert	STABW	STABW	5% - Quantil
	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[kN]
RHKA	7	17,83	21,11	19,47	1,10	5,67	16,86
RKKA	7	15,08	24,15	19,65	4,09	20,79	9,99
RHSA	7	12,07	20,27	16,48	2,48	15,03	10,62
RKSA	7	12,34	24,24	17,02	4,65	27,30	6,03

Nachfolgend werden die Ergebnisse der einzelnen Serien näher beschrieben, wobei zuerst auf die Verbundanker und anschließend auf die Betonschrauben eingegangen wird.

Die mittlere Auszugslast der Verbundanker ist unabhängig der Bohrmethode nahezu gleich groß. Auffallend ist jedoch, die deutlich größere Streuung der Auszugslasten, bei den kernebohrten Verbundankern. Der Mittelwert der hammergebohrten Serie (RHKA) beträgt 19,47 kN, die zugehörige Standardabweichung liegt bei 5,67 %. Die Verbundanker versagten dabei fünfmal durch Spalten, einmal durch Herausziehen und einmal durch kombiniertes Versagen.

Die kernebohrten Verbundanker (RKKA) erreichten eine mittlere Auszugslast von 19,65 kN, bei einer Standardabweichung von 20,79 %. Das häufigste Versagen war Spalten, das hier ebenfalls fünf Mal vorkam. Zusätzlich trat einmal Stahlversagen und einmal das Versagen Herausziehen auf.

Die mittleren Auszugslasten der beiden Schraubanker-Serien sind ebenfalls sehr ähnlich. Wie bei den Verbundankern streuen die Bruchlasten der kernebohrten Serie (RKSA) deutlich mehr. Die mittlere Auszugslast der hammergebohrten Schraubanker (RHSA) erreicht 16,48 kN, mit einer Standardabweichung von 15,03 %. Als Versagensform trat in dieser Serie ausschließlich Spalten auf.

Der Mittelwert der Auszugslast, der kernebohrten Schraubanker (RKSA) beträgt 17,02 kN und damit nur geringfügig mehr als bei der Serie RHSA. Die Standardabweichung liegt jedoch deutlich höher mit 27,30 %. Alle sieben Verbundanker dieser Serie versagten durch Spalten.

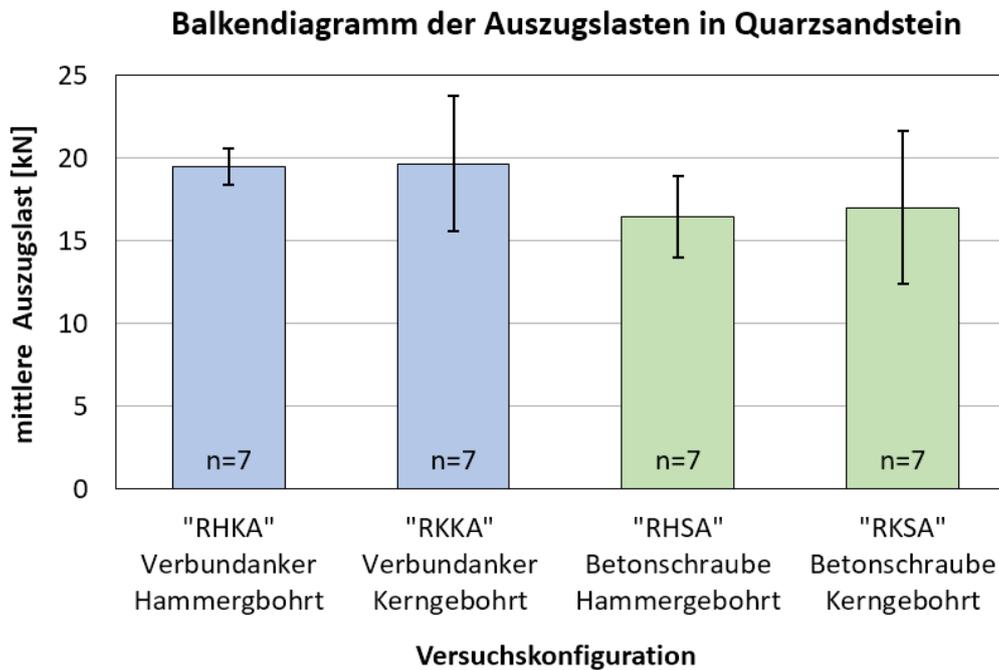


Abbildung 4.5: Balkendiagramm der Auszugslasten in Quarzsandstein

Abbildung 4.5 zeigt ein Balkendiagramm mit den mittleren Auszugslasten, der Versuche in Quarzsandstein. Als Fehlerindikator ist zusätzlich die Standardabweichung eingezeichnet. Die Serien mit Verbundankern (RHKA, RKKA) sind auf der linken Seite des Diagramms, als blaue Balken dargestellt. Auf der rechten Seite sind die Mittelwerte der Betonschraubenserien (RHSA, RKSA) als grüne Balken abgebildet.

Vergleicht man nun die beiden Serien der Verbundanker, mit den beiden Serien der Betonschrauben, fällt auf, dass die mittleren Bruchlasten der Verbundanker-Serien etwas höher liegen. Die Maximalwerte der kerngebohrten Verbundanker und der kerngebohrten Betonschrauben unterscheiden sich jedoch nicht so deutlich. Das selbe gilt für die Maximalwerte der hammergebohrten Verbundanker und der hammergebohrten Betonschrauben. Beide Betonschrauben-Serien weisen jedoch im Verhältnis deutlich niedrigere Minimalwerte auf, als dies bei den Verbundankerserien der Fall ist.

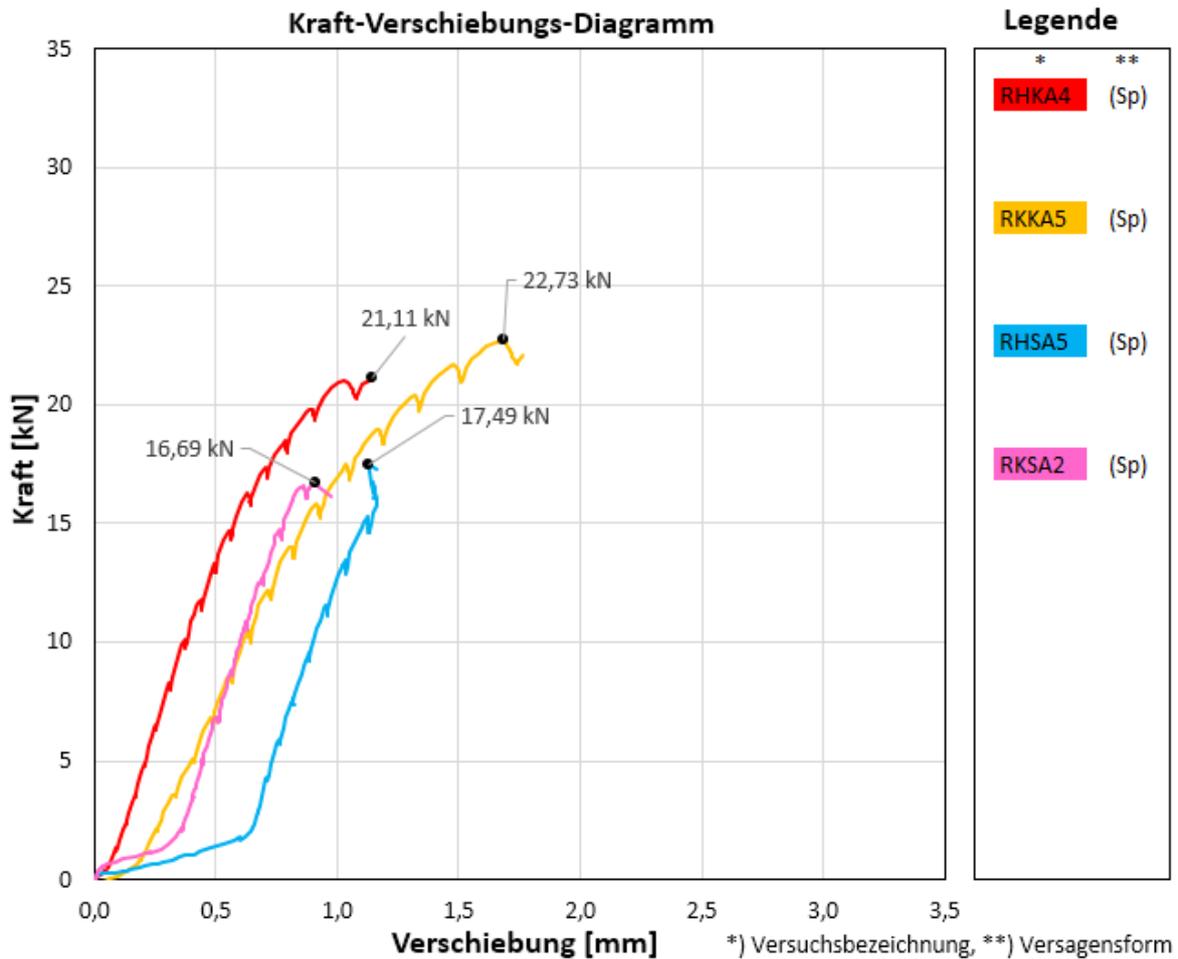


Abbildung 4.6: Exemplarische Kraft-Verschiebungs-Kurven der Versuche in Quarzsandstein

In Abbildung 4.6 ist eine exemplarische Kraft-Verschiebungs-Kurve aus jeder der vier Serien dargestellt. Es wurden vier Versuche mit dem Versagensmodus Spalten ausgewählt, da dies die am häufigsten eingetretene Versagensform in dieser Gruppe ist. Dazu wurden die Versuche RHKA 4, RKKA 5, RHSA 5 und RKSA 2 ausgewählt.

Der Versuch RHKA 4 (rot) weist von Beginn an, einen sehr konstanten, linearen Verlauf auf, der gegen Ende etwas flacher wird. Das Versagen trat bei 21,11kN durch Spalten ein. Es handelt sich dabei im einen Versuch, mit einem Verbundanker in einem hammergebohrten Bohrloch.

Der Versuch RKKA 5 (orange) wurde mit einem Verbundanker in einem kerngebohrten Loch ausgeführt. Die Kraft-Verschiebungs-Kurve weist zu Beginn einen linearen Anstieg auf, der ab 16 kN etwas abflacht. Der Verbundanker versagte durch Spalten bei 22,73 kN.

Der Verlauf des Versuchs RHSA 5 (blau) ist zu Beginn im Vergleich sehr flach und steigt, dann steil an. Sowohl vor als auch nach dem Knick verläuft die Linie sehr geradlinig. Kurz vor dem Versagen weist der Verlauf eine negative Verschiebung, die

vermutlich aufgrund einer Fehlstellung der Messvorrichtung entstanden ist. Der Versuch RHSA 5 wurde mit einer Betonschraube in einem hammergebohrten Bohrloch durchgeführt. Die Betonschraube versagte bei 17,49 kN durch Spalten.

Der Versuch RKSA 2 (magenta) wurde in einem kerngebohrten Bohrloch mit einer Betonschraube durchgeführt. Das Versagen trat bei 16,69 kN durch Spalten ein. Die Kraft-Verschiebungs-Kurve weist zu Beginn einen ähnlichen Verlauf auf, wie der Verlauf des Versuchs RHSA 5. Der Knick tritt hier jedoch bei geringerer Verschiebung auf.

Die ausgewählten Versuche stellen nur einen Auszug aus den durchgeführten Versuchen dar. Versuche gleicher Versuchskonfiguration weisen bei gleicher Versagensform jedoch häufig ähnliche Verläufe auf. Die Kraft-Verschiebungs-Kurven aller im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Messungen sind in Anhang B zu finden.

4.2.3 Ergebnisse der Auszugsversuche in Beton

In folgendem Abschnitt sind die Ergebnisse der Auszugsversuche an den Betonprobekörpern dargestellt und beschrieben. In Tabelle 4.5 sind die Bruchlasten mit dem jeweiligen Versagensmodus angeführt. Bei den Serien BKKA, BHSA und BKSA mussten drei Versuche für die weitere Auswertung ausgeschieden werden. Es handelt sich um die Versuche BKKA 2, BHSA 6 und BKSA 2. Die Werte dieser drei Versuche, sind in der Tabelle 4.5 durchgestrichen dargestellt. Der Versuch BKKA 2 versagte bei 7,59 kN durch Herausziehen, weil die Ankerstange nicht ausreichend mit dem Ankergrund verklebt war. Es lag somit ein Fehler beim Setzvorgang vor, der ein Streichen dieses Versuchsergebnisses rechtfertigt. Bei den Versuchen BHSA 6 und BKSA 2 traten Probleme während des Versuchsablaufs auf. Die Verbindungsmittelaufnahme wurde bei beiden Versuchen, während des Belastungsvorgangs durch das Trägerprofil der Auszugsgerätes blockiert. Die gemessene Bruchlast wurde dadurch verfälscht und die Werte beider Versuche müssten ausgeschieden werden. Dieses Problem tritt auf, wenn das Auszugsgerät zu knapp über dem Probekörper positioniert ist und nicht ausreichend freier Weg zwischen der Aufnahme und dem Trägerprofil vorhanden ist.

Die gewerteten Auszugslasten der Auszugsversuche an den Betonprobekörpern bewegen sich bei allen vier Serien in einem ähnlichen Bereich. Dabei liegen die Werte zwischen 13,96 kN und 24,92 kN. Die mittleren Auszugslasten der Versuchskonfigurationen liegen bei Beton näher beieinander als, das bei den anderen beiden Probekörpermaterialien der Fall ist. Innerhalb der einzelnen Serien schwanken die Auszugslasten jedoch deutlich.

Tabelle 4.5: Gemessene Auszugslasten für Beton (durchgestrichene Werte wurden von der weiteren Auswertung ausgeschlossen)

BHKA			BKKA			BHSA			BKSA		
Auszugslast	Versagen		Auszugslast	Versagen		Auszugslast	Versagen		Auszugslast	Versagen	
[kN]	-		[kN]	-		[kN]	-		[kN]	-	
1	15,21	KV	1	19,70	Sp	1	20,32	Sp	1	16,15	Sp
2	21,94	KV	2	7,59	H	2	23,29	KV	2	32,99	Sp
3	17,18	KV	3	21,66	Sp	3	23,41	Sp	3	22,51	Sp
4	20,11	KV	4	24,01	Sp	4	13,96	Sp	4	18,93	Sp
5	17,66	Sp	5	16,71	H	5	16,76	Sp	5	23,57	Sp
6	21,94	KV	6	17,57	KV	6	28,00	Sp	6	18,24	Sp
7	17,94	H	7	24,92	S	7	21,81	Sp	7	20,90	Sp

Die statistisch ausgewerteten Auszugslasten werden in Tabelle 4.6 aufgelistet. Zu jeder Serie wird die Anzahl der gewerteten Versuche, der Minimalwert, der Maximalwert, Mittelwert, die Standardabweichung und das 5% - Quantil angegeben.

Tabelle 4.6: Statistische Auswertung der Auszugslasten für Beton

Serie	Anzahl	Minimalwert	Maximalwert	Mittelwert	STABW	STABW	5% - Quantil
	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[kN]
BHKA	7	15,21	21,94	18,85	2,55	13,52	12,82
BKKA	6	16,71	24,92	20,76	3,36	16,18	12,54
BHSA	6	13,96	23,41	19,92	3,81	19,14	10,59
BKSA	6	16,15	23,57	20,05	2,79	13,92	13,22

Auf Basis der Ergebnisse wird nun das Bruchverhalten der Serien näher beschrieben. Bei den Versuchen mit Verbundankern liegen die Auszugslasten der kerngebohrten Serie im Mittel etwas höher, als die der hammergebohrten Serie.

Der Mittelwert der Auszugslasten bei den hammergebohrten Verbundankern (BHKA) beträgt 18,85 kN, mit einer Standardabweichung von 13,52 %. Als Versagen trat bei diesen Versuchen Spalten, Herausziehen und kombiniertes Versagen auf. Das kombinierte Versagen trat in dieser Serie besonders häufig auf. Dabei versagten die Dübel durch eine Kombination von Herausziehen und Betonausbruch.

Bei den kerngebohrten Verbundankern (BKKA) liegt der Mittelwert, der Bruchlast mit 20,76 kN etwas höher als bei der Serie BHKA. Die Standardabweichung beträgt hier 16,18 %. Auffällig ist, dass die Versagensformen in dieser Serie besonders stark variieren.

Die Versuche mit Betonschrauben ergaben unabhängig von der Bohrmethode sehr ähnliche Ergebnisse. Bei den hammergebohrten Versuchen liegt der Mittelwert der Bruchlasten bei 19,92 kN mit einer Standardabweichung von 19,14 %. Hier kam es fünf Mal zum Versagen Spalten und einmal zu kombinierten Versagen.

Die kerngebohrten Betonschrauben erreichten eine mittlere Bruchlast von 20,05 kN, bei einer Standardabweichung von 13,92 %. Als Versagen trat in dieser Serie ausschließlich Spalten auf. Eine maßgebende Auswirkung der Bohrmethode, auf die Bruchlasten und die Versagensform ist bei diesen beiden Serien nicht zu erkennen.

In der Abbildung 4.7 werden die mittleren Auszugslasten der Serien als Balken in einem Diagramm dargestellt. Zusätzlich wird als Fehlerindikator die Standardabweichung jeder Serie angegeben. Die Mittelwerte der Serien BHKA und BKKA sind als blaue Balken dargestellt, die der Serien BHSA und BKSA als grüne Balken.

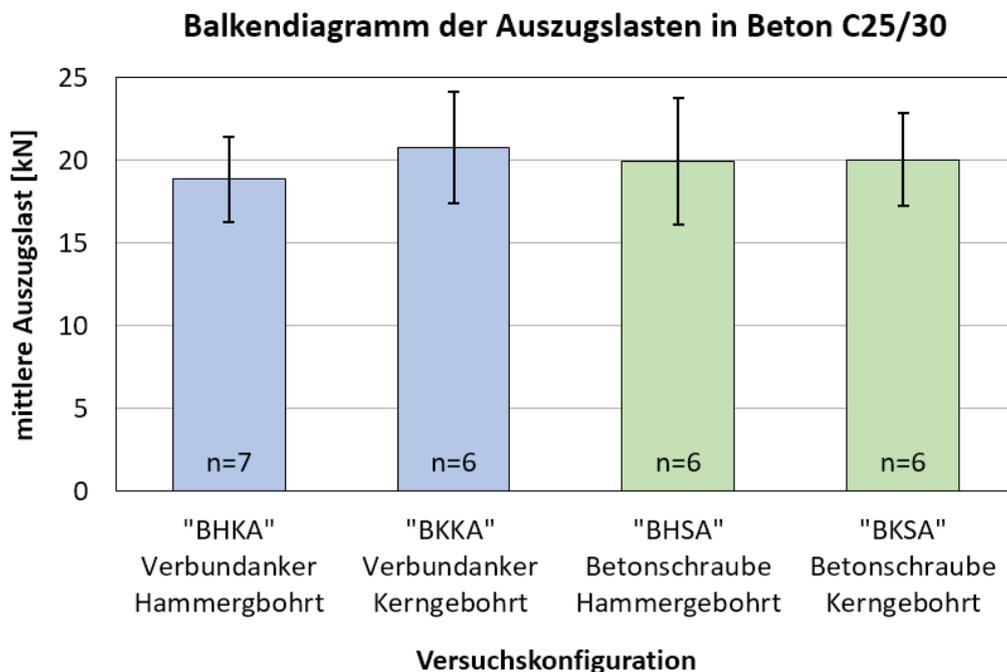


Abbildung 4.7: Balkendiagramm der mittleren Auszugskräfte in den Betonprobekörpern

Vergleicht man die Verbundankerserien (BHKA & BKKA) mit den Betonschraubenserien (BHSA & BKSA), fällt auf, dass bei beiden Verbundankerserien die Versagensformen stärker variieren. Im Gegensatz dazu tritt bei den Betonschraubenserien fast ausschließlich Spalten auf. Beim Vergleich der Bruchkräfte von Betonschrauben und Verbundankern ist kein maßgebender Unterschied zu erkennen. Bei den hammergebohrten Serien fiel die mittlere Auszugslast der Verbundanker etwas niedriger aus, als die der Betonschrauben. Unter Berücksichtigung der Streuung der Auszugslasten relativiert sich dieser zahlenmäßiger Unterschied jedoch. Die beiden kerngebohrten Serien weisen unabhängig vom Verbindungsmittel sehr ähnliche Auszugslasten auf.

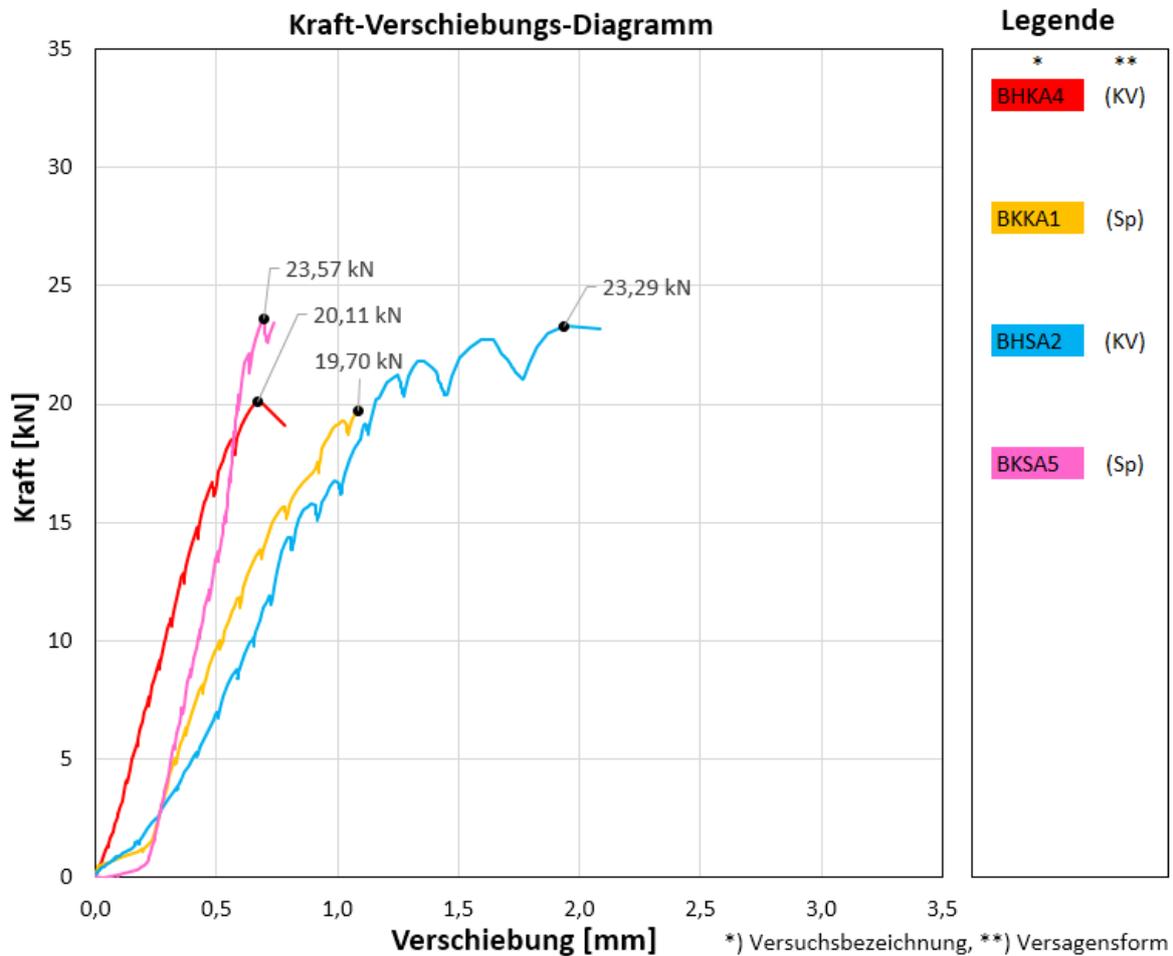


Abbildung 4.8: Exemplarische Kraft-Verschiebungs-Kurven der Versuche in Beton

In Abbildung 4.8 sind vier exemplarisch ausgewählte Kraft-Verschiebungs-Kurven dargestellt. Dazu wurde aus jeder der vier Serien ein Versuch ausgewählt. Abgebildet sind die Verläufe der Versuche BHKKA 4, BKKA 1, BHSA 2 und BKSA 5.

Der Verlauf des Versuchs BHKKA 4 (rot), ist von Beginn an nahezu geradlinig und flacht vor dem Bruch nur geringfügig ab. Das Versagen trat bei 20,11 kN durch kombiniertes Versagen ein. Dieser Versuch wurde hammergebohrt mit einem Verbundanker durchgeführt.

Der Versuch BKKA 1 (orange) weist ebenfalls linearen Verlauf auf, am Beginn ist jedoch eine größere Verschiebung zu erkennen. Die Kraft-Verschiebungs-Kurve steigt nach dem flacheren Anfangsstück jedoch stark an und ist bis zum Bruch durchwegs konstant. Das Versagen trat bei 19,20 kN durch Spalten ein. Dieser Versuch wurde in einem kerngebohrten Bohrloch, mit einem Verbundanker durchgeführt.

Die Kraft-Verschiebungs-Kurve des Versuchs BHSA 2 (blau) verläuft zu Beginn etwas flacher, steigt dann jedoch stark an. Nach der Steigungsänderung ist der Verlauf bis 20 kN nahezu linear. Vor dem Erreichen der Bruchlast flacht der Verlauf jedoch wieder ab und bildet ein Plateau. Bei 23,29 kN versagte die Betonschraube durch kombiniertes

Versagen. Der Versuch wurde mit einer Betonschraube in einem hammergebohrten Loch durchgeführt.

Der Versuch BKSA 5 (magenta) weist einen im Vergleich sehr steilen Verlauf auf. Zu Beginn ist ein flaches Plateau vorhanden, das jedoch rasch in einen steilen und geradlinigen Anstieg übergeht, der bis zum Bruchereignis anhält. Das Versagen trat bei 23,57 kN durch Spalten ein. Dieser Versuch wurde mit einer Betonschraube in einem kernebohrten Bohrloch durchgeführt.

Die abgebildeten Verläufe stellen nur einen Auszug aller durchgeführten Versuche dar. Die Kraft-Verschiebungs-Linien innerhalb einer Serie weisen jedoch häufig ähnlich verlaufende Kurven auf. In Anhang B sind die Kraft-Verschiebungs-Kurven aller Messungen, die im Zuge dieser Arbeit durchgeführt wurden, zu finden.

Kapitel 5

Interpretation der Ergebnisse

Im nachfolgenden Kapitel wird versucht die Ergebnisse der Versuche zu interpretieren. Da die Versuche an drei verschiedenen Probekörpermaterialien durchgeführt wurden, sind die Ergebnisse jeweils durch das Grundmaterial beeinflusst. Die Probekörper die aus Kalksandsteinstufen, Quarzsandsteinstufen und Beton hergestellt wurden, unterscheiden sich deutlich in ihren Festigkeitseigenschaften. Um die unterschiedlichen Eigenschaften der drei Materialien darstellen zu können, wurden am Institut für Hochbau und Technologie weiterführende Materialuntersuchungen durchgeführt. Im Zuge dieser Arbeit wurden diese Versuche ausgewertet, um die Versuchsergebnisse in Zusammenhang mit den Materialeigenschaften beurteilen zu können. Je nach Material lassen sich unterschiedliche Bruchverhalten erkennen, auf welche in der Interpretation näher eingegangen wird.

Außerdem wird versucht, eine Interpretation der Ergebnisse bezüglich der untersuchten Dübelsysteme vorzunehmen. Aus den Ergebnissen lassen sich bei einigen Serien Unterschiede zwischen den Verbundankern und den Betonschrauben ablesen. Die Unterschiede sind jedoch in den unterschiedlichen Probekörpermaterialien unterschiedlich stark ausgeprägt. Bei manchen Serien hatte auch die Bohrmethode, einen erkennbaren Einfluss auf das Ergebnis der Auszugsversuche.

In der Leitlinie ETAG 001-C (2010) sind die Bemessungsverfahren für Verankerungen geregelt. Mit diesen Verfahren kann die zulässige Belastung für Dübel in Betonbauteilen berechnet werden. Dabei wird jedoch immer vorausgesetzt, dass die geforderten Randabstände der jeweiligen Dübel einhalten werden. Bei den vorliegenden Versuchen konnten jedoch die geforderten Randabstände aufgrund der Geometrie der Natursteinstufen nicht eingehalten werden.

5.1 Festigkeitseigenschaften der Probekörper

Im Labor des Instituts für Hochbau und Technologie wurden Untersuchungen der Würfeldruckfestigkeit sowie des Elastizitätsmoduls durchgeführt. Diese Versuche wurden im Zuge dieser Arbeit ausgewertet und dargestellt. Nachfolgend werden die Ergebnisse der Materialuntersuchungen angeführt.

In Tabelle 5.1 werden die statistisch ausgewerteten Daten der der Würfeldruckversuche aufgelistet. Die Versuche wurden an Würfeln mit mit einer Kantenlänge von 70 mm durchgeführt.

Tabelle 5.1: Statistische Auswertung der Würfeldruckversuche

Material	Anzahl	Minimalwert	Maximalwert	Mittelwert	STABW	STABW
	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]
Kalksandstein	11	22,08	31,55	25,33	2,89	11,40
Quarzsandstein	72	52,78	103,89	77,22	14,71	19,04
Beton C25/30	12	29,92	48,58	39,23	6,58	16,78

In Abbildung 5.1 ist ein Balkendiagramm mit den mittleren Würfeldruckfestigkeiten der Probewürfel dargestellt. Die Balken zeigen die mittlere Würfeldruckfestigkeit der drei untersuchen Materialien in N/mm². Als Fehlerindikator ist zusätzlich die Standardabweichung angeführt.

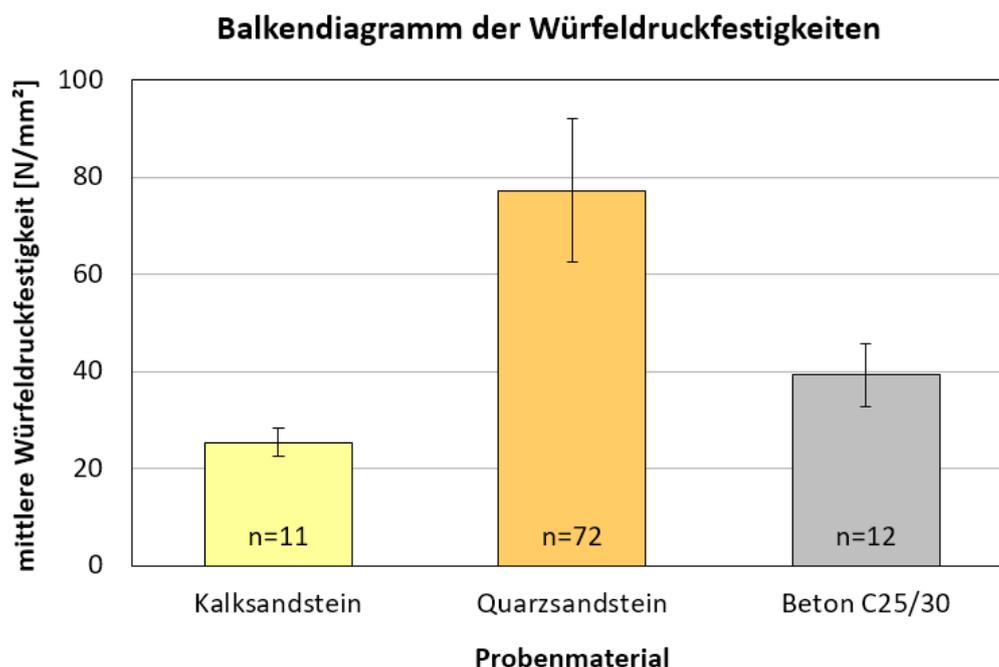


Abbildung 5.1: Balkendiagramm der Würfeldruckfestigkeiten

Es ist sofort festzustellen das Würfeldruckfestigkeiten der drei Materialien deutliche Unterscheide aufweisen. Die Proben der Quarzsandsteinstufen erzielen mit $77,22 \text{ N/mm}^2$ die höchste mittlere Würfeldruckfestigkeit. Der Kalksandstein liegt mit $25,33 \text{ N/mm}^2$ mittlerer Würfeldruckfestigkeit deutlich unter den Werten die in der Literatur zu finden sind. Die Ergebnisse der Betondruckfestigkeiten entsprechen mit $39,23 \text{ N/mm}^2$ den Erwartungen. In KOLBITSCH (1989) sind einige Festigkeitskennwerte zu Materialien aus der Gründerzeit zu finden. Für Kalkstein (Kalksandstein) wird dort eine Druckfestigkeit von 110 N/mm^2 angegeben. Die mittlere Würfeldruckfestigkeit der untersuchten Kalksandsteinstufen liegt deutlich unter diesen Werten, was den Schluss zulässt, das es sich hier um einen Kalksandstein geringerer Qualität handelt. KOLBITSCH (1989) gibt für Sandstein (Quarzsandstein) eine durchschnittliche Druckfestigkeit von 80 N/mm^2 an. Die mittlere Würfeldruckfestigkeit der untersuchten Quarzsandsteinstufen entspricht ziemlich genau diesen Angaben.

Tabelle 5.2 zeigt eine statistische Auswertung der E-Modul Untersuchungen. Der E-Modul wurde anhand von Druckversuchen, aus Spannung und Dehnung ermittelt. Die Versuche wurden an Proben mit den Abmessungen $55 \text{ mm} / 55 \text{ mm} / 150 \text{ mm}$ im Labor des Instituts durchgeführt.

Tabelle 5.2: Statistische Auswertung der E-Modul Untersuchungen

Material	Anzahl	Minimalwert	Maximalwert	Mittelwert	STABW	STABW
	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]
Kalksandstein	7	19705	25361	22818	1987	8,71
Quarzsandstein	4	45858	100868	74931	24146	32,23
Beton C25/30	6	28881	33237	30607	1493	4,88

In Abbildung 5.2 ist ein Balkendiagramm mit dem mittleren Elastizitätsmodul der drei untersuchten Materialien dargestellt. Als Fehlerindikator ist zusätzlich die Standardabweichung angeführt.

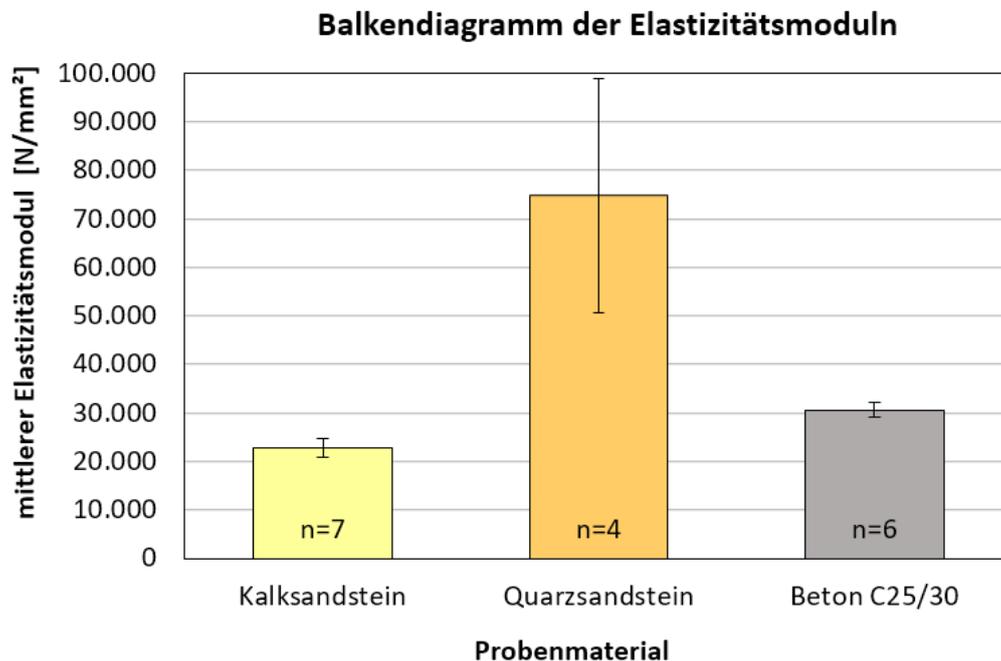


Abbildung 5.2: Balkendiagramm der Elastizitätsmodul-Untersuchungen

Wie schon bei den Ergebnissen der Würfeldruckfestigkeit weist der Quarzsandstein auch beim Elastizitätsmodul deutlich höhere Werte auf, als die anderen beiden Materialien. Die Proben der Kalksandsteinstufen wiesen den kleinsten Elastizitätsmodul mit 22.818 N/mm^2 auf. Bei KOLBITSCH (1989) wird als Wert für den Elastizitätsmodul von Kalkstein (Kalksandstein) 33.000 N/mm^2 bis 56.000 N/mm^2 angeführt. Für Sandstein (Quarzsandstein) führt KOLBITSCH (1989) einen Elastizitätsmodul von 33.000 N/mm^2 bis 58.000 N/mm^2 an. Die Untersuchungen Quarzsandstein-Probekörper ergeben einen mittleren Elastizitätsmodul von 74.931 N/mm^2 . Dies ist ein deutlich höherer Wert als der von bei KOLBITSCH 1989 angeführte. Der Stein aus dem die Quarzsandsteinstufen hergestellt wurden, weist somit ein vergleichsweise steifes Verhalten auf. Die Werte des Elastizitätsmoduls der Betonproben entsprechen mit 30.607 N/mm^2 in etwa den Erwartungen für Beton C25/30.

5.2 Interpretation der Auszugsversuche

In diesem Unterkapitel wird versucht die Ergebnisse der Auszugsversuche zu interpretieren. Vorweg ist nochmals festzuhalten das die Probekörperabmessungen bewusst den Querschnittsabmessungen einer gründerzeitlichen Natursteinstufe entsprechen. Die geforderten Randabstände des Dübelherstellers können somit nur bedingt, oder gar nicht eingehalten werden. Dieser Umstand führte bei vielen der Versuche zum Versagen durch Spalten. Die Versagensform Spalten tritt immer dann ein, wenn der nötige Randabstand zur Ausbildung eines Ausbruchskegels nicht vorhanden ist.

Die effektiven Randabstände sind bei den Natursteinprobekörpern von Probe zu Probe etwas unterschiedlich, da die Probekörper unterschiedliche Abmessungen haben. Im Durchschnitt liegt der minimale Randabstand bei den Natursteinprobekörpern jedoch zwischen 5,0 cm und 6,0 cm. Bei den Betonprobekörpern beträgt der minimale Randabstand zwischen 5,7 cm und 6,0 cm. Die Dübel wurden bei allen Versuchen im Flächenmittelpunkt der Probekörper gesetzt.

5.2.1 Interpretation der Auszugsversuche in Kalksandstein

Die Ergebnisse der Dübelauszugsversuche in Kalksandstein sind unter 4.2.1 angeführt. Nachfolgend werden die Ergebnisse der Versuche interpretiert. Gemäß der statistischen Ergebnisse erzielen die kerngebohrten Dübel im Kalksandstein etwas höhere Bruchlasten als die hammergebohrten Dübel. Ein deutlicher Unterschied zwischen Verbundankern und Betonschrauben ist daher aus den Auszugslasten nicht ablesbar (siehe Abbildung 4.3). Die Auszugslasten aller vier Serien liegen unter Berücksichtigung der Streuung der Einzelwerte sehr eng beieinander.

Die Versagensformen lassen hingegen mehr Interpretation zu. Grundsätzlich ist festzustellen, dass das Versagen stark vom Gesteinsgefüge des jeweiligen Probekörpers abhängt. Die Versagensformen Ausbruch und Spalten treten immer dann ein, wenn die Zugfestigkeit des Ankergrundes überschritten wurde. Bei zu geringen Randabständen tritt jedoch fast immer Spalten auf. In Abbildung 5.4 ist der Probekörper des Versuchs KKKA 1 abgebildet, der durch Spalten versagte.

Bei dem sogenannten kombinierten Versagen, bildet sich ein oberflächlicher Materialausbruch, wie er in Abbildung 5.3 bei dem Versuch KHKA 7 zu sehen ist. Das Versagen tritt hier jedoch durch eine Kombination aus Herausziehen und Materialversagen ein.



Abbildung 5.3: Kombiniertes Versagen



Abbildung 5.4: Spaltversagen

In der Serie KHKA traten drei verschiedene Versagensformen auf, Spalten Herausziehen und kombiniertes Versagen. Sowohl das kombinierte Versagen als auch Herausziehen treten dann auf, wenn der Verbund zwischen Dübel und Ankergrund versagt. Bei dieser Serie traten diese beiden Versagen im Vergleich sehr häufig auf. Auffallend

ist auch, dass bei der zugehörigen kerngebohrten Serie KKKA, kein Versuch diese beiden Versagensformen aufweist. Eine Vermutung ist, dass das Hammerbohren das Materialgefüge rund um das Bohrloch mehr schädigt als das Kernbohren. Dies könnte sich vor allem bei dem vorliegenden, weichen Kalksandstein (siehe Abbildung 5.1) ausgewirkt haben, und bei den betreffenden Versuchen das Herausziehen des Dübels hervorgerufen haben. Die Serie KKKA wurde hammergebohrt und weist die Versagensformen Herausziehen und kombiniertes Versagen nicht auf. In der Serie KKKA versagten alle Dübel durch Spalten. Daraus kann man schließen, dass ausreichend Verbundkräfte zwischen Dübel und Ankergrund vorhanden waren. Da jedoch nicht genügend Randabstand vorhanden war, versagten die Verbundanker letztendlich durch Spalten.

Bei den Betonschraubenserien fällt ebenfalls auf, dass bei den hammergebohrten Dübeln häufig ein Versagen durch Herausziehen des Dübels aufgetreten ist. Dies kann vermutlich ebenfalls mit der Schädigung des Materialgefüges durch das Hammerbohren in Zusammenhang gebracht werden. Bei der Serie KKSA muss jedoch einschränkend beachtet werden, dass nur drei der durchgeführten Versuche gewertet wurden.

5.2.2 Interpretation der Auszugsversuche in Quarzsandstein

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Auszugsversuche in Quarzsandstein interpretiert. Die Ergebnisse dazu sind unter 4.2.2 angeführt. Aus den Ergebnissen wird ersichtlich, dass die Verbundanker in Quarzsandstein im Mittel höhere Auszugslasten erzielen als die Betonschrauben. Die Bruchlasten beider Verbundanker-Serien liegen im Mittel etwas höher als die der zugehörigen Serien mit Betonschrauben (siehe Abbildung 4.5). Außerdem ist festzustellen, dass bei allen Serien, mit wenigen Ausnahmen, das Versagen durch Spalten des Probekörpers eingetreten ist. Das häufige Auftreten der Versagensform Spalten kann unter Umständen darauf zurückgeführt werden, dass der Quarzsandstein deutlich steifer ist, als die beiden anderen Probekörpermaterialien (siehe Abbildung 5.2). In den Abbildungen 5.5 und 5.6 sind eine Draufsicht und ein seitliche Ansicht des Probekörpers RKKKA 4 abgebildet. Diese zwei Abbildungen zeigen das typische Versagensbild (Spalten) der Versuche an den Quarzsandsteinprobekörpern.



Abbildung 5.5: RKKA 4, Draufsicht



Abbildung 5.6: RKKA 4, Ansicht

Die geringeren Bruchlasten der Betonschrauben lassen sich eventuell durch die höheren Spreizkräfte erklären, die beim Setzvorgang der Betonschrauben erzeugt werden. Beim Eindrehen schneidet die Betonschraube ein Gewinde in den umliegenden Ankergrund. Dadurch entstehen Spreizkräfte die vor allem bei einem sehr dichten und steifen Materialgefüge die Versagenslast reduzieren können. Bei einem Ankergrund mit weniger dichtem Materialgefüge, wie bei den Kalksandstein Probekörpern, entstehen durch das Eindrehen der Betonschrauben weniger Spreizkräfte.

5.2.3 Interpretation der Auszugsversuche in Beton

Die Ergebnisse der Auszugsversuch in Beton sind in Abschnitt 4.2.3 angeführt. Bezüglich der Bruchlasten unterscheiden sich die vier Serien wenig (siehe Abbildung 4.7). Sie weisen im Mittel nahe bei einander liegende mittlere Bruchlasten, bei sehr ähnlichen Standardabweichungen auf.

Bei der hammergebohrten Verbundankerserie BHKA tritt besonders häufig ein kombiniertes Versagen auf. Dabei versagt der Verbundanker durch Herausziehen mit einem oberflächlichen Betonausbruch. Der oberflächliche Betonausbruch erstreckt sich teilweise über den gesamten Probekörper, und gleicht dann eher einem oberflächlichen Spalten.

Ein Merkmal, dass sich auch bei diesen Versuchen zeigt, ist das häufige Auftreten der Versagensform Spalten bei Betonschrauben. Die Verbundankerserien BHKA und BKKA weisen hingegen auch andere Versagensformen auf. Dies lässt sich vermutlich durch die beim Eindrehen der Betonschrauben erzeugten Spreizkräfte erklären. Durch die zusätzlichen Spreizkräfte bauen sich Spannungen im Probekörper auf, die in Kombination mit den Zugspannungen zum Spalten des Probekörpers führen.

Die Abbildung 5.7 zeigt den Versuch BHKA 2, welcher durch kombiniertes Versagen versagte. In Abbildung 5.8 ist der Probekörper des Versuchs BKSA 7 mit einem klassischen Spaltversagen abgebildet.



Abbildung 5.7: Kombiniertes Versagen



Abbildung 5.8: Spaltversagen

5.2.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die mittleren Bruchlasten unabhängig vom Probekörpermaterial nicht stark variieren, die Versagensform jedoch deutlich schwankt. Besonders deutlich ist dies beim Vergleich der Auszugsversuche in Kalksandstein und Quarzsandstein zu sehen. Die mittlere Druckfestigkeit der Quarzsandstein-Probekörper ist drei Mal so groß wie die der Kalksandsteinprobekörper, die Bruchlasten der Auszugsversuche liegen im Kalksandstein jedoch nur geringfügig niedriger als im Quarzsandstein. Die besseren Materialeigenschaften des Quarzsandsteins (Druckfestigkeit, E-Modul) wirken sich also nicht besonders stark auf die Auszugslasten aus. Höhere Festigkeiten des Ankergrunds führen somit bei nicht eingehaltenen Randabständen nicht unbedingt im selben Maße zu höheren Auszugslasten.

Spalten wird vor allem durch die geringen Randabstände verursacht. Bei ausreichend großen Randabständen würde vermutlich anstatt des Spaltversagens ein Ausbruchskegel entstehen oder Stahlversagen eintreten.

Eine Auswirkung der Bohrmethode auf die Ergebnisse ist lediglich bei den Versuchen in Kalksandstein erkennbar. Die hammergebohrten Versuche weisen dort in beiden Serien häufig ein Versagen durch Herausziehen auf. Dies lässt sich eventuell durch eine Schädigung des Materialgefüges im Nahbereich des Bohrloches erklären. Bei den anderen beiden Materialien ist dieses Verhalten nicht zu erkennen.

Des weiteren ist zu erkennen, dass die Betonschrauben in einem steifen Ankergrund wie dem vorliegenden Quarzsandstein, kleinere Bruchlasten aufweisen als Verbundanker. Eine Erklärung dafür könnten die zusätzlich erzeugten Spreizkräfte sein, die beim Eindrehen der Betonschrauben in das Bohrloch entstehen.

Die Ergebnisse der Auszugsversuche in den Betonprobekörpern dienen als Vergleichswert für die natürlich gewachsenen Natursteinprobekörper. Der Vergleich zeigt, dass sich die Auszugslasten der vier unterschiedlichen Versuchskonfigurationen in Beton am geringsten voneinander unterscheiden.

Folgerungen und Ausblick

6.1 Folgerungen

Auf Grund der 84 durchgeführten Auszugsversuche in drei Grundmaterialien, lässt sich nicht feststellen, dass sich eines der beiden Dübelsysteme oder eine der beiden Bohrmethoden generell besser für Befestigungen an Natursteinstiegen eignet. Die Versuche zeigten, dass je nach Materialeigenschaften des Ankergrundes ein etwas anderes Versagensverhalten der Dübel zu erkennen ist. Die Problematik der auf Grund der Stufenform nicht eingehaltenen Randabstände führte bei vielen der Versuchen zu einem Versagen durch Spalten.

Im Zuge der Interpretation der Ergebnisse konnten einige Folgerungen in Bezug auf die Befestigungsmethoden gezogen werden. Bei einem sehr steifen und dichtem Stufenmaterial eignen sich laut den Ergebnissen dieser Arbeit, Verbundanker geringfügig besser als Betonschrauben, da durch das Eindrehen der Betonschrauben zusätzliche Spannungen im Stufenquerschnitt entstehen. Dies führte zu etwas geringeren mittleren Auszugslasten der Betonschrauben in Quarzsandstein. Die leichte Handhabung der Betonschrauben, die sofortige Belastbarkeit nach dem Setzvorgang und die Möglichkeit diese wieder aus dem Bauteil zu entfernen sind hier jedoch trotzdem positiv zu erwähnen.

Hammerbohren kann bei porösem Gesteinsgefüge zu einer Schädigung im Ankergrund rund um das Bohrloch führen. Bei den Versuchen die im Zuge dieser Arbeit durchgeführt wurden, führte dies in den Kalksandsteinprobekörpern sowohl bei Verbundankern als auch bei Betonschrauben zu einem gehäuften Auftreten der Versagensform Herausziehen. In porösem Natursteinankergrund könnte es also von Vorteil sein, einen Diamantbohrer einzusetzen. Derzeit gibt es jedoch weder für die untersuchten Betonschrauben noch für die untersuchten Verbundanker eine Zulassung für Diamantbohren.

Der Randabstand der Dübel hat einen sehr großen Einfluss auf die Versagensform. Ist dieser zu gering kann sich kein Ausbruchskegel ausbilden und der Dübel versagt durch Spalten. Da Spalten zu niedrigeren Bruchkräften führt als Materialausbruch sollte darauf geachtet werden, die Randabstände so gut es geht einzuhalten.

6.2 Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden Dübelauszugsversuche unter Normalkraftbelastung an zwei verschiedene Natursteintypen und Beton C25/30 durchgeführt. Befestigungen von Stieggeländern unterliegen jedoch meist einer kombinierten Belastung aus Normalkraft Querkraft und Moment. In weiterführenden Forschungsarbeiten von G.KIDERY wird deshalb die Belastungsfähigkeit von Geländerbefestigungen auf Querkraft und Moment behandelt.

Grundsätzlich wäre eine Erweiterung der Versuche auf eine größere Anzahl von Natursteinproben der Wiener Gründerzeit für weitere Untersuchungen zur Belastungsfähigkeit von Geländerbefestigungen wünschenswert. Der in dieser Arbeit verwendete Kalksandstein, liegt bezüglich der Festigkeitswerte im unteren Durchschnitt der damals eingesetzten Natursteine. Vor allem bei dieser Gesteinsart sollten künftig Versuche an höherwertigen Kalksandsteinen wie beispielsweise „Kaiserstein“ durchgeführt werden. Wie unter Abschnitt 2.1.2.3 angeführt, wurden während der Gründerzeit je nach Stiegentyp verschiedene Stufenformen verwendet. Auch hier wäre es interessant noch weitere Versuche an anderen Stufentypen durchzuführen.

In Zukunft sollen auch numerische Modellierungen Aufschluss über die Belastbarkeit von Geländerbefestigungen an Natursteinstiegen geben. Dazu sind Ansätze für das Material nötig. Die Ergebnisse dieser Arbeit können als Richtwert für Normalkraftbeanspruchung dienen.

Kapitel 7

Zusammenfassung

Zu Beginn dieser Arbeit wird auf die Problematik der Befestigung von Geländern an Natursteinstiegen der Gründerzeit eingegangen. Vor allem bei der Sanierungen von Wiener Gründerzeithäusern ist diese Thematik häufig auf Grund neuer Normen und erhöhten Lastvorgaben besonders relevant.

In Kapitel 2.1 wurde außerdem ein Überblick über die verschiedenen Typen der Gründerzeitlichen Natursteinstiegen so wie deren Geschichte gegeben. Im Zuge dessen wird auch ein Überblick über historische Geländerbefestigungen gegeben. In Kapitel 2.2 ist zudem ein Überblick über die heute gängigen Dübelssysteme sowie eine Einführung in die Versagensformen von Dübeln zu finden.

Anhand der Recherche über Befestigungstechnik wurden zwei Dübelssysteme ausgewählt, um Versuche an Natursteinstufen durchzuführen. Die durchgeführten experimentellen Untersuchungen sollen ein Bild des Verhaltens von modernen Befestigungsmitteln an Natursteinstufen der Gründerzeit aufzeigen. Zur Durchführung der Versuche wurde ein auf die Stufen angepasster Versuchsaufbau mit einem speziellen Auszugsgerät entwickelt. Die Entwicklung des des Auszugsgerätes und die Überlegungen zum Versuchsaufbau werden in Kapitel 3 näher beschrieben. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte mit einem eigens entwickelten Programm, das es möglich macht die verschiedenen Versuchs-Serien optimal miteinander zu vergleichen.

Die Ergebnisse der Auszugsversuche zeigen, dass die mittleren Auszugslasten der Dübel unabhängig vom Probekörpermaterial nicht stark variieren, die Versagensform jedoch in einem gewissen Ausmaß vom Material beeinflusst wird. Beide Dübeltypen zeigten abhängig vom Probekörpermaterial ein etwas unterschiedliches Verhalten. (siehe Kapitel 4.2)

Durch die Versuche konnte nicht festgestellt werden, dass sich einer der beiden Dübel oder eine der beiden Bohrmethode generell besser für Befestigungen an Natursteinstiegen eignet.

Die Ergebnisse der Versuche geben ein guten Überblick über die theoretisch möglichen Belastungen bei Befestigungen an Natursteinstiegen. Als wesentlicher Faktor für die Belastungsfähigkeit stellte sich die Geometrie der Stufen heraus. Da sich bei nicht eingehaltenen Randabständen kein Ausbruchskegel ausbilden kann. Dies reduziert aufgrund der veränderten Versagensform letztendlich auch die Bruchlast.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schottenring um 1875, (ARCHITEKTUR-AKTUELL 2015, Photograph unbekannt)	5
2.2	Zweiläufige Natursteinstiege aus der Gründerzeit	6
2.3	Lagerungsarten nach AHNERT (2002)	7
2.4	Grundrisstypen nach KOLBITSCH (1989)	8
2.5	Stufentypen nach AHNERT (2002)	9
2.6	Geländerbefestigungen am Stufenkopf nach AHNERT (1989)	12
2.7	Zweiläufige Stiege mit seitlichem Geländer	13
2.8	Geländerbefestigung an der Stirnseite mit Eisenband	13
2.9	Wendeltreppe mit elliptischem Grundriss	13
2.10	Geländerbefestigung auf der Trittlfläche	13
2.11	Wirkungsprinzipien, nach ELIGEHAUSEN (2000) und MALLÉE (2016)	15
2.12	Drehmomentkontrollierter Hinterschnittdübel, nach EAD 330232 (2016)	17
2.13	Wegkontrollierter Hinterschnittdübel, nach EAD 330232 (2016)	17
2.14	Selbst schneidender wegkontrollierter Hinterschnittdübel, nach EAD 330232 (2016)	17
2.15	Betonschraube, nach EAD 330232 (2016)	18
2.16	Drehmomentkontrollierter Spreizdübel, Hülsentyp nach EAD 330232 (2016)	20
2.17	Drehmomentkontrollierter Spreizdübel, Bolzentyp nach EAD 330232 (2016)	20
2.18	Wegkontrollierter Spreizdübel, nach EAD 330232 (2016)	20
2.19	Verbunddübel mit Kapselsystem, nach ETAG 001-5 (2013)	21
2.20	Verbunddübel mit Injektionssystem, nach ETAG 001-5 (2013)	21
2.21	Versagensformen, nach ELIGEHAUSEN (2000) und MALLÉE (2016)	23
3.1	Betonschraube, Hilti HUS3-H8 (8x75)	25
3.2	Verbundanker, Hilti HIT-V 5.8 M8x110	26
3.3	Betonprobekörper, Maße in [mm]	28
3.4	Kalksandsteinstufen	29
3.5	Kalksandsteingefüge	29
3.6	Quarzsandsteinstufen	30
3.7	Quarzsandsteingefüge	30
3.8	Auszugsgerät	32

3.9	Träger-Profil	33
3.10	Probekörper mit errechnetem Ausbruchskegel ($h_{ef} = 46,4 \text{ mm}$)	34
3.11	Verbindungsteil Hohlzylinder/Kraftmessdose	34
3.12	Verbindungsmittelaufnahme	35
3.13	Vorversuch 2	36
3.14	Vorversuch 3	36
3.15	Vorversuch 4	37
3.16	Vorversuch 6	37
3.17	Vorversuch 9	38
3.18	Vorversuch 10	38
3.19	Versuchsaufbau, Ansicht von Vorne	40
3.20	Darstellung des Versuchsaufbaus mit Messtechnik von der Seite	42
3.21	Versuchsablauf	44
4.1	Auswahlmöglichkeiten bei der automatisierten Auswertungsdatei	47
4.2	Exemplarische Ergebnisdarstellung des Auswertungsprogramms	48
4.3	Balkendiagramm der Auszugslasten in den Kalksandstein	52
4.4	Vier Exemplarische Kraft-Verschiebungs-Kurven der Versuche in Kalksandstein, mit verschiedenen Versagensformen	53
4.5	Balkendiagramm der Auszugslasten in Quarzsandstein	56
4.6	Exemplarische Kraft-Verschiebungs-Kurven der Versuche in Quarzsandstein	57
4.7	Balkendiagramm der mittleren Auszugskräfte in den Betonprobekörpern	60
4.8	Exemplarische Kraft-Verschiebungs-Kurven der Versuche in Beton	61
5.1	Balkendiagramm der Würfeldruckfestigkeiten	64
5.2	Balkendiagramm der Elastizitätsmodul-Untersuchungen	66
5.3	Kombiniertes Versagen	67
5.4	Spaltversagen	67
5.5	RKKA 4, Draufsicht	69
5.6	RKKA 4, Ansicht	69
5.7	Kombiniertes Versagen	70
5.8	Spaltversagen	70
A.1	Balkendiagramm der Auszugslasten in den Kalksandstein	82
A.2	Balkendiagramm der Auszugslasten in Quarzsandstein	83
A.3	Balkendiagramm der mittleren Auszugskräfte in den Betonprobekörpern	84
B.1	Kraft-Verschiebungs-Diagramm der Serie KHKA	86
B.2	Kraft-Verschiebungs-Diagramm der Serie KKKA	87
B.3	Kraft-Verschiebungs-Diagramm der Serie KHSA	88
B.4	Kraft-Verschiebungs-Diagramm der Serie KKSA	89
B.5	Kraft-Verschiebungs-Diagramm der Serie RHKA	90
B.6	Kraft-Verschiebungs-Diagramm der Serie RKKA	91
B.7	Kraft-Verschiebungs-Diagramm der Serie RHSA	92

B.8 Kraft-Verschiebungs-Diagramm der Serie RKSA	93
B.9 Kraft-Verschiebungs-Diagramm der Serie BHKA	94
B.10 Kraft-Verschiebungs-Diagramm der Serie BKKA	95
B.11 Kraft-Verschiebungs-Diagramm der Serie BHSA	96
B.12 Kraft-Verschiebungs-Diagramm der Serie BKSA	97

Tabellenverzeichnis

2.1	Ergebnisse zu eingespannten Natursteinstiegen, bei einer Nutzlast (p) von 4,0 kN/m ² , aus den Ergebnissen des Stiegenstufen-Ausschusses von 1896, nach KOLBITSCH 1989	11
3.1	Versuchsprogramm	31
4.1	Gemessene Auszugslasten für Kalksandstein (durchgestrichene Werte wurden von der weiteren Auswertung ausgeschieden)	50
4.2	Statistische Auswertung der Auszugslasten für Kalksandstein	51
4.3	Gemessene Auszugslasten für Quarzsandstein	54
4.4	Statistische Auswertung der Auszugslasten für Quarzsandstein	55
4.5	Gemessene Auszugslasten für Beton (durchgestrichene Werte wurden von der weiteren Auswertung ausgeschieden)	59
4.6	Statistische Auswertung der Auszugslasten für Beton	59
5.1	Statistische Auswertung der Würfeldruckversuche	64
5.2	Statistische Auswertung der E-Modul Untersuchungen	65
A.1	Gemessene Auszugslasten für Kalksandstein (durchgestrichene Werte wurden von der weiteren Auswertung ausgeschieden)	82
A.2	Statistische Auswertung der Auszugslasten für Kalksandstein	82
A.3	Gemessene Auszugslasten für Quarzsandstein	83
A.4	Statistische Auswertung der Auszugslasten für Quarzsandstein	83
A.5	Gemessene Auszugslasten für Beton (durchgestrichene Werte wurden von der weiteren Auswertung ausgeschieden)	84
A.6	Statistische Auswertung der Auszugslasten für Beton	84

Literaturverzeichnis

- ETA-13/1036 (2015). *Europäisch technische Bewertung, Injektionssystem Hilti HIT-HY-270*, Deutsches Institut für Bautechnik.
- ETA-13/1038 (2016). *Europäisch technische Bewertung, Hilti Betonschraube HUS 3*, Deutsches Institut für Bautechnik.
- AHNERT R. und KRAUSE K. H. (1989). *Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960, Band 2*, Verlag Bauwesen, Berlin.
- AHNERT R. und KRAUSE K. H. (2002). *Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960, Band 3*, Verlag Bauwesen, Berlin.
- ARCHITEKTUR-AKTUELL.AT (2015). *Ausstellung: Donaumetropolen Wien - Budapest - Stadträume der Gründerzeit*, Wien Museum, Photograph unbekannt, <https://www.architektur-aktuell.at/news/ausstellung-donaumetropolen-wien-budapest-stadtraeume-der-gruenderzeit>, 03.02.2017 10:30.
- BOBEK H. und LICHTENBERGER E. (1966). *Wien, Bauliche Gestalt und Entwicklung seit der Mitte des 19. Jahrhunderts*, Hermann Böhlau Nachf., Graz.
- BRIK J. E. (1896). *Zur Verwertung der Ergebnisse aus dem Bericht des Steigenstufen-Ausschusses*, Zeitschrift des österr. Ingenieur- und Architekten-Vereins.
- EAD 330232-00-0601 (2016). *Mechanical fasteners for use in concrete*, European Organisation for Technical Assessment.
- ELIGEHAUSEN R. und MALLÉE R. (2000). *Befestigungstechnik im Beton- und Mauerwerksbau*, Ernst & Sohn, Berlin.
- ETAG 001-5 (2013). *Metalldübel zur Verankerung im Beton, Teil 5, Verbunddübel*, European Organisation for Technical Assessment.
- ETAG 001-C (2010). *Metalldübel zur Verankerung im Beton, Anhang C Bemessungsverfahren für Verankerungen*, European Organisation for Technical Assessment.
- FRICK.O (1927). *Handbuch der Steinkonstruktionen*, Willy Geissler Verlag, Berlin.
- HÖFLINGER M. (2014). *Freitragende Natursteinstiegen der Gründerzeit - Systembeurteilung, Material- und Bestandsuntersuchungen*, Dissertation, Technische Universität Wien.

- KAISER R.E. und MÜHLBAUER J.A. (1983). *Elementare Tests zur Beurteilung von Messdaten*, Bibliographisches Institut Mannheim/Wien/Zürich.
- KOLBITSCH A. (1989). *Altbaukonstruktionen*, Springer-Verlag, Wien-New York.
- MALLÉE R. (2016). *Skriptum Befestigungstechnik im Konstruktiven Ingenieurbau*, Institut für konstruktiven Ingenieurbau der Universität für Bodenkultur, Wien.
- ONR 24009 (2013). *Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Hochbauten*, Austrian Standards Institute.
- REINHOLD SCHECK (2009). *Das Excel Profiseminar*, Microstoft Press Deutschland.
- ROHATSCH A. (1999). *Flyschsandstein im Wienerwald und seine historische Bedeutung (in:) Der Wienerwald S.37*, Amt d. NÖ Landesregierung, St. Pölten.
- ROHATSCH A. (2007). *Kaisersteinbruch: Leithakalk in bester Qualität. (in:) HOFMANN T. Wien Niederösterreich Burgenland, Wanderungen in die Ergeschichte*, Geologische Bundesanstalt, Wien.

Anhang **A**

A.1 Ergebnisse der Auszugsversuche in Kalksandstein

Tabelle A.1: Gemessene Auszugslasten für Kalksandstein (durchgestrichene Werte wurden von der weiteren Auswertung ausgeschieden)

KHKA			KKKA			KHSA			KKSA		
Auszugslast	Versagen		Auszugslast	Versagen		Auszugslast	Versagen		Auszugslast	Versagen	
[kN]	-		[kN]	-		[kN]	-		[kN]	-	
1	13,14	H	1	16,86	Sp	1	13,08	H	1	3,93	H
2	18,06	Sp	2	15,04	Sp	2	18,58	Sp	2	16,21	KV
3	15,83	Sp	3	14,10	Sp	3	10,95	H	3	4,00	H
4	15,30	Sp	4	17,09	Sp	4	10,30	H	4	6,59	H
5	15,81	H	5	16,28	Sp	5	20,01	Sp	5	7,93	H
6	16,88	H	6	20,06	Sp	6	14,07	H	6	15,59	KV
7	15,49	KV	7	16,19	Sp	7	15,64	Sp	7	20,31	Sp

Tabelle A.2: Statistische Auswertung der Auszugslasten für Kalksandstein

Serie	Anzahl	Minimalwert	Maximalwert	Mittelwert	STABW	STABW	5% - Quantil
	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[kN]
KHKA	7	13,14	18,06	15,79	1,51	9,56	12,22
KKKA	7	14,10	20,06	16,52	1,88	11,38	12,07
KHSA	7	10,30	20,01	14,66	3,67	25,00	5,99
KKSA	3	15,59	20,31	17,37	2,57	14,78	9,20

Balkendiagramm der Auszugslasten in Kalksandstein

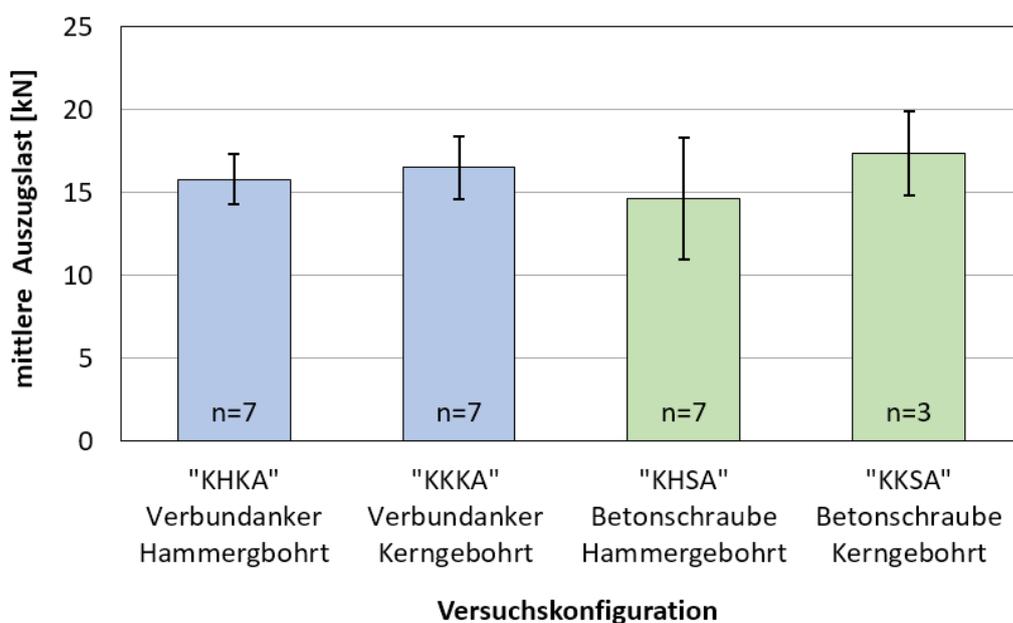


Abbildung A.1: Balkendiagramm der Auszugslasten in den Kalksandstein

A.2 Ergebnisse der Auszugsversuche in Quarzsandstein

Tabelle A.3: Gemessene Auszugslasten für Quarzsandstein

RHKA			RKKA			RHSA			RKSA		
Auszugslast	Versagen										
[kN]	-		[kN]	-		[kN]	-		[kN]	-	
1	18,79	H	1	24,15	S	1	15,81	Sp	1	24,24	Sp
2	17,83	Sp	2	23,96	Sp	2	16,20	Sp	2	16,69	Sp
3	19,46	Sp	3	16,14	Sp	3	15,96	Sp	3	22,62	Sp
4	21,11	Sp	4	20,13	Sp	4	12,07	Sp	4	13,72	Sp
5	18,78	Sp	5	22,73	Sp	5	17,49	Sp	5	12,34	Sp
6	20,25	Sp	6	15,36	Sp	6	17,54	Sp	6	15,93	Sp
7	20,10	KV	7	15,08	H	7	20,27	Sp	7	13,57	Sp

Tabelle A.4: Statistische Auswertung der Auszugslasten für Quarzsandstein

Serie	Anzahl	Minimalwert	Maximalwert	Mittelwert	STABW	STABW	5% - Quantil
	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[kN]
RHKA	7	17,83	21,11	19,47	1,10	5,67	16,86
RKKA	7	15,08	24,15	19,65	4,09	20,79	9,99
RHSA	7	12,07	20,27	16,48	2,48	15,03	10,62
RKSA	7	12,34	24,24	17,02	4,65	27,30	6,03

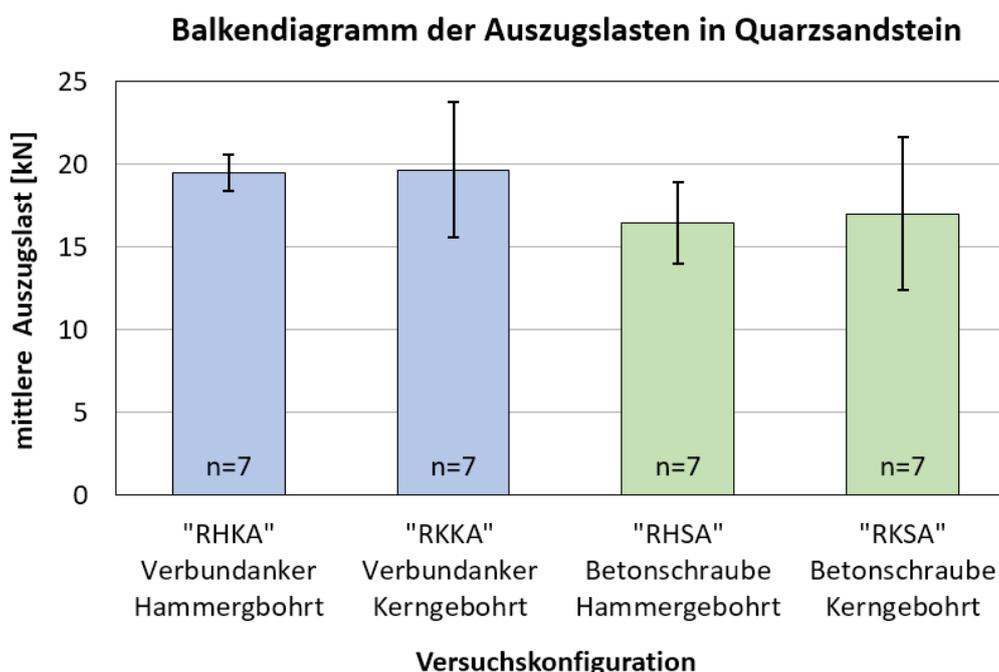


Abbildung A.2: Balkendiagramm der Auszugslasten in Quarzsandstein

A.3 Ergebnisse der Auszugsversuche in Beton

Tabelle A.5: Gemessene Auszugslasten für Beton (durchgestrichene Werte wurden von der weiteren Auswertung ausgeschlossen)

BHKA			BKKA			BHSA			BKSA		
Auszugslast	Versagen		Auszugslast	Versagen		Auszugslast	Versagen		Auszugslast	Versagen	
[kN]	-		[kN]	-		[kN]	-		[kN]	-	
1	15,21	KV	1	19,70	Sp	1	20,32	Sp	1	16,15	Sp
2	21,94	KV	2	7,59	H	2	23,29	KV	2	32,99	Sp
3	17,18	KV	3	21,66	Sp	3	23,41	Sp	3	22,51	Sp
4	20,11	KV	4	24,01	Sp	4	13,96	Sp	4	18,93	Sp
5	17,66	Sp	5	16,71	H	5	16,76	Sp	5	23,57	Sp
6	21,94	KV	6	17,57	KV	6	28,00	Sp	6	18,24	Sp
7	17,94	H	7	24,92	S	7	21,81	Sp	7	20,90	Sp

Tabelle A.6: Statistische Auswertung der Auszugslasten für Beton

Serie	Anzahl	Minimalwert	Maximalwert	Mittelwert	STABW	STABW	5% - Quantil
	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[kN]
BHKA	7	15,21	21,94	18,85	2,55	13,52	12,82
BKKA	6	16,71	24,92	20,76	3,36	16,18	12,54
BHSA	6	13,96	23,41	19,92	3,81	19,14	10,59
BKSA	6	16,15	23,57	20,05	2,79	13,92	13,22

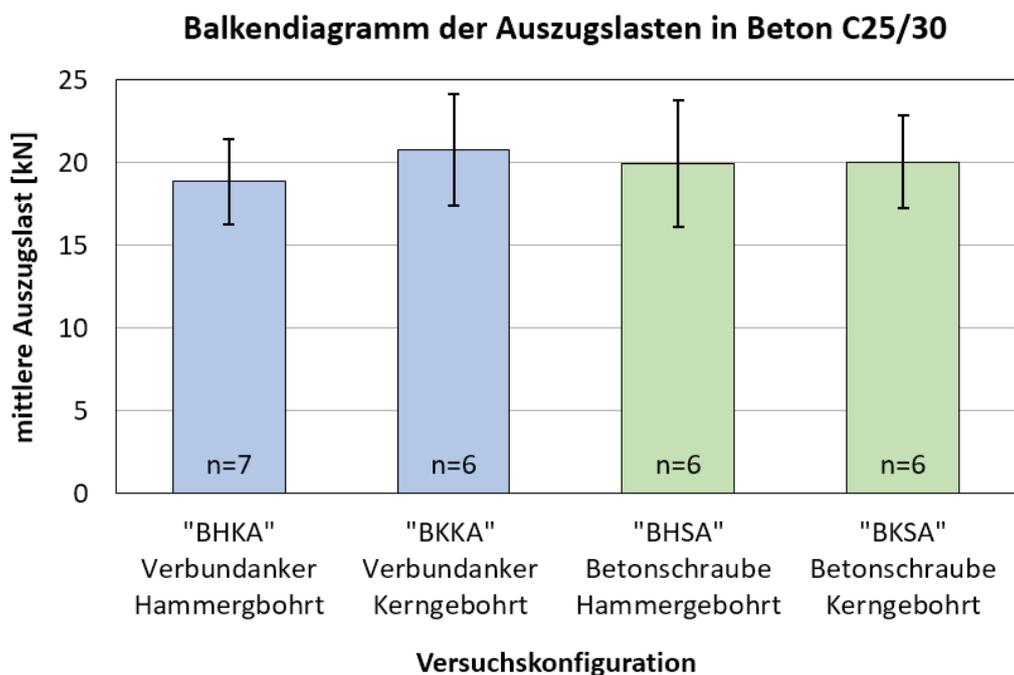


Abbildung A.3: Balkendiagramm der mittleren Auszugskräfte in den Betonprobekörpern

Anhang **B**

B.1 Kraft-Verschiebungs-Diagramme

In Anhang B sind die Kraft-Verschiebungs-Diagramme aller durchgeführten Auszugsversuche dargestellt. In den Diagrammen werden die Versagensformen wie folgt abgekürzt:

- (H) Herausziehen
- (A) Ausbruch
- (S) Stahlversagen
- (Sp) Spalten
- (KV) Kombiniertes Versagen

Die in Anhang B dargestellten Kraft-Verschiebungs-Diagramme beziehen sich generell auf die gemessenen Verschiebungen der Wegaufnehmer 1 & 2. Bei Versuchen, bei denen die Verschiebungsmessung der Wegaufnehmer 1 & 2 keine verwertbaren Ergebnisse lieferte, wurde auf die Werte des Wegaufnehmers 3 zurückgegriffen. In diesem Fall wurde die Dehnung der Zugstange rechnerisch kompensiert. Die betroffenen Versuche sind: KKKA 1, RHKA 5, RHKA 6, RKKA 2, RHSA 4, BKKA 3, BKSA 3

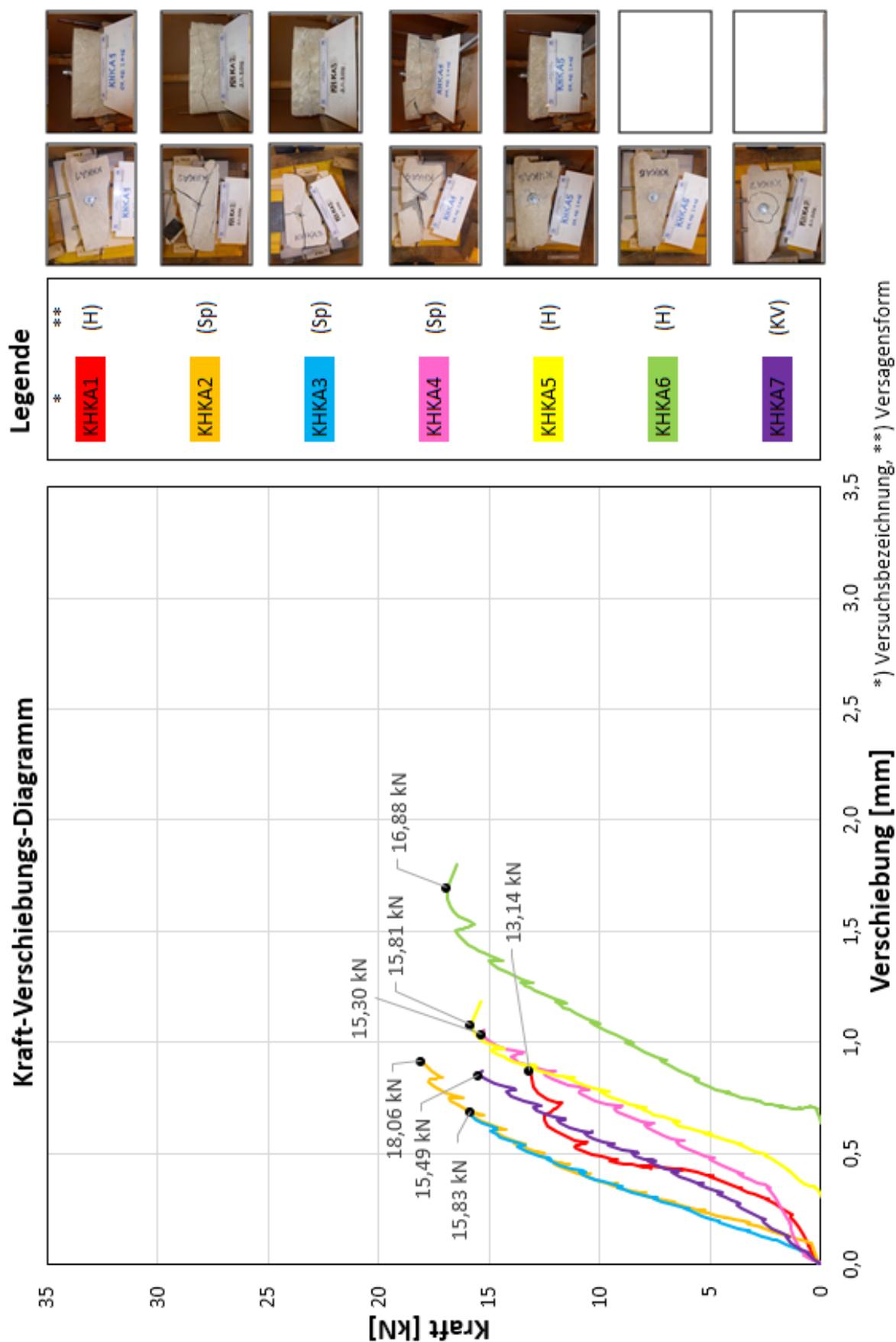


Abbildung B.1: Kraft-Verschiebungs-Diagramm der Serie KHKA

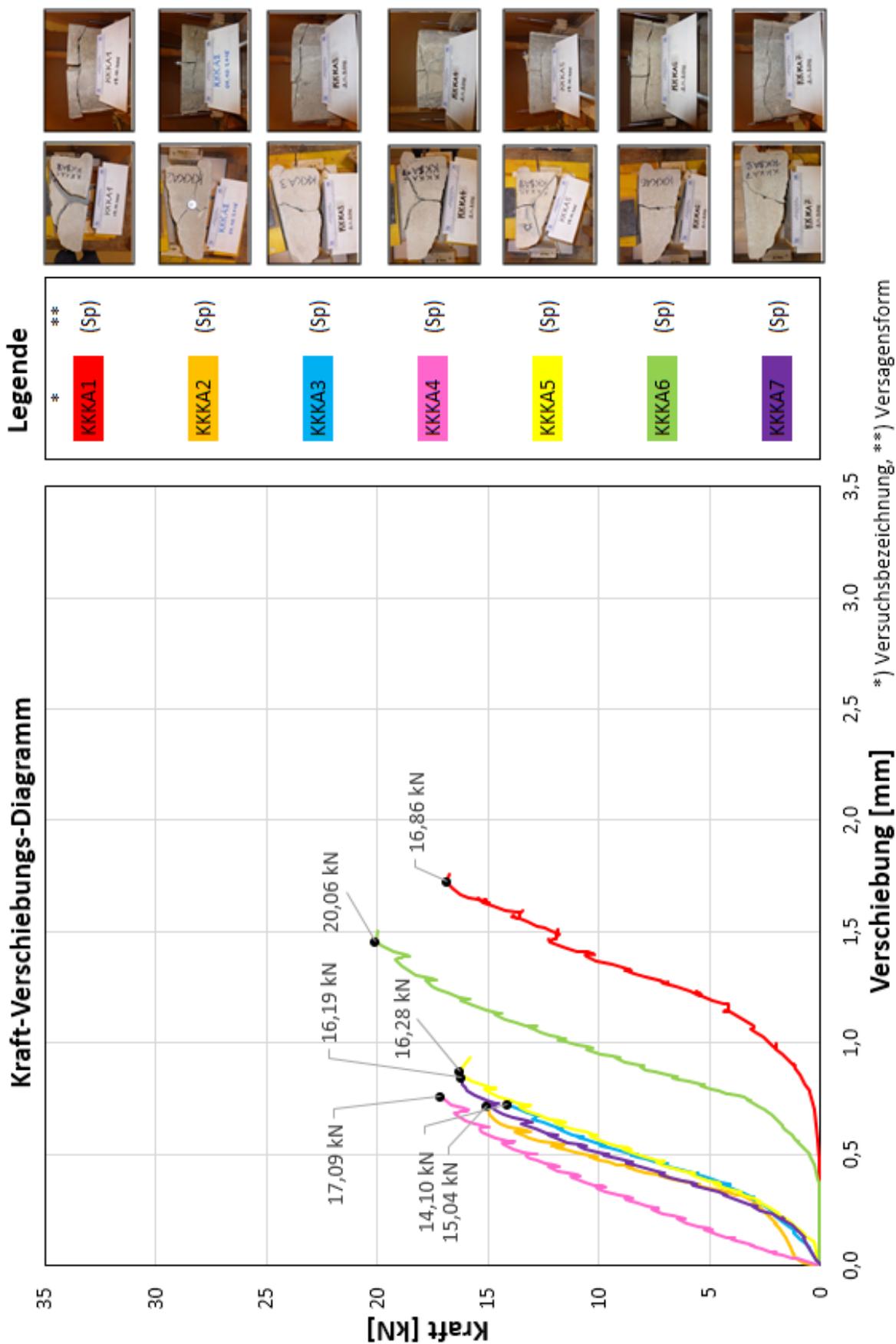


Abbildung B.2: Kraft-Verschiebungs-Diagramm der Serie KKKA

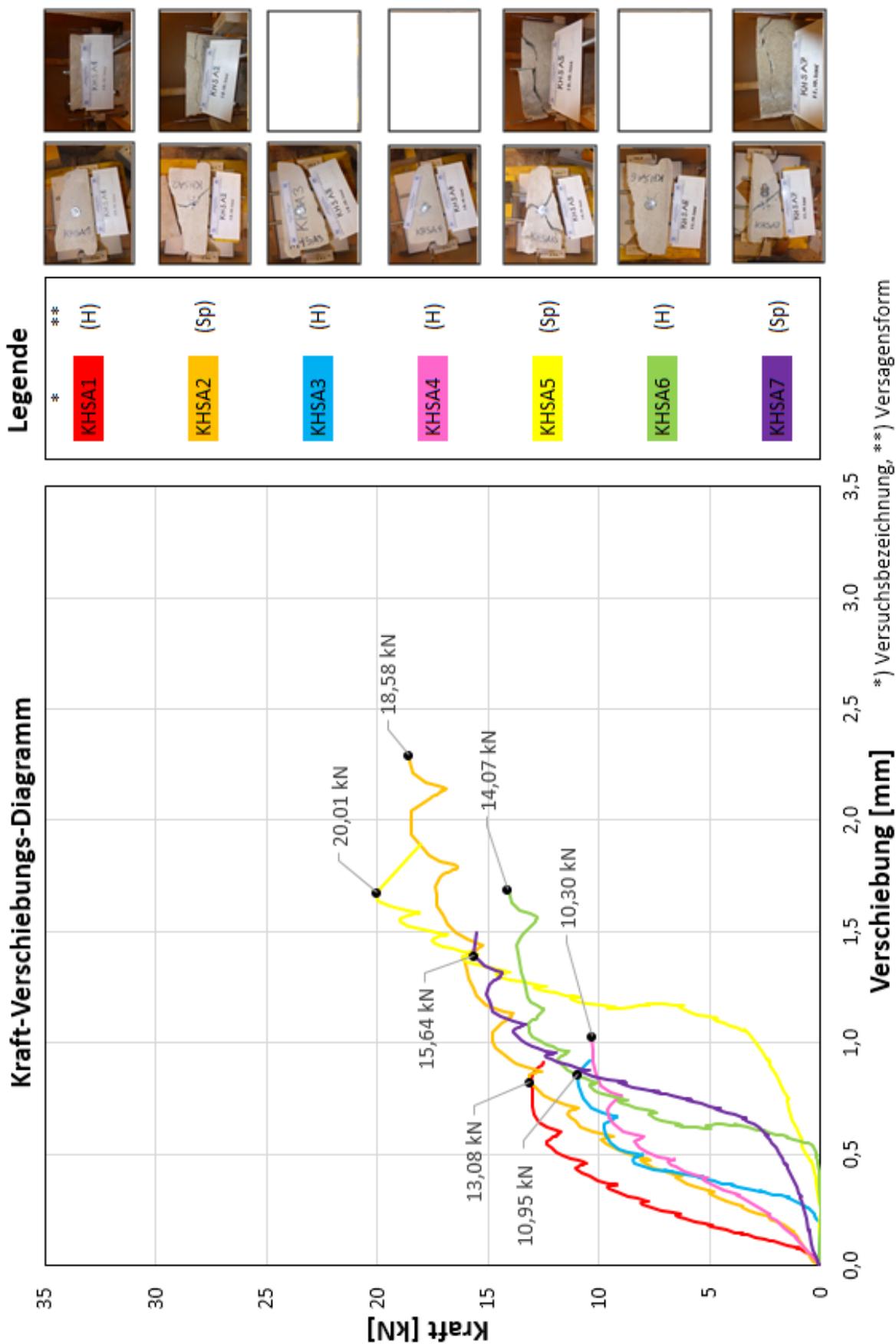


Abbildung B.3: Kraft-Verschiebungs-Diagramm der Serie KHSA

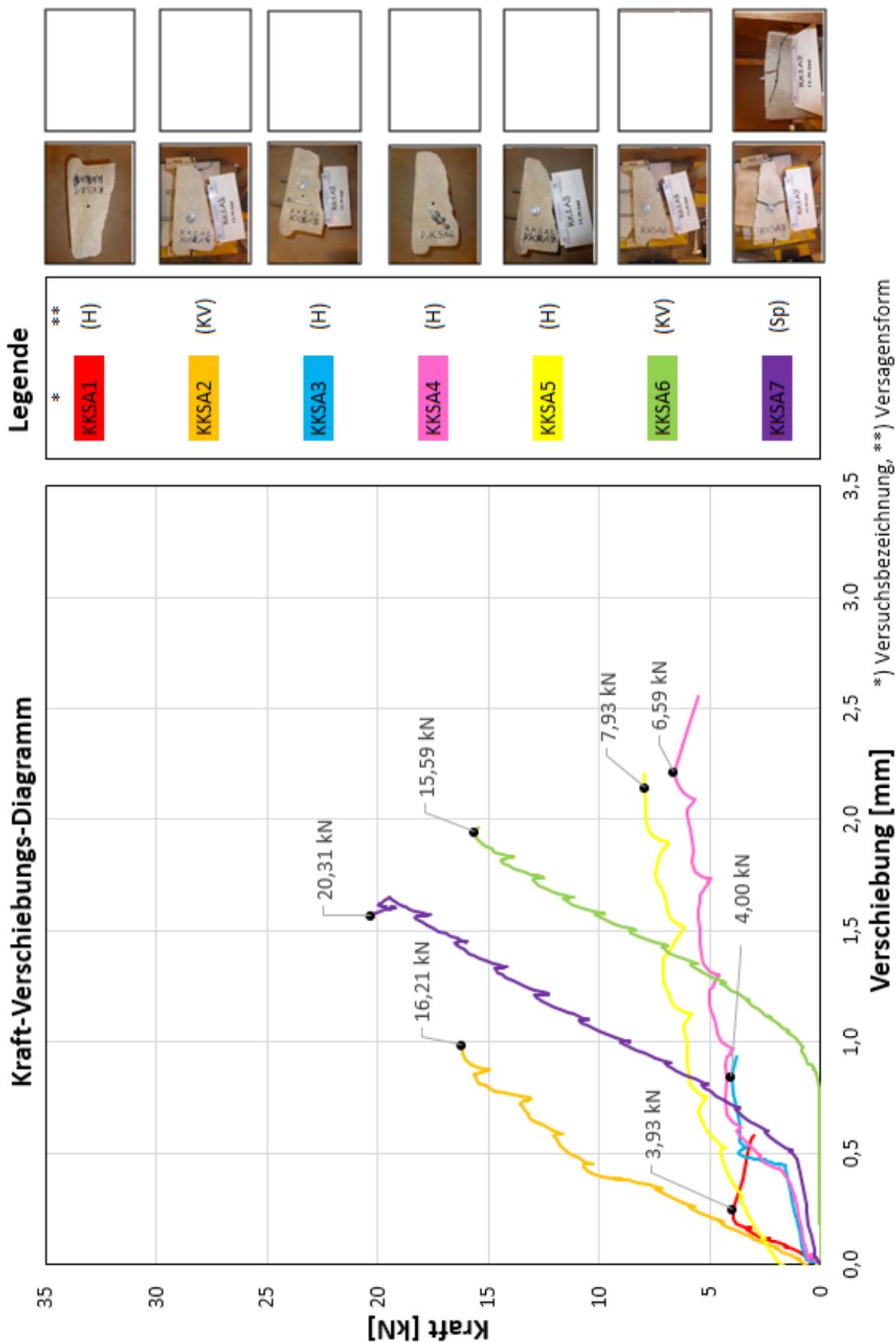


Abbildung B.4: Kraft-Verschiebungs-Diagramm der Serie KKSA

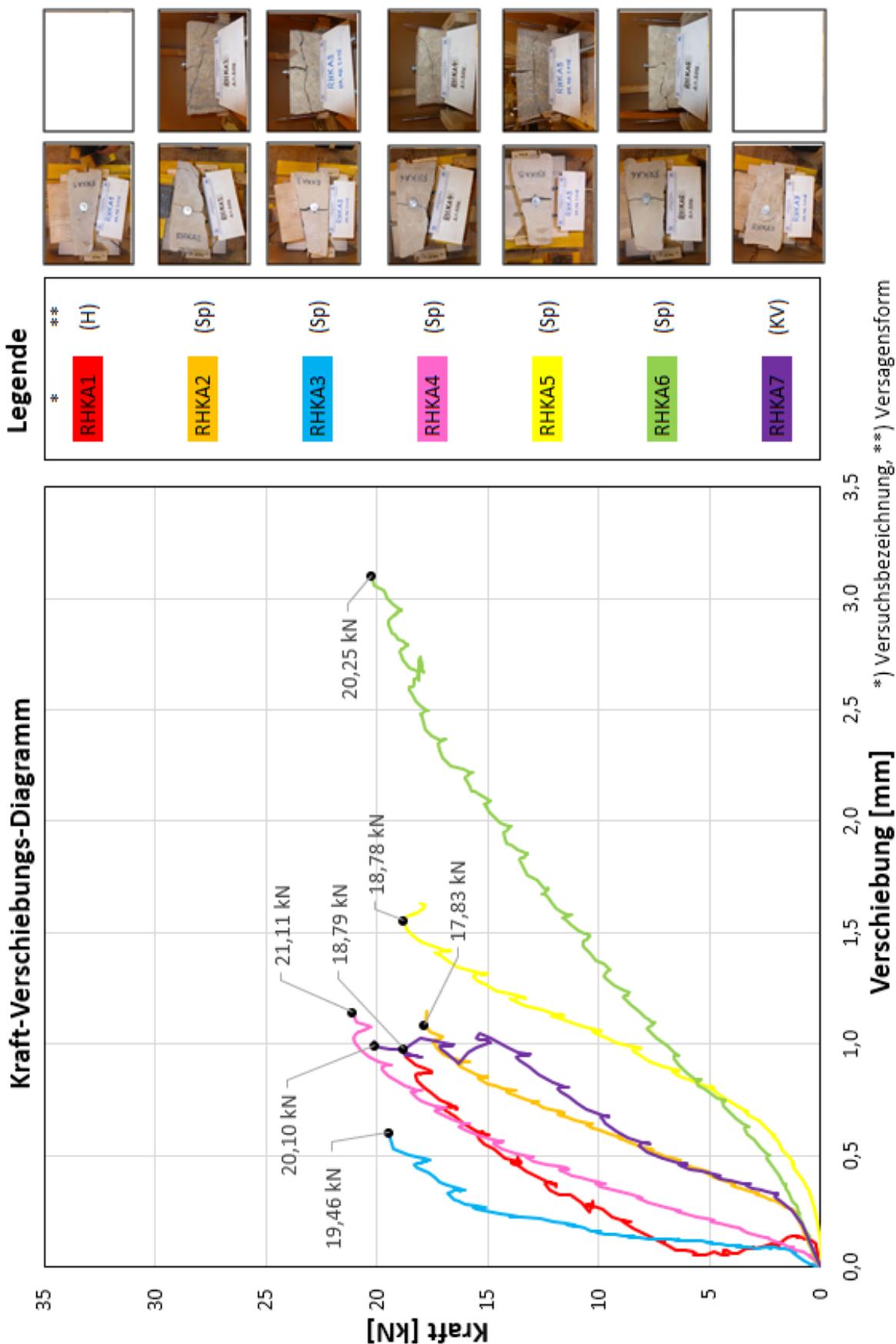


Abbildung B.5: Kraft-Verschiebungs-Diagramm der Serie RHKA

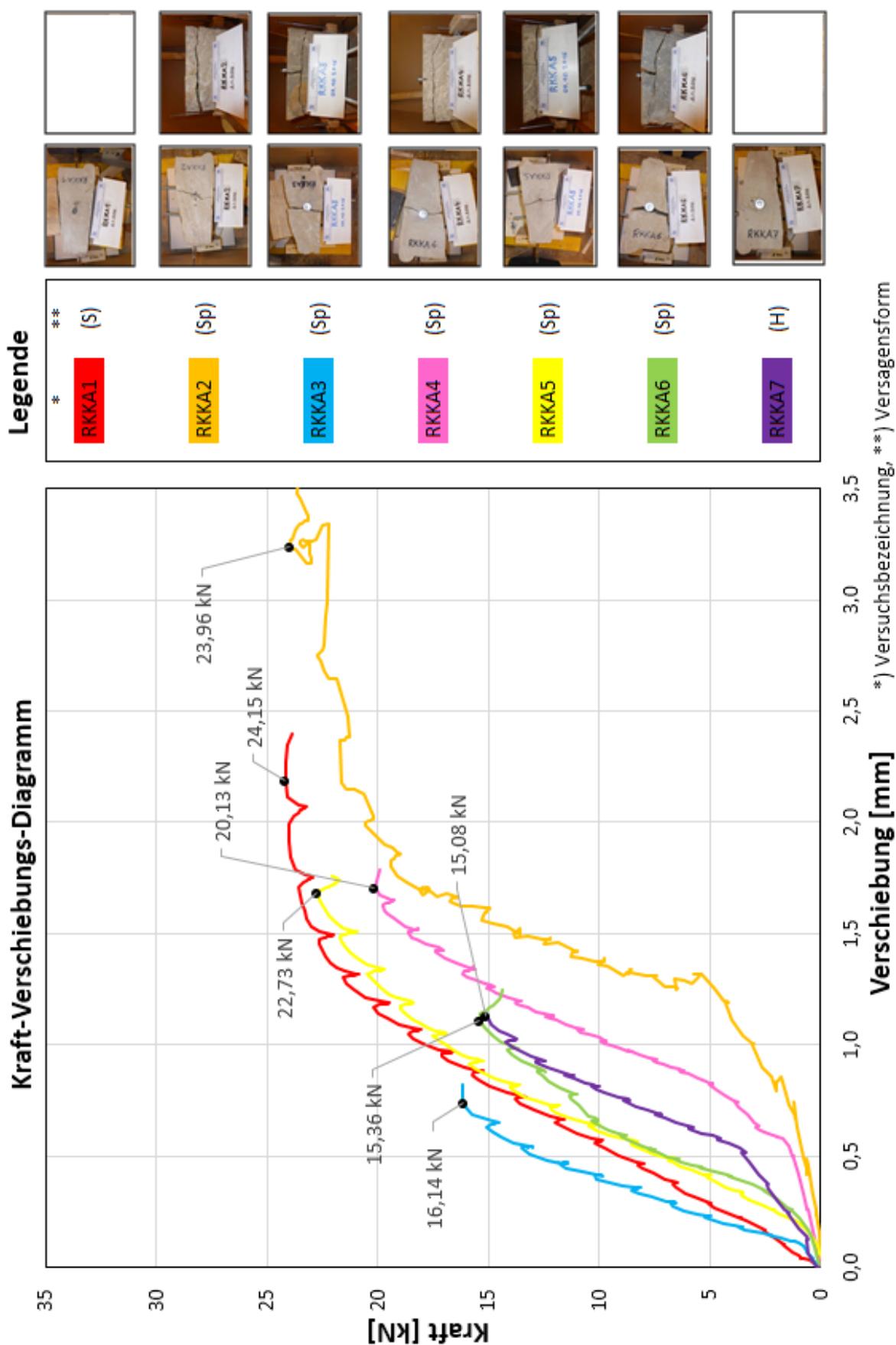


Abbildung B.6: Kraft-Verschiebungs-Diagramm der Serie RKKKA

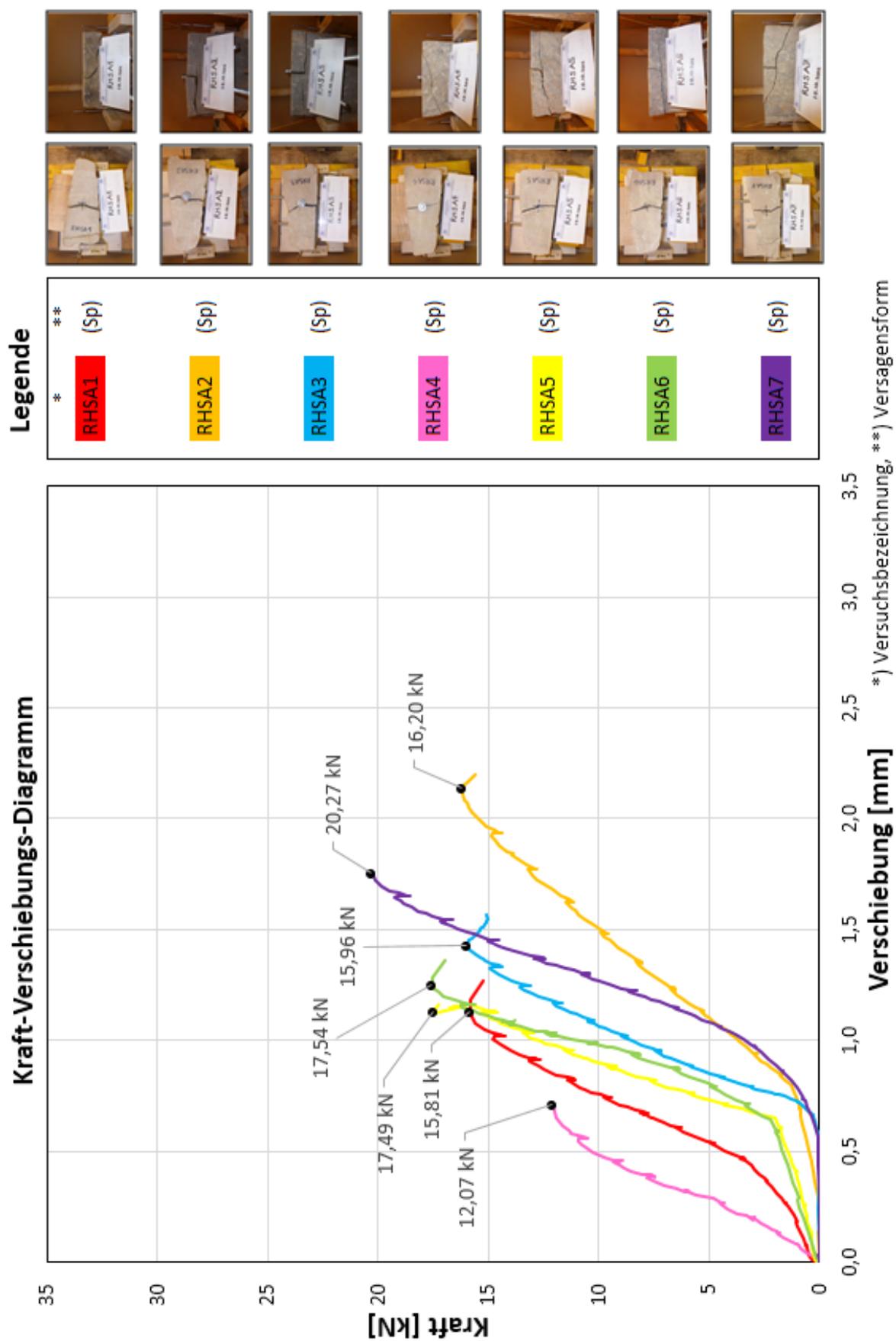


Abbildung B.7: Kraft-Verschiebungs-Diagramm der Serie RHSA

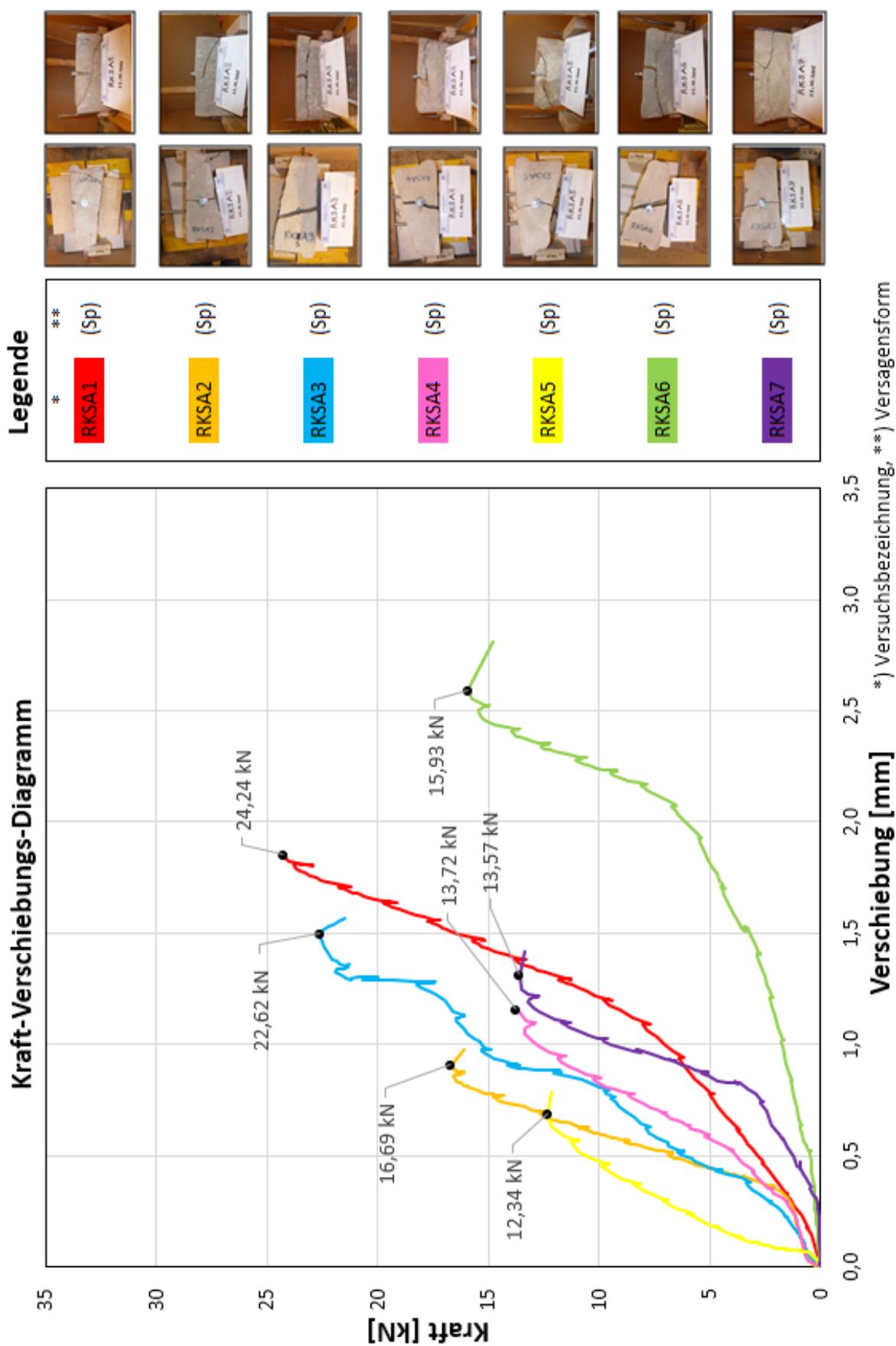


Abbildung B.8: Kraft-Verschiebungs-Diagramm der Serie RKSA

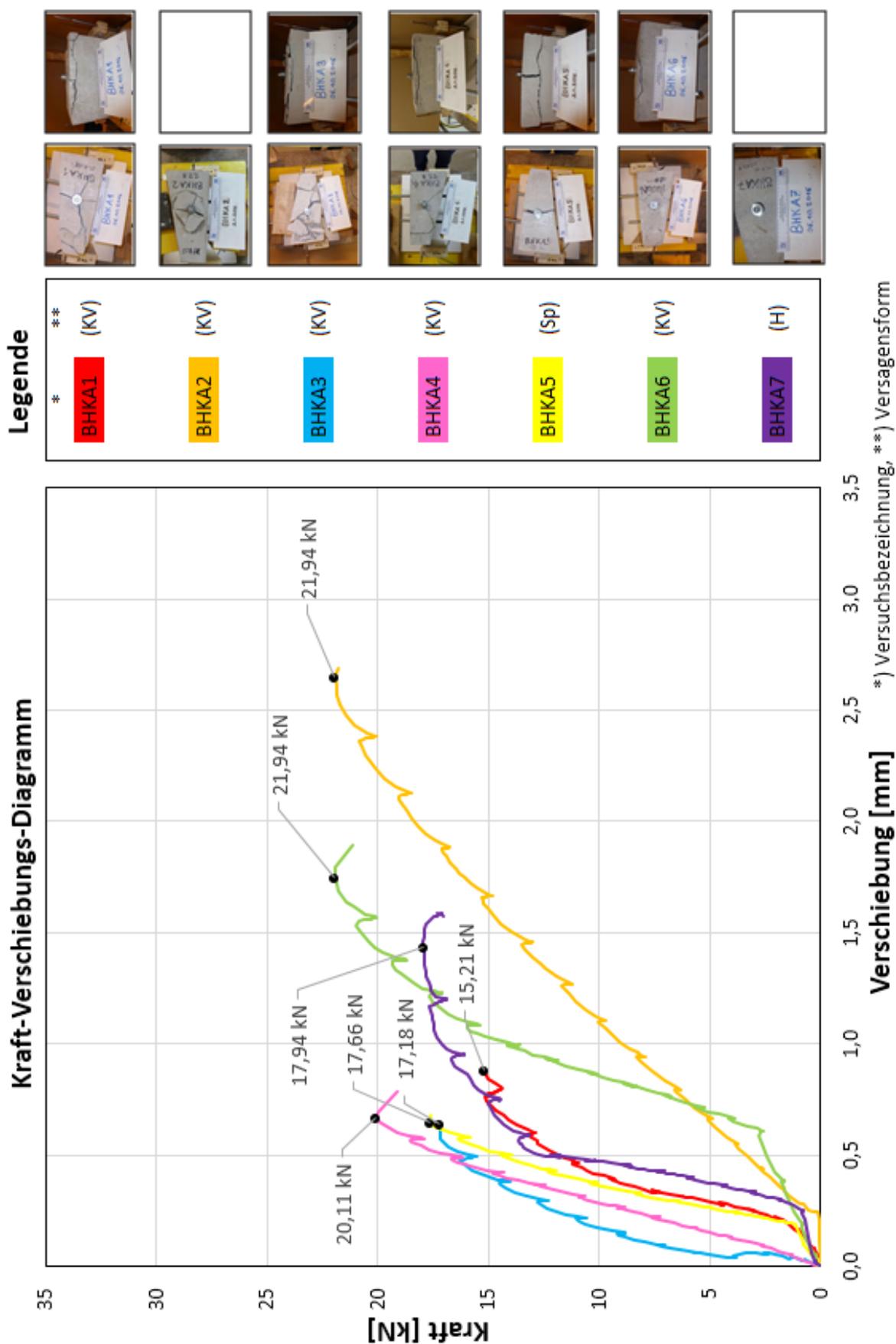


Abbildung B.9: Kraft-Verschiebungs-Diagramm der Serie BHK A

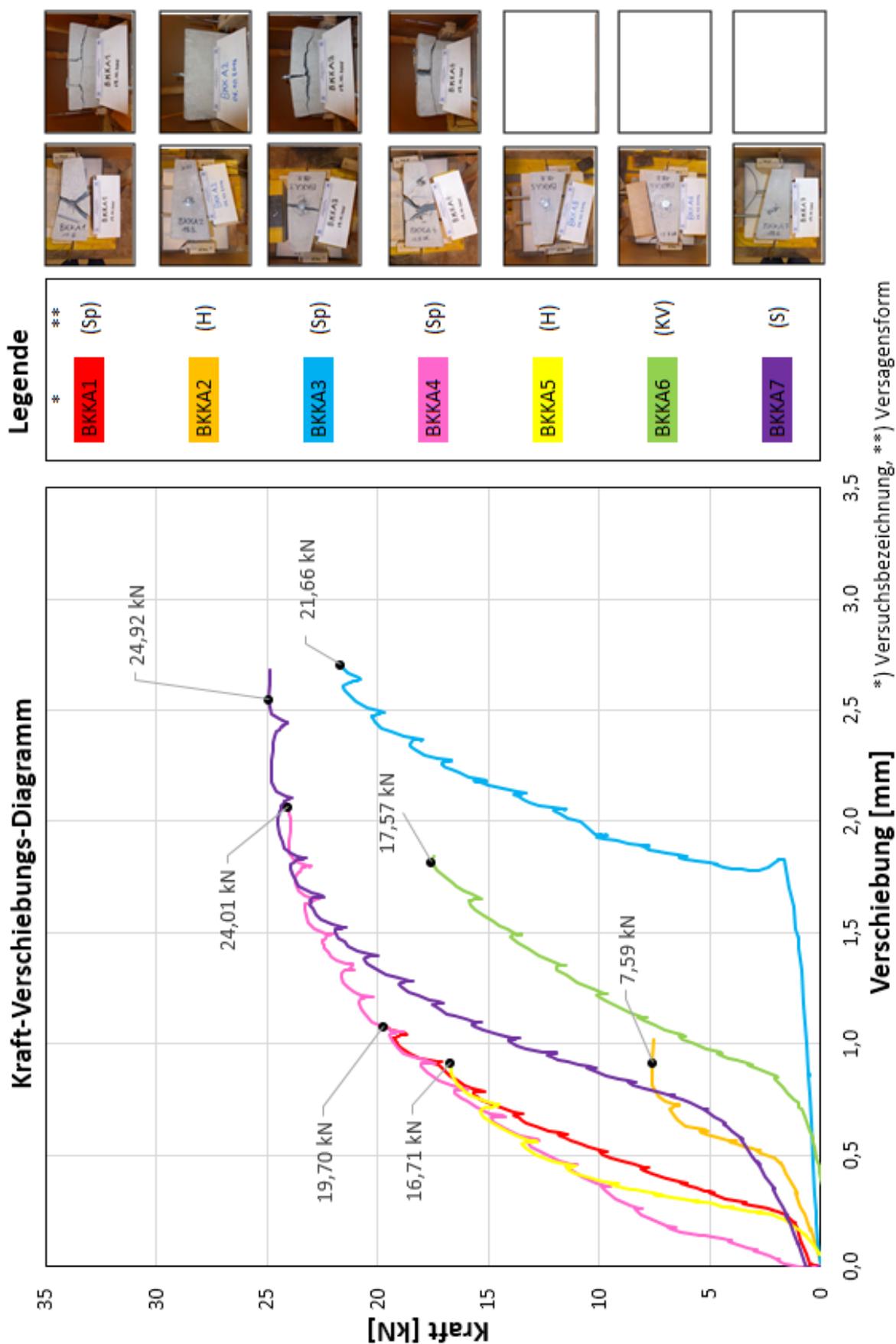


Abbildung B.10: Kraft-Verschiebungs-Diagramm der Serie BKKA

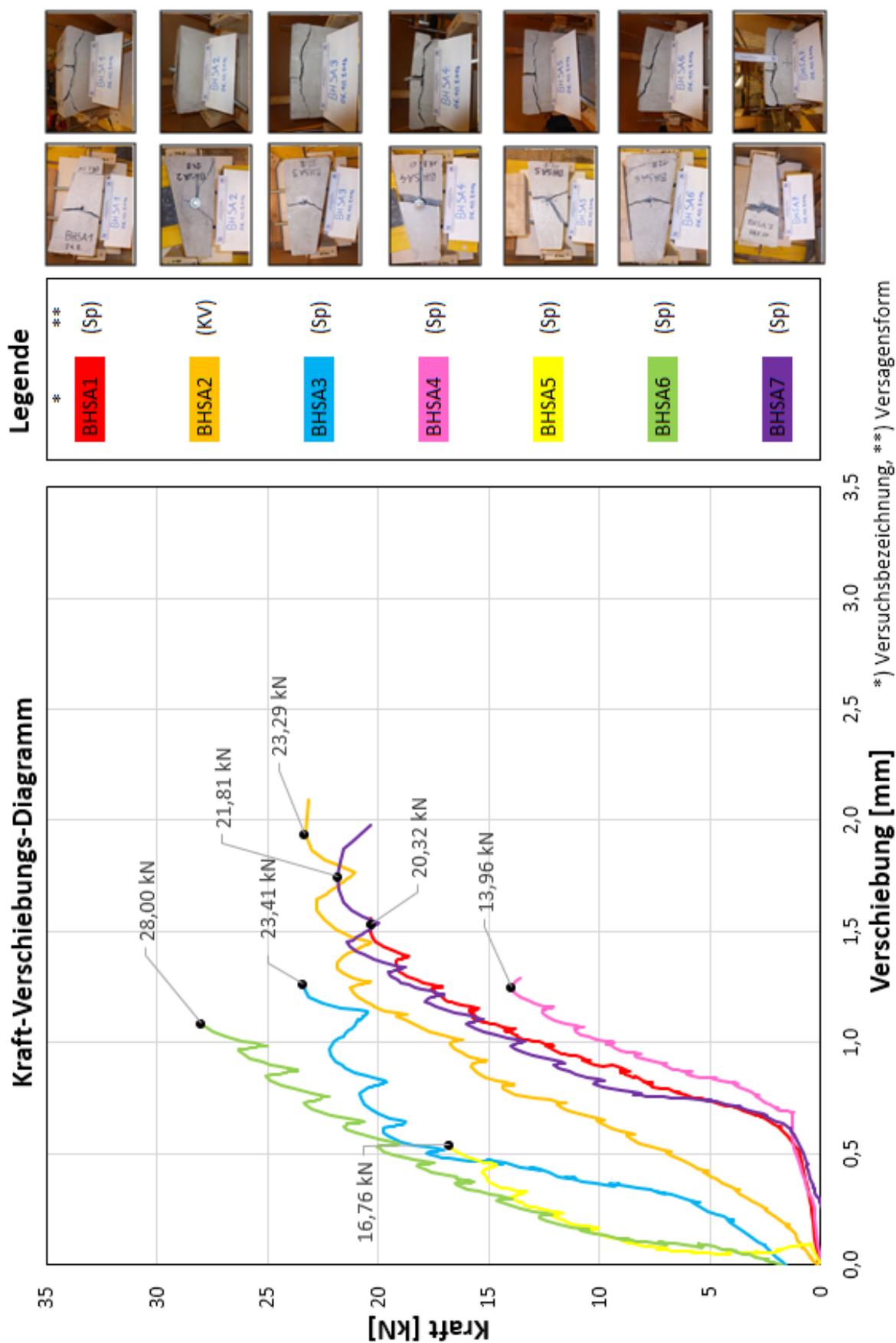


Abbildung B.11: Kraft-Verschiebungs-Diagramm der Serie BHTSA

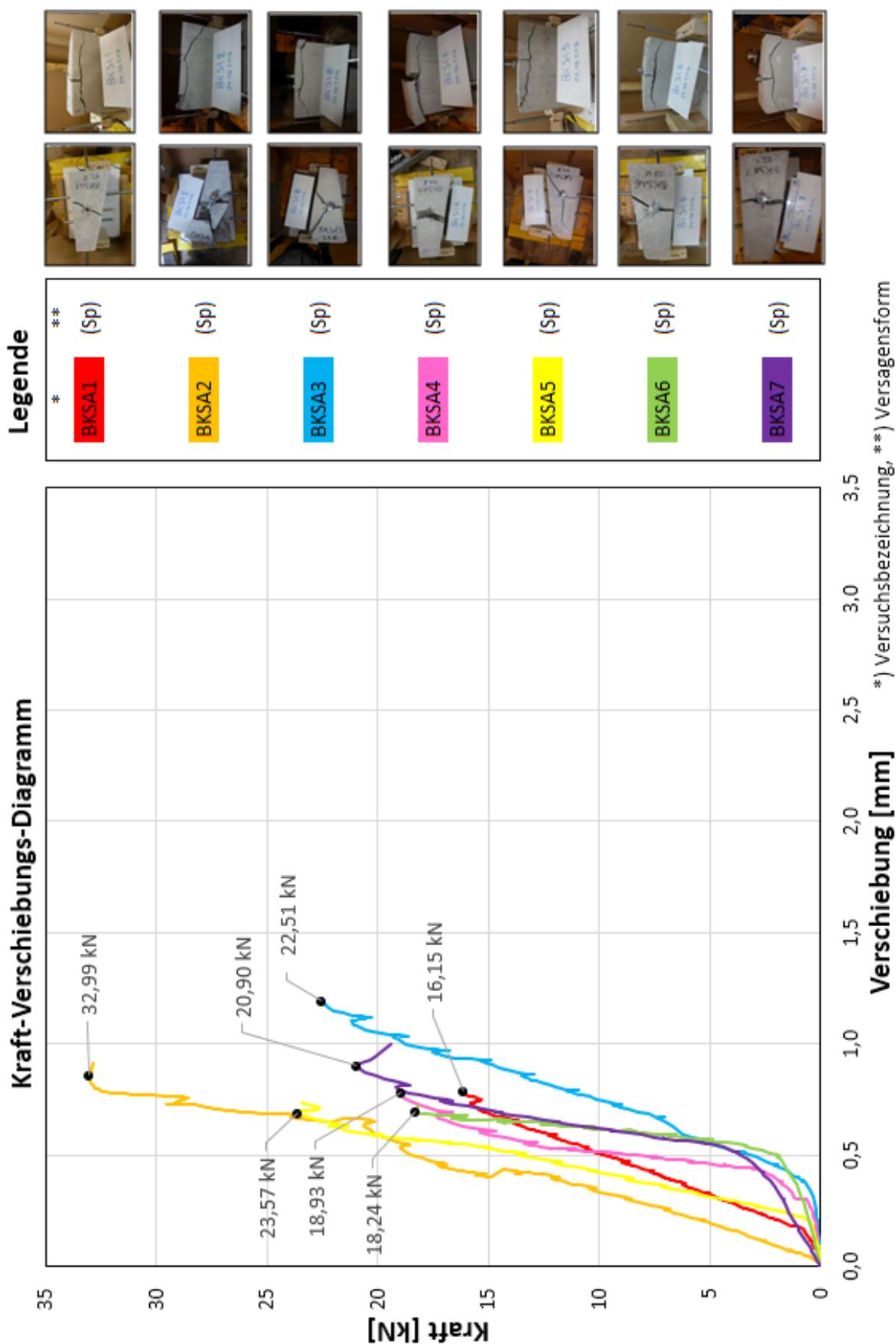


Abbildung B.12: Kraft-Verschiebungs-Diagramm der Serie BKSA