



Dipl.-Ing. Matthias Raudaschl

**Klettbeton
Analyse und Herstellung
verbindungsfähiger Betonstrukturen
am Vorbild der Klettverbindung**

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der technischen Wissenschaften

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Architekt Roger Riewe
Institut für Architekturtechnologie, Technische Universität Graz

Zweitgutachter

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bauingenieur Harald Kloft
Institut für Tragwerksentwurf, Technische Universität Braunschweig

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen meiner Forschungstätigkeit am Institut für Architekturtechnologie an der Technischen Universität Graz entstanden.

Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer Prof. Roger Riewe für die inhaltliche, wissenschaftliche und fachliche Unterstützung, wie auch die stetige Förderung seit meiner Anfangszeit am Institut. Darüber hinaus möchte ich Ferdinand Oswald danken, welcher mein Interesse an der Forschung geweckt und mich mit der Thematik der Klettverbindung bekannt gemacht hat.

In ganz besonderem Maße möchte ich zudem meiner Familie danken. Ohne eure umfassende Unterstützung wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Dissertation identisch.

14.07.2020

Datum

Unterschrift

Kurzfassung

Die Anwendung der Klettverbindung, bestehend aus zwei komplementären Verbindungspartnern oder Klettkomponenten, an der konstruktiven Schnittstelle Primärstruktur (Rohbau) zu Sekundärstruktur (Ausbau) und Tertiärstruktur (technische Gebäudeausrüstung), ermöglicht, entsprechend ihres Funktionsprinzips, einen einfach zu trennenden und wiederherzustellenden Verbund kurzlebiger und langlebiger Bauteile und damit eine hohe Instandhaltungsfreundlichkeit wie auch Anpassungsfähigkeit an neue Nutzungen und Anforderungen. Daraus erschließt sich ein großes Potential zur Steigerung der Lebensdauer von Gebäuden und einzelner Gebäudekomponenten,¹ bei gleichzeitiger Notwendigkeit der Gewährleistung der Funktionalität der entsprechenden Klettkomponente über die Lebensdauer des jeweiligen Rohbauteiles hinweg.

Gegenstand thematisch relevanter Forschungsprojekte, Patente und Anwendungen im Bauwesen sind vor allem nachträglich aufgebrauchte Klettkomponenten aus Kunststoffmaterialien. Grundsätzlich können Bauteile aus Kunststoff sehr witterungsbeständig sein, aufgrund der komplexen Wechselwirkungen im Bauwesen, infolge wechselnder Feuchte-, Temperatur und UV-Belastungen, jedoch schneller altern². Des Weiteren erfolgt das Aufbringen einer Klettkomponente auf formsteifen Untergründen in der Regel mittels Kleben und damit einer Verbindungsart,³ deren Lebensdauer, verglichen mit Rohbauteilen, wesentlich kürzer zu beziffern ist.⁴

Zur Lösung dieser Problematik schlägt die vorliegende Arbeit einen Materialwechsel sowie eine daraus resultierende Herstellungsmethode von Klettkomponenten vor. Unter dem Aspekt der vielfältigen Formbarkeit des Rohbaustoffes Beton besteht das Forschungsziel, infolge einer Anwendung der Wachsschalungstechnologie, in der grundlegenden Untersuchung und Herstellung von Beton-Klettkomponenten anhand des Vorbildes industrieller Klettprodukte. Diesen Forschungsansatz auf das Bauwesen angewandt, könnten Betonbauteile, neben den Hauptfunktionen des Tragens, Kraftleitens und der Bildung einer Hülle, einem entsprechenden Verbindungspartner dauerhaft und ohne zusätzliche Bearbeitungsschritte als direkt verbindungsfähiger Befestigungsuntergrund dienen.

Die Untersuchung beginnt mit einer Feststellung des Standes der Technik und einer Aufbereitung von Grundlagen. Das umschließt eine Analyse der Klettverbindung, der Befestigungstechnik in Beton sowie der Wachsschalungstechnologie. Daraus resultierend werden drei Herstellungskonzepte zur Fertigung klettfähiger Betonstrukturen entwickelt und anhand einer Machbarkeitsstudie, infolge von Herstellungs- und Klettversuchen, überprüft. Das Ergebnis der Arbeit besteht in geometrie- als auch materialspezifischen Anforderungen zur Nachbildung von Klettkomponenten in Beton, grundlegenden Konzepten zur Herstellung von „Klettbeton“ anhand der Wachsschalungstechnologie, der Überprüfung dieser Konzepte und in exemplarischen Ansätzen zum jeweiligen komplementären Verbindungspartner.

Schlagwörter: Verbindungstechnik, Klettverbindung, Langlebigkeit, Ressourceneffizienz, Flexibilität, Rückbau, Recycling, Schalungstechnologie, Wachs, Beton

¹ Vgl. Bahr/Lennerts 2010, 27–40.

² Vgl. Ebda., 51.

³ Vgl. Krüger 2013, 5.

⁴ Vgl. Kerz u.a. 2008, 8–11.

Abstract

The application of the hook-and-loop fastener, consisting of two complementary connecting partners or hook-and-loop components, at the constructive interface from primary structure (structural elements) to secondary structure (finish) and tertiary structure (technical building equipment) enables, in accordance with its functional principle, a composite of easily detachable and reconnectable short-lasting and long-lasting components and therefore easy maintenance as well as adaptability to new uses and requirements. This opens up great potential for increasing the lifespan of buildings and individual building components,⁵ while at the same time the functionality of the corresponding hook-and-loop component must be ensured beyond the lifespan of the individual structural element.

The research subject of relevant projects, patents and applications in the building industry are mainly retrospectively applied hook-and-loop components made of plastic materials. Generally, components made of plastic can be very weather-resistant, but due to the complex interactions in the building industry caused by changing humidity, temperature and UV exposure, they can age faster⁶. In addition, hook-and-loop components are usually attached to rigid surfaces by adhesive bonding,⁷ a connection method with a considerably shorter lifespan than that of the structural elements.⁸

In order to overcome this problem, this thesis proposes a change of material and a resulting manufacturing method for hook-and-loop components. With regard to the versatile mouldability of concrete as a building material, the research objective is the basic investigation and manufacturing of a concrete-hook-and-loop component, based on the application of Wax-Formwork technology and on the model of industrial hook-and-loop products. Applied to the building industry, in addition to the main functions of load-bearing, force transmission and forming a shell, concrete components could permanently provide a directly joinable fastening surface to a corresponding connecting partner without additional processing steps.

The research begins with the determination of the state of the art and a preparation of basic principles. This includes an analysis of the hook-and-loop fastener, fastening technology in concrete as well as Wax-Formwork technology. Based on these principles, three manufacturing concepts for the production of hook-and-loop concrete structures are developed and examined in a feasibility study based on manufacturing and hook-and-loop tests. The result of this thesis consists of geometry-specific as well as material-specific requirements for the production of hook-and-loop components in concrete, basic concepts for the production of “hook-and-loop-concrete” using Wax-Formwork technology, the examination of these concepts and exemplary approaches concerning the particular complementary connecting partner.

Keywords: fastening technology, hook and loop fasteners, durability, resource efficiency, flexibility, demolition, recycling, formwork, wax, concrete

⁵ Vgl. Bahr/Lennerts 2010, 27–40.

⁶ Vgl. Ebda., 51.

⁷ Vgl. Krüger 2013, 5.

⁸ Vgl. Kerz u.a. 2008, 8–11.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Potentiale der Klettverbindung.....	2
1.2	Problemstellung.....	3
1.3	Zielsetzung.....	4
1.4	Methodik und Vorgehensweise.....	5
1.4.1	Analyse.....	5
1.4.2	Konzeptentwicklung.....	5
1.4.3	Experiment.....	5
1.5	Begriffsdefinitionen.....	6
1.5.1	Klettverbindung.....	6
1.5.2	Klettkomponente.....	6
1.5.3	Klettelemente.....	6
1.5.4	Klettbeton.....	6
1.5.5	Klettfähigkeit.....	7
1.5.6	Kurz- und langlebige Bauteile.....	7
2	Stand der Technik.....	9
2.1	Klettverbindung.....	9
2.1.1	Klettprodukte im Bauwesen.....	11
2.1.2	Patente.....	14
2.1.3	Forschung.....	20
2.2	Beton.....	29
2.2.1	Bestandteile.....	29
2.2.2	Herstellung.....	31
2.2.3	Betonarten.....	31

3	Klettbeton	35
3.1	Grundlagen	35
3.1.1	Analyse der Klettverbindung.....	35
3.1.2	Analyse der Befestigungstechnik in Beton.....	54
3.1.3	Wachsschalungstechnologie	68
3.1.4	Zusammenfassung	73
3.2	Herstellungskonzepte.....	77
3.2.1	Hakenstruktur	77
3.2.2	Pilzkopfstruktur	89
3.2.3	Lochstruktur	100
4	Zusammenfassung und Ausblick.....	115
4.1	Zusammenfassung.....	115
4.1.1	Grundlagen.....	116
4.1.2	Herstellungskonzepte	117
4.2	Ausblick.....	120
4.2.1	Herstellungsprozess	120
4.2.2	Materialien	121
4.2.3	Verbindungspartner	121
5	Quellenverzeichnis.....	123
5.1	Literaturverzeichnis.....	123
5.2	Abbildungsverzeichnis	128
5.3	Tabellenverzeichnis	135
6	Anhang	137
A	Herstellungsversuche	
B	Klettversuche	

1 Einleitung

Der *Global Status Report: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector* der *International Energy Agency* dokumentiert jährlich den weltweit anfallenden Energieverbrauch und die Emissionen des Bausektors. Für das Jahr 2017 beziffert dieser Bericht das Bauwesen, die Herstellung von Baumaterialien und der Betrieb bestehender Bauwerke, mit 36 % globalen Endenergieverbrauchs und 39 % der energiebedingten CO₂-Emissionen. Der Transport von Baumaterialien, beispielsweise Rohstoff zur Produktionsstätte, Bauprodukte zum Händler oder Bauprodukte zur Baustelle, ist dem Verkehrssektor zugeordnet und nicht in diesen Werten enthalten.⁹ Betrachtet man zudem den jährlichen Anteil am globalen Ressourcenverbrauch, ist dieser laut dem Bericht *Assessing global resource use: A systems approach to resource efficiency and pollution reduction* des *International Resource Panel* mit 40 % anzunehmen. Der Verbrauch der Ressource Wasser ist gesondert mit 25 % des Gesamtvolumens angeführt.¹⁰

Infolge dieser Kennwerte und den Auswirkungen des fortschreitenden Klimawandels, zusammengefasst in den Sachstandsberichten des *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, als auch der im Jahr 2017 seitens der *UN Environment and International Energy Agency* prognostizierten Verdoppelung der Gebäudegrundflächen bis zum Jahr 2060¹¹, wird die Notwendigkeit der Reduzierung des Energie- und Ressourcenverbrauchs sowie des Treibhauspotentials im Bauwesen festgestellt.

Großes Potential besteht dahingehend in dauerhaften, langlebigen Gebäuden und der möglichst langfristigen Nutzung von Aufwänden im Hochbau. Der daraus folgende Anspruch an das Bauwerk und an einzelne Gebäudekomponenten besteht, neben einer entsprechenden Ausführungsqualität, in der Instandhaltungsfreundlichkeit, der Fähigkeit zur Anpassung an neue Nutzungen und zukünftige Anforderungen und damit in einem einfach zu trennenden und wiederherzustellenden Verbund von kurzlebigen und langlebigen Bauteilen¹².

Dieser Anspruch kann, wie im Rahmen des Sondierungsprojektes *Klett-TGA: Entwicklung von Klett-Befestigungssystemen für die Technische Gebäudeausrüstung* (FFG Projektnr.: 861664) festgestellt, durch eine Anwendung der Klettverbindung an der Schnittstelle von Primärstruktur (Rohbau) zu Sekundärstruktur (Ausbau) und Tertiärstruktur (technische Gebäudeausrüstung) erfüllt werden. Im Detail wurden durch das Forschungsteam des *Instituts für Architekturtechnologie* der *Technischen Universität Graz*, bestehend aus Roger Riewe, Ferdinand Oswald, Aleksandra Pavicevic, Ziga Kresevic und Matthias Raudaschl, nachfolgende Potentiale der Klettverbindung ermittelt,¹³ und in der vorliegenden Arbeit, hinsichtlich der einzelnen Gebäudephasen, konkretisiert.

⁹ Vgl. International Energy Agency and the United Nations Environment Programme 2018, 11.

¹⁰ Vgl. Bringezu u.a. 2017, 64.

¹¹ Vgl. International Energy Agency and the United Nations Environment Programme 2017, 13.

¹² Vgl. Bahr/Lennerts 2010, 24–43.

¹³ Vgl. Riewe u.a. 2019.

1.1 Potentiale der Klettverbindung

Anwendung der Klettverbindung in der Ausführungsphase:

- ermöglicht eine einfache, schnelle und flexible Montage unterschiedlicher Komponenten aus verschiedenen Materialien,¹⁴
- entsteht an der Bauteiloberfläche, es erfolgt keine Zerstörung von Bauteilen durch beispielsweise Stemm-, Schlitz-, oder Bohrarbeiten,¹⁵
- bietet eine hohe Flexibilität und einfache Anpassung an Änderungen während der Bauphase,¹⁶
- erfolgt ohne Gesundheitsbelastung durch Schmutz und Staub auf der Baustelle,¹⁷
- führt zu einer Zeit- und somit Kostenersparnis,¹⁸
- erfolgt sofort¹⁹ und benötigt beispielsweise keine Aushärtungszeit.

Anwendung der Klettverbindung in der Nutzungsphase:

- ermöglicht im Schadensfall oder bei Sanierungen den Austausch und Ersatz einzelner Gebäudekomponenten unter geringem Aufwand²⁰,
- ermöglicht einfache Anpassungen an funktionale, modische, baurechtliche, ökologische, ökonomische oder technische Änderungen,²¹
- bietet die häufige Wiederholung der Verbindung ohne Einbußen der Kraftübertragung an derselben Position.²²

Anwendung der Klettverbindung in der sogenannten Rückbauphase:

- bietet die einfache und schnelle Demontage einzelner Gebäudekomponenten und die Rückführung in den Materialkreislauf,²³
- ermöglicht eine Zeit- und somit Kostenersparnis.²⁴

¹⁴ Vgl. Krüger 2013, 4.

¹⁵ Vgl. Riewe u.a. 2019, 9.

¹⁶ Vgl. Ebda.

¹⁷ Vgl. Ebda., 16.

¹⁸ Vgl. Krüger 2013, 4.

¹⁹ Vgl. Ebda.

²⁰ Vgl. Ebda.

²¹ Vgl. Riewe u.a. 2019, 9.

²² Vgl. Krüger 2013, 4.

²³ Vgl. Riewe u.a. 2019, 9.

²⁴ Vgl. Krüger 2013, 4.

1.2 Problemstellung

Gegenstand themenbezogener Forschungen, Patente sowie Produkte im Hochbau ist vor allem die Anwendung industriell hergestellter Klettverbindungen, bestehend aus zwei auf Kunststoff basierenden Verbindungspartnern (siehe auch Kapitel *Stand der Technik*), in Form einer großflächigen Bereitstellung einer Klettkomponente auf dem Rohbau sowie dem Ausstatten der zu montierenden Baukomponente, oder des Montagemittels, mit dem Gegenstück²⁵.

Grundsätzlich können Bauteile aus Kunststoff sehr witterungsbeständig sein, aufgrund der komplexen Wechselwirkungen im Bauwesen, infolge wechselnder Feuchte-, Temperatur und UV-Belastungen, jedoch schneller altern.²⁶ Die Dauerhaftigkeit kann zudem je nach Verbund und Untergrund, beispielsweise durch Korrosion, Quellen der Kunststoffe, Auflösen des Materials oder infolge des Herauslösen von Zusatzstoffen, wie Weichmacher und Stabilisatoren, negativ beeinflusst werden.²⁷ Des Weiteren erfolgt das nachträgliche Aufbringen einer Klettkomponente auf formsteifen Untergründen in der Regel mittels Kleben und damit einer Verbindungsart,²⁸ die im Bauwesen mit einer maximalen Lebensdauer von 40-60 Jahren zu beziffern ist²⁹.

Das zuvor angeführte Potential der Anwendung der Klettverbindung an der Schnittstelle Primärstruktur (Rohbau) zu Sekundärstruktur (Ausbau) und Tertiärstruktur (technische Gebäudeausrüstung) erschließt sich für alle Gebäudephasen mit der Gewährleistung der Funktionalität der Klettkomponente über die gesamte Lebensdauer des jeweiligen Rohbauteiles hinweg. Wird ein kurzlebiges Bauteil, wie beispielsweise eine nicht tragende Innenwand ausgetauscht, muss dieser Vorgang ohne den zusätzlichen Austausch der rohbauseitig bestehenden Klettkomponente möglich sein. Diese Bedingung ist gegeben, wenn die Lebensdauer der Klettkomponente, wie auch die der Verbindung mit dem Rohbauuntergrund, der Lebensdauer des Rohbauteils entspricht. Je nach Rohbaumaterial und Bauteil kann laut dem Zusatz zum Leitfaden für Nachhaltiges Bauen *Nutzungsdauerangaben von ausgewählten Bauteilen und Bauteilschichten des Hochbaus* ein Kennwert zwischen 50-150 Jahren angenommen werden,³⁰ wobei der höhere Wert als maßgebend angesehen wird.

Eine weitere zu erwähnende Problematik der Anwendung industrieller Klettkomponenten, wie auch des Aufbringens mittels Kleben, zeigt sich beim Rückbau und Ablösen der Komponenten. Rückstände führen zu Verunreinigungen des Baustoffes und somit zu Nachteilen bei einer Wiederherstellung der Montagefläche, der Wiederverwendung sowie dem Recycling der jeweiligen Materialstoffe.

Daraus folgernd können industrielle Klettkomponenten aus Kunststoff bei kurzlebigen Bauteilen (Ausbau und technische Gebäudeausrüstung) angewandt werden, führen bei langlebigen Bauteilen (Rohbau) jedoch zu einer verringerten Potentialentfaltung dieses ansonsten vorteilhaften Verbindungssystems.

²⁵ Vgl. Riewe u.a. 2019, 68.

²⁶ Vgl. Bahr/Lennerts 2010, 51.

²⁷ Vgl. Sievers 2016, 1.

²⁸ Vgl. Krüger 2013, 5.

²⁹ Vgl. Kerz u.a. 2008, 9.

³⁰ Vgl. Ebda., 8–11.

1.3 Zielsetzung

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit besteht in der Einsparung von Energie, Emissionen und Ressourcen im Hochbau. Dieses Ziel soll durch möglichst dauerhafte Gebäude, infolge einer Anwendung der Klettverbindung an der Schnittstelle Primärstruktur (Rohbau) zu Sekundärstruktur (Ausbau) und Tertiärstruktur (technische Gebäudeausrüstung), mit den daraus folgenden Potentialen, bestehend in einem einfach zu trennenden und wiederherzustellenden Verbund kurzlebiger und langlebiger Bauteile und damit einer hohen Instandhaltungsfreundlichkeit sowie der Fähigkeit zur Anpassung an neue Nutzungen und Anforderungen, erreicht werden. Mit diesem Anspruch baut die Arbeit auf grundlegenden Erkenntnissen des Sondierungsprojektes *Klett-TGA: Entwicklung von Klett-Befestigungssystemen für die Technische Gebäudeausrüstung* (FFG Projektnr.: 861664) auf.

Zur Lösung der skizzierten Problematik des Verbundes kurzlebiger industrieller Klettkomponenten und einer langlebigen Primärstruktur, wird ein Materialwechsel sowie eine daraus resultierende Herstellungsmethode von Klettkomponenten vorgeschlagen. Unter dem Aspekt der vielfältigen Formbarkeit des Rohbaustoffes Beton besteht das Forschungsziel in der Untersuchung und Herstellung einer monolithischen Beton-Klettkomponente anhand des Vorbildes industrieller Klettprodukte in Form von Einhänge- und Schlaufenkomponenten. Dieser Forschungsansatz auf das Bauwesen angewandt, könnten Betonbauteile, neben den Hauptfunktionen des Tragens, Kraftleitens und der Bildung einer Hülle, einem entsprechenden Verbindungspartner, ohne zusätzliche Bearbeitungsschritte, dauerhaft als direkt verbindungs-fähiger Befestigungsuntergrund dienen.

Aus den verschiedenen Möglichkeiten der Formgebung von Beton, beispielsweise durch die Schalhaut, Betonzusatzmittel, nachträgliche Bearbeitung³¹ oder auch 3D-Betondruck, wurde die Technologie der Wachsschalung ausgewählt, da sie die Herstellung komplexer, freigeformter Bauteile bei hoher Genauigkeit,³² sowie gleichzeitig eine entsprechende Entformbarkeit³³ ohne Beschädigung der Betonstruktur bietet. Zudem ermöglicht die Methodik des Schalens eine Anwendung bei unterschiedlichen Bauteilgeometrien und -abmessungen sowie Betonmischungen und eine daraus folgende Möglichkeit diesbezüglicher Optimierungen in weiterführenden Forschungen, anhand beispielsweise dem Einsatz neuer Technologien oder der Beimengung verschiedener Zusatzstoffe, Zusatzmittel oder Verbundmaterialien.

Unter dem Aspekt der vielfältigen Formbarkeit des Rohbaustoffes Beton infolge einer Anwendung der Wachsschalungstechnologie, besteht das primäre Forschungsziel somit in der grundlegenden Untersuchung und Herstellung monolithischer Klettkomponenten aus Beton infolge einer Nachbildung industrieller Klettprodukte. Dieser als anwendungsorientierte Grundlagenforschung definierten Arbeit liegt nachfolgende Forschungsfrage zugrunde:

Ist es infolge der Anwendung entsprechend geformter Wachskörper möglich, aus Beton eine Struktur herzustellen, welche eine Klettfähigkeit hinsichtlich der Funktionalität als Klettkomponente erfüllt?

³¹ Vgl. Peck u.a. 2013, 54–62.

³² Vgl. Mainka u.a. 2016, 792.

³³ Vgl. Mainka 2019, 140–145.

1.4 Methodik und Vorgehensweise

Diese Arbeit gliedert sich in die Kapitel Einleitung, Stand der Technik, Klettbeton sowie Zusammenfassung und Ausblick. Die *Einleitung* bietet eine Darstellung des Forschungsansatzes und der Forschungsfrage anhand von Problemstellung, Zielsetzung, Methodik sowie einer Begriffsdefinition. Darauf folgt der *Stand der Technik* als Sicherstellung, dass die zu erforschende Thematik noch nicht erforscht wurde. Den Kern dieser Arbeit bildet das Kapitel *Klettbeton*. Es umschließt eine Aufbereitung entsprechender *Grundlagen* anhand einer Analyse der Klettverbindung, der Befestigungstechnik in Beton und der Wachsschalungstechnologie mit dem Ziel eines grundlegenden Verständnisses zur Nachbildung der Klettverbindung in Beton, sowie aus den Grundlagen resultierende *Herstellungskonzepte* klettfähiger Betonstrukturen als auch deren Verifizierung oder Falsifizierung infolge einer Machbarkeitsstudie anhand von Herstellungs- und Klettversuchen. Die dementsprechenden Arbeitsschritte werden nachfolgend kurz erläutert.

1.4.1 Analyse

Anhand themenrelevanter Forschungen, Veröffentlichungen und der Untersuchung von Produkten erfolgt eine Analyse der Klettverbindung, der Befestigungstechnik in Beton sowie der Wachsschalungstechnologie. Das umschließt das Funktionsprinzip und Tragverhalten der Klettverbindung, das Belastungsverhalten des Baustoffes Beton als auch eine Feststellung der Anwendbarkeit der Wachsschalungstechnologie hinsichtlich des Forschungsziels.

1.4.2 Konzeptentwicklung

Die Konzeptentwicklung zur Herstellung verbindungsfähiger, klettfähiger Betonstrukturen anhand der Wachsschalungstechnologie resultiert aus der Analyse und erfolgt durch architektonische Entwurfstechniken. Die Konzepte entsprechen jeweils einer Einhänge- oder Schlaufenkomponente und umschließen die jeweiligen Wachskörper, die resultierenden Betonkörper, das angenommene Belastungsverhalten der Klettelemente der Struktur und die Verbindungspartner.

1.4.3 Experiment

Eine abschließende Verifizierung oder Falsifizierung der Konzepte erfolgt im Rahmen einer Machbarkeitsstudie anhand von Herstellungsversuchen sowie, je nach Versuchsergebnis, infolge einer qualitativen Feststellung der Klettfähigkeit anhand händischer Klettversuche mit einem entsprechenden, nicht aktivier- und deaktivierbaren Verbindungspartner in Form einer Versuchsschlaufenkomponente. Eine Beschreibung der jeweiligen Versuchsaufbauten und -durchführungen befindet sich im Anhang.

1.5 Begriffsdefinitionen

1.5.1 Klettverbindung

Eine Klettverbindung, oder Klettsystem, besteht aus zwei Verbindungspartnern oder Klettkomponenten, die sich aufgrund der geometrischen und materialspezifischen Eigenschaften und der hohen Anzahl an komplementären Verbindungselementen und somit möglichen Verbindungspunkten miteinander verbinden. Die Verbindung wird durch ein Aufeinanderpressen der Klettkomponenten, in Form von Einhänge- und Schlaufenkomponenten, gebildet, beruht auf dem Zufallsprinzip und wirkt durch einen Form- und Kraftschluss.³⁴

1.5.2 Klettkomponente

Jede Klettkomponente besteht aus einem Grund oder einer Basisfläche und einer Vielzahl darauf gebundener Klett- oder Verbindungselemente. Der Grund und die Klettelemente können unterschiedliche materialspezifische Eigenschaften besitzen. Klettkomponenten werden anhand der Geometrie ihrer Verbindungselemente eingeteilt. Einhängekomponenten besitzen Haken- oder Pilzkopfelemente, Schlaufenkomponenten Loch-, Schlingen- oder Schlaufenelemente.³⁵

1.5.3 Klettelemente

Eine Klettkomponente besitzt eine Vielzahl an Klett- oder Verbindungselementen. Übliche geometrische Formen sind wie zuvor erwähnt, Haken, Pilzkopf, Loch, Schlinge oder Schlaufe. Während der Grund oder die Basisfläche der Klettkomponente die einzelnen Klettelemente bindet, bilden die Klettelemente infolge ihrer komplementären geometrischen Form die eigentliche Klettverbindung anhand einzelner Verbindungspunkte.³⁶

1.5.4 Klettbeton

In der Herstellung von Klettbeton, oder einer klettfähigen Betonstruktur, besteht das Forschungsziel dieser Arbeit. Klettbeton wird als materialreiner, monolithischer und somit biegesteifer Betonkörper definiert, der aufgrund der geometrischen Ausbildung einzelner Verbindungselemente, eine verbindungsfähige, klettfähige Struktur oder Oberfläche aufweist. Die Verbindungselemente sind herkömmlichen industriellen Klettelementen nachempfunden, besitzen eine Haken-, Pilzkopf- oder Lochgeometrie und bieten dadurch eine Klettfähigkeit, die Fähigkeit mit einer komplementären, vergleichsweise herkömmlichen Klettkomponente, einem Verbindungspartner, eine Verbindung einzugehen.

³⁴ Vgl. Krüger 2013, 9–10.

³⁵ Vgl. Ebda.

³⁶ Vgl. Ebda.

1.5.5 Klettfähigkeit

Klettfähigkeit wird als die Fähigkeit einer Struktur oder einer Bauteilfläche definiert, mit einer, mit herkömmlichen Klettkomponenten vergleichbaren Komponente (mit einer Vielzahl an, in der Regel, nicht steuerbaren Klettelementen in Haken-, Pilzkopf-, Loch-, Schlingen- oder Schlaufenform), einem Verbindungspartner, eine Verbindung einzugehen. Diese Eigenschaft lässt auf das Potential zur Anwendung als Klettkomponente schließen.

1.5.6 Kurz- und langlebige Bauteile

Als langlebige Bauteile werden in dieser Arbeit die Bestandteile der Primärstruktur von Gebäuden mit einer Lebensdauer, abhängig von Rohbaumaterial und Bauteil, von 50-150 Jahren definiert. Das sind beispielsweise Wände (Beton 80-150 a, Holz massiv 80-150 a, Hochlochziegel 50-150 a) und Decken (Beton 80-150 a, Ziegel 80-150 a, Holz massiv 80-150 a).³⁷ Als maßgebend ist jeweils Beton und der höhere Wert anzunehmen.

Als kurzlebige Bauteile werden die an die Primärstruktur anschließenden Komponenten der Sekundärstruktur (Ausbau) und Tertiärstruktur (technische Gebäudeausrüstung) definiert, die infolge funktionaler, modischer, baurechtlicher, ökologischer, ökonomischer oder technischer Änderungen oder Anpassungen ausgetauscht werden. Das umschließt beispielsweise Wand- und Deckenbildner (z.B. nicht tragende Wand als Ständersystem mit Gipskartonbeplankung 30-60 a, Deckenbekleidungen aus Holz 60-80 a oder Gipskarton 30-60 a, Lichtdecken 15-30 a, Wandbekleidungs-systeme aus einem Holzwerkstoff 25-40 a)³⁸ und die Verteilung der technischen Gebäudeausrüstung (z.B. Heizleitungen 30-50 a, Luftkanäle 30-40 a, sanitärtechnische Rohrleitungen 15-35 a, kältetechnische Rohrleitungen 15-35 a, brandschutztechnische Rohrleitungen 20-40 a)³⁹

³⁷ Vgl. Kerz u.a. 2008, 8–11.

³⁸ Vgl. Ebda., 72–78.

³⁹ Vgl. Ebda., 115–133.

2 Stand der Technik

Die Darstellung des Standes der Technik und Sicherstellung, dass die zu erforschende Thematik noch nicht erforscht wurde, erfolgt anhand für das Forschungsziel relevanter Bauprodukte mit beispielsweise aufkaschierten Klett Komponenten, Patente die Klett-Anwendung am Bau oder die Verbindungsart betreffend sowie themenbezogener Forschungsprojekte. Da diese Arbeit nicht auf eine Optimierung der Betonzusammensetzung abzielt, werden dieses Kapitel ergänzend nur Grundlagen der Betontechnologie dargestellt. Eine Untersuchung der Befestigungstechnik in Beton wie auch der Wachsschalungstechnologie befindet sich im nachfolgenden Kapitel *Grundlagen*.

2.1 Klettverbindung

Das Vorbild der Klettverbindung stammt aus der Natur und entspricht der kugelförmigen Frucht der Klettpflanze *Arctium lappa* (siehe nachfolgende Abbildung), bestehend aus stachelartigen Widerhaken, angeordnet auf einem Kern aus Hüllblättern.⁴⁰ In der Tierwelt nutzt die Baumameise *Azteca andreae* hakenförmige Klauen, um sich während der Jagd an der flauchigen Unterseite von Blättern festzuhalten,⁴¹ wie auch Libellen ineinandergreifende Mikrozapfen, Mikroplatten oder Mikrokegel, um den Kopf stärker mit dem Hinterleib zu verbinden und im Falle besonderer Belastungen zu fixieren.⁴²

Der Erfinder der Klettverbindung als industrielles Produkt ist der Schweizer Georges De Mestral. Im Laufe eines Spaziergangs wurde er auf das Verhaken der Frucht der Klettpflanze in flauchigen Oberflächen aufmerksam und leitete daraus die heutige Klettverbindung ab.⁴³ Diese Verbindung meldete er 1957 unter dem Titel *Separable fastening device*⁴⁴ als Patent an und besaß die Patentrechte bis 1978⁴⁵.

Die Klettverbindung wird bis heute unter anderem unter dem Namen *Velcro*[®] verkauft. Dieser Begriff leitet sich aus dem französischen *velours* und *crochet* ab und weist auf die zwei Verbindungskomponenten (oder Klettelemente) *Schlaufe* und *Haken* hin.⁴⁶ Eine Klettverbindung, oder ein Klettsystem, besteht aus zwei Komponenten und wird durch beispielsweise eine Einhängekomponente mit Haken oder Pilzköpfen und eine Schlaufenkomponente mit Schlingen oder Schlaufen, oder auch durch zwei verbindungsfähige Einhängekomponenten, mit Haken oder Pilzköpfen, gebildet. Auf dem Markt erhältliche Hakenkomponenten können demnach ein Klettsystem mit den Schlaufenprodukten *Flausch* oder *Velour* als auch mit entsprechenden Haken-Klettprodukten bilden, Pilzkopfkomponenten mit den Schlaufenprodukten *Flausch* oder *Velour* als auch mit entsprechenden Pilzkopf-Klettprodukten.⁴⁷

⁴⁰ Vgl. Krüger 2013, 2.

⁴¹ Vgl. Dejean u.a. 2010, 1–2.

⁴² Vgl. Gorb 1999, 529.

⁴³ Vgl. Krüger 2013, 2.

⁴⁴ Vgl. Mestral 1961.

⁴⁵ Vgl. o. A., Separable fastening device, US3009235A 1978,
<https://patents.google.com/patent/US3009235A/en?q=US3009235A>, 10.02.2020.

⁴⁶ Vgl. Sievers 2016, 3.

⁴⁷ Vgl. Krüger 2013, 4–9.



Abb. 1: Fotografie der Frucht der Klettpflanze *Arctium lappa*, Pixabay

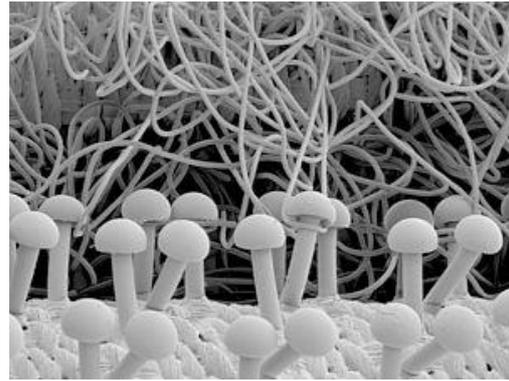


Abb. 2: Klettverbindung bestehend aus den Klettelementen Pilzkopf und Schlaufe, Gottlieb Binder GmbH & Co KG

Die Vielfalt an auf dem Markt erhältlichen Produkten und Klettsystemen ermöglicht eine Anwendung als Verbindungsmittel in unterschiedlichen Branchen, mit beispielsweise folgenden Einsatzgebieten:

- Textilien (Verschlüsse bei Arbeitsbekleidungen, Taschen, Schuhen, Teppichböden, Rucksäcken, Textilbezügen, usw.)⁴⁸
- Werkzeuge (Befestigung Schleifpapier auf Schleifmaschinen)⁴⁹
- Automobilbau, Flugzeugbau und Schienenfahrzeuge (Befestigung von Innenausstattung, Teppichen, Polsterungen)⁵⁰
- Messebau (Befestigung von Informationstafeln)⁵¹
- Verpackungen (Verschlüsse bei Beutel, Kartonverpackungen, usw.)⁵²
- Raumfahrt, Feuerwehr (Werkzeughalterung, Verschlüsse von Schutzanzügen,⁵³ Befestigung der Verkleidung bei Space Shuttles⁵⁴)
- Medizin (Verbund von Kompressionsverbänden)⁵⁵

In weiterer Folge werden ausgewählte Anwendungen der Klettverbindung im Bauwesen im Detail angeführt und hinsichtlich der Forschungsziele untersucht.

⁴⁸ Vgl. Krüger 2013, 134.

⁴⁹ Vgl. Ebda.

⁵⁰ Vgl. Ebda., 140.

⁵¹ Vgl. Ebda., 134.

⁵² Vgl. Ebda., 143–145.

⁵³ Vgl. Ebda., 3.

⁵⁴ Vgl. Grinfeld/Segletes 2010, 7.

⁵⁵ Vgl. Caprini 2017, 1.

2.1.1 Klettprodukte im Bauwesen

2.1.1.1 WDVS Fassade: StoSystain R

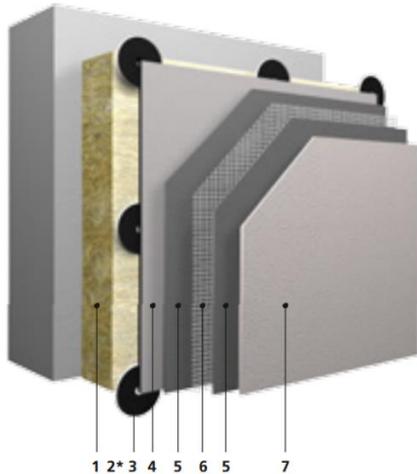


Abb. 3: Bestandteile des Fassadensystems StoSystain R, Sto Ges.m.b.H
 1) Dämmung
 2) Befestigung (nicht dargestellt)
 3) Befestigungselement, mehrteilig
 4) Trägerplatte
 5) Unterputz
 6) Bewehrung/Armierung
 7) Schlussbeschichtung

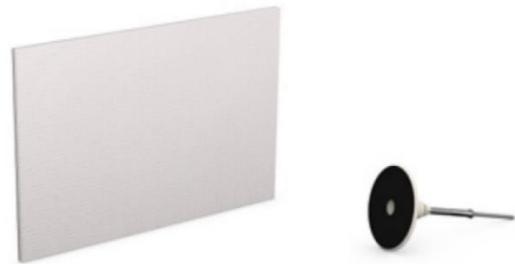


Abb. 4: Putzträgerplatte mit rückseitiger Schlaufenbeschichtung (4, li) und justierbares Befestigungselement mit Pilzkopfkomponente (3, re), Sto Ges.m.b.H

Die Klettfassade *StoSystain R* ist eine Weiterentwicklung des Wärmedämmverbundsystems und wurde in Folge einer Kooperation zwischen dem *Institut für Architekturtechnologie der Technischen Universität Graz*, der Firma *Sto Ges.m.b.H* und mit Unterstützung von *Gottlieb Binder GmbH & Co KG* entwickelt. Der Einsatz der Klettverbindung als Befestigungsmittel zwischen Steldübel und Putzträgerplatte ermöglicht eine klebefreie Erstmontage, eine spätere sortenreine Trennung dieser Komponenten sowie eine Wiederverwendung oder Wiederverwertung.⁵⁶

Die Fassade nutzt Klett als flexibles und, die Lebensdauer der Fassadenkomponenten betreffend, dauerhaftes Befestigungsmittel. Der Anspruch der Flexibilität und der einfachen Trennung der Komponenten entspricht dem übergeordneten Forschungsziel dieser Arbeit. Abweichend zeigt sich die Anwendung von Klettkomponenten aus Kunststoff sowie der Einsatz der Verbindung zwischen kurzlebigen Baukomponenten.

⁵⁶ Vgl. Sto Ges.m.b.H, *StoSystain R: Kletten statt kleben!* 2017, https://www.sto.at/media/documents/download_broschuere/kategorie_fassade/sto_systain_folder-Ansicht-Neu.pdf, 16.05.2020.

2.1.1.2 Fußbodenheizung: Klett Nassbausystem



Abb. 5: Klett Nassbausystem, Uponor GmbH

Das Fußbodenheizsystem der Firma *Uponor GmbH* nutzt Klett zur temporären Befestigung von Heiz- oder Kühlleitungen, mit dem Vorteil eines schnellen und einfachen Montageablaufs. Der Befestigungsuntergrund wird durch eine klettfähige (Schlaufen-)Folie mit oder ohne Dämmschicht bereitgestellt. Die spiralförmig mit einem Hakenklettband umwickelten Leitungen werden durch Anpressen auf dem Befestigungsuntergrund verlegt.⁵⁷ Der anschließend aufzubringende Estrich formt die dauerhafte Befestigung.

Weitere Anwendungen der Klettverbindung als temporäre Montagehilfe finden sich bei der Klimamembran *Vario XtraSafe* der Firma *Saint-Gobain ISOVER Austria GmbH*⁵⁸ sowie der Dachabdichtungsbahn *Rhepanol HFK* der Firma *FDT FlachdachTechnologie GmbH & Co. KG*.⁵⁹ Diese Produkte werden aufgrund der dem Forschungsziel widersprechenden Anwendung als temporäres Befestigungsmittel nicht näher ausgeführt.

⁵⁷ Vgl. Uponor GmbH, Fußbodenheizung und –kühlung,
<https://www.uponor.at/produkte/fussbodenheizung-und-kuehlung/klett-nassbausystem>,
09.10.2019.

⁵⁸ Vgl. Saint-Gobain ISOVER Austria GmbH, Vario® XtraSafe Klimamembran - Schutz vor Feuchteschäden,
<https://www.isover.at/products/varior-xtrasafe-klimamembran>, 09.10.2019.

⁵⁹ Vgl. FDT FlachdachTechnologie GmbH & Co. KG, Rhepanol hfk, die Dachbahn für jede Verlegeart,
<https://www.fdt.de/produkte/rhepanol-dachbahnsystem/rhepanol-hfk-dachbahnen>, 09.10.2019.

2.1.1.3 Zwischenwandsystem: Gecco-Wall



Abb. 6: *Aufbau der Gecco-Wall, Video Screenshot, Werner 2018*

Das Zwischenwandsystem *Gecco-Wall* von Jan Werner entspricht der Erfindung einer Innenausbauwand, die schnell und ohne wesentliche Eingriffe in das bestehende Gebäude aufgebaut werden kann. Die Tragstruktur wird aus vertikalen Stützen gebildet, die mittels Spreizdruck zwischen Decke und Fußboden verspannt werden. Als Beplankung fungieren Innenausbauplatten, sowie je nach Einbausituation erforderlich, Zusatzelemente. Als Verbindung zwischen den Stützen und den Ausbauplatten dienen industrielle Klettprodukte und ermöglichen eine, dem Ansatz des Systems entsprechende, einfache und schnelle Montage.⁶⁰

Die thematischen Überschneidungen dieser Erfindung zum Ziel der vorliegenden Arbeit entsprechen der vorangehenden Klettfassade *StoSystem R* und bestehen in der Anwendung der Klettverbindung als flexibles, die Lebensdauer der Wand betreffend, dauerhaftes Befestigungsmittel. Abweichend ist die Anwendung von Klettprodukten aus Kunststoff sowie der Einsatz zwischen kurzlebigen Baukomponenten.

⁶⁰ Vgl. Werner, *gecco-Wall* 2018, <https://vimeo.com/272317398>, 27.02.2020.

2.1.2 Patente

Nachfolgende für das Forschungsziel relevante Patente wurden im Rahmen des Sondierungsprojekt *Klett-TGA* recherchiert, in dieser Arbeit neu aufbereitet und um weitere Patentschriften ergänzt. Zudem konnte hinsichtlich des Ziels der vorliegenden Arbeit förderliches Wissen aufgebaut, thematische Überschneidungen und Ergänzungen festgestellt, sowie weiterführende Forschungsansätze abgeleitet werden.

2.1.2.1 Fastening with wide fastening membrane - US20030070391A1

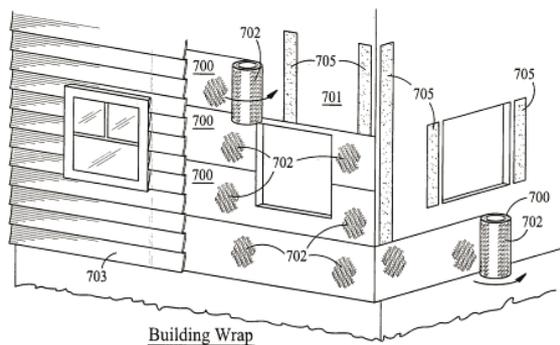


Abb. 7: Fastening membrane as a protective exterior structural wrap, Tachauer u.a. 2000
700 membrane with loop-engageable hooks
701 building
702 loop-engageable hooks
703 wall defining members
705 loop strips

Das Patent der Erfinder Ernesto Tachauer, Ronald Provencher, Shawn Banker und George Provost aus dem Jahr 2000 beschreibt ein Verfahren, um beispielsweise Dächer, Wände, Böden und Decken kontinuierlich mit einer Befestigungsmembran (700) auszustatten. Diese Membran mit beidseitig angeordneten Hakenelementen (702) wird mit, zuvor mittels Klammern oder Kleben befestigten, Schlaufenstreifen (705) verbunden und dient als Montageuntergrund für mit Schlaufenelementen ausgestattete Baukomponenten wie beispielsweise Dachdeckungen, Fassadenverkleidungen (703), Dämmungen, Bodenbeläge und Wandverkleidungen.⁶¹

Das Patent versteht Klett als primäres, kontinuierliches Befestigungsmittel zwischen kurzlebigen und langlebigen Bauteilen und entspricht darin dem übergeordneten Ziel und Anspruch der vorliegenden Arbeit. Abweichungen zeigen sich infolge der nachträglichen Befestigung einer kurzlebigen Klettmembran aus thermoplastischem Harz,⁶² mit den daraus folgenden Nachteilen in der Anwendung an der Primärstruktur (siehe Kapitel *Problemstellung*).

⁶¹ Vgl. Tachauer u.a. 2000.

⁶² Vgl. Ebda.

2.1.2.2 Klettsystem in oder an einem Gebäude - DE202012003999U1

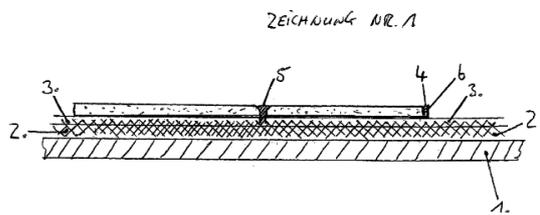


Abb. 8: Klettsystem, Schaumburg 2012

- 1 Untergrund
- 2 Klettband-Unterseite
- 3 Klettband-Oberseite
- 4 Klettprofilfuge
- 5 Klettprofil
- 6 Abschlussprofil

Das Patent von Andreas Schaumburg aus dem Jahr 2012 ähnelt dem vorangehenden Patent und schlägt vor, mittels Klettverbindung (2, 3) Beläge wie Fliesen, PVC, Paneele, Teppiche oder Laminat an einer Wand, an einem Boden (1) oder an einer Decke zu befestigen, wobei entsprechende Fugen mittels *Klettifugensystem* (4, 5, 6) ausgebildet sind. Die jeweiligen Klettcomponenten (2, 3) werden auf den Untergrund (1) sowie auf den zu montierenden Belag geklebt.⁶³ Der Vergleich mit dem Forschungsziel der vorliegenden Arbeit entspricht dem vorangehenden Patent.

2.1.2.3 Innovatives System zur Befestigung von Anbauten an Betonteilen - DE202016005858U1

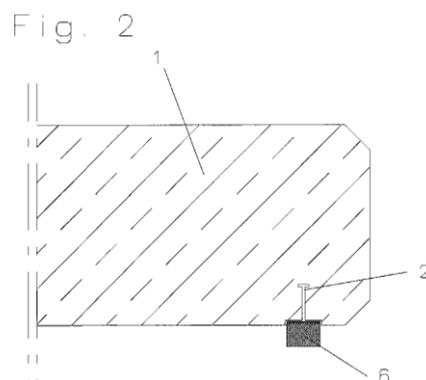


Abb. 9: Befestigungssystem, BETONWERK SCHUSTER GmbH 2016

- 1 Betonbauteil
- 2 Einbaueinheit
- 6 Anbauteil

⁶³ Vgl. Schaumburg 2012.

Das Patent der *BETONWERK SCHUSTER GmbH* aus dem Jahr 2016 beschreibt eine Ausführungsvariante, im Zuge der Herstellung eines Betonbauteiles (1) eine mit Klett bestückte Einbaueinheit in Form eines Betonankers (2) in die Schalung einzulegen und dadurch mit dem eingebrachten Beton zu verbinden. Die Einbaueinheit (2) besteht aus Kunststoff oder Metall, das zu montierende Anbauteil (6) kann beispielsweise einen Gleitstreifen, ein Schalldichtband sowie einen Lager- oder Kompressionsstreifen darstellen.⁶⁴

Das Patent beschreibt einen Eingriff in die Herstellung eines Betonbauteils durch das Einlegen eines Elements in die Schalung und entspricht damit grundsätzlich dem in dieser Arbeit untersuchten Herstellungsprinzip klettfähiger Betonstrukturen. Abweichungen betreffen die Schalungstechnologie, die Materialität der Einlegeteile (Einbaueinheit) und der Klettkomponente, sowie die punktuelle oder streifenförmige Anwendung.

2.1.2.4 Mounting object provided with a metallic heat-resistant two-dimensional fastener - US5429875A

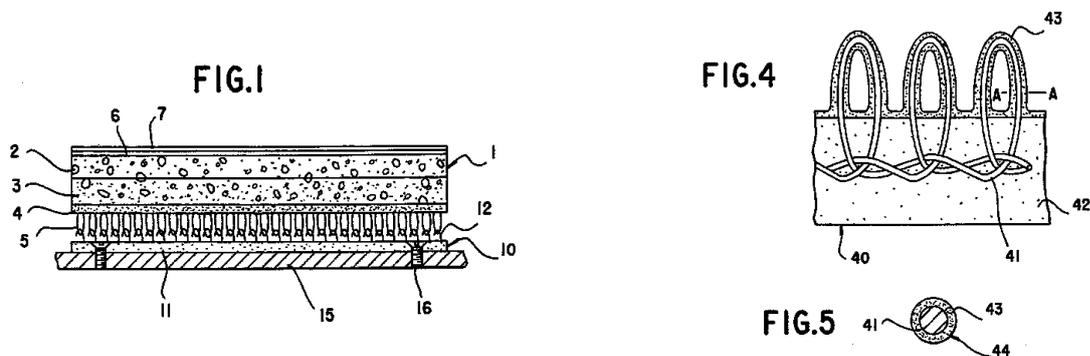


Abb. 10: Heat-resistant mounting object mounted on a structural body (Fig. 1), Heat-resistant mounting object (Fig. 4), Section A-A (Fig.5), Okamoto/Nakaya 1995

- 1 heat-resistant plate
- 2 ceramics layer
- 3 composite layer
- 4 metallic layer
- 5 fastener elements
- 6 temperature displaying upper chemicals
- 7 high temperature upper chemicals
- 10 base object
- 11 metallic powder sintered object
- 12 loop-like fastener elements
- 15 body base
- 16 bolts
- 41 metallic wire material
- 42 ceramics powder
- 43 film layer
- 44 composite wire material

⁶⁴ Vgl. *BETONWERK SCHUSTER GmbH* 2016.

Das Patent von Osamu Okamoto und Teruomi Nakaya aus dem Jahr 1995 beschreibt einen hitzebeständigen Befestigungsgegenstand (1) in Form einer Fliese, Platte oder ähnlichem, welcher mit metallischen und hitzebeständigen Befestigungselementen (5) versehen, lösbar auf einer Befestigungsfläche (10) befestigt werden kann. Der Vorteil dieser Erfindung besteht in der Möglichkeit der Aufnahme thermischer Dehnungen und Vibrationen ohne das Auftreten von Rissen oder einem Abblättern der hitzebeständigen Schichten (6, 7). Die Befestigungskomponente kann durch verschiedene Verfahren, beispielsweise durch das Versintern von Metalldraht (41) mit Keramikpulver (42) und einem Kohlenstoffharz (43), hergestellt werden. Die Erfindung ist dazu gedacht Schutzplatten an der Außenseite eines Space-Shuttles zu befestigen.⁶⁵

Die Integration einer Schlaufenkomponente in die Herstellung eines Elementes (siehe vorangehende Abbildung, Figur 4) zeigt Ähnlichkeiten zum vorangehenden Patent und dem Forschungsansatz der vorliegenden Arbeit. Die angewandte Methodik wie auch die Materialien und der somit resultierende Verbundwerkstoff weichen von dem Forschungsziel ab.

Der Aspekt der Beständigkeit gegen Dehnungen, Vibrationen und vor allem gegen Hitze stellen hinsichtlich einer Anwendung im Hochbau, wie auch die Anwendung einer metallischen Schlaufenkomponente für einen „materialreinen“ Einsatz in Stahlbeton, einen interessanten Aspekt sowie möglichen Untersuchungsgegenstand weiterführender Forschungen dar.

2.1.2.5 Releasable fastening system based on ionic polymer metal composites and method of use - US20040074070A1

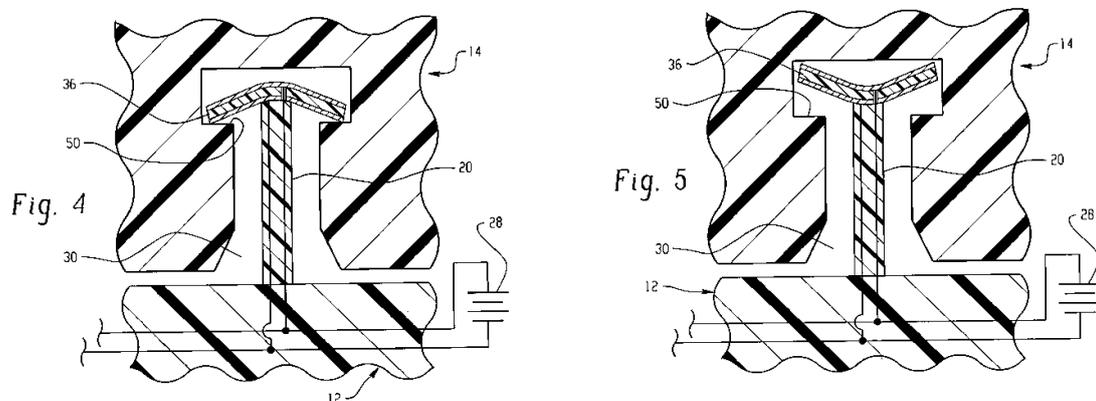


Abb. 11: Releasable fastening system enabled (Fig. 4) and disabled (Fig. 5), Momoda u.a. 2002

- 12 knob portion
- 14 cavity portion
- 20 knobs
- 28 power source
- 30 cavity
- 36 IPMC element
- 50 lip surface

⁶⁵ Vgl. Okamoto/Nakaya 1995.

Das Patent der Erfinder Leslie Momoda, Alan Browne, Nancy Johnson, William Barvosa-Carter und Thomas Stanford aus dem Jahr 2002 beschreibt ein lösbares Befestigungssystem, bestehend aus Knopfabschnitt (12), Knopfelement (20), Hohlraumabschnitt (14) sowie Hohlraum (30). Ein ionischer Polymer-Metall-Verbundwerkstoff (36) sorgt bei elektrischer Aktivierung für eine Formveränderung und eine gesteigerte Verbundwirkung. Die Grundkörper (12, 14) können starr und biegefest aus Kunststoff ausgeführt werden. Gegenstand der Erfindung wie auch der Patentansprüche ist die aktivierbare Komponente, nicht der biegebeste Verbindungspartner.⁶⁶

Nachfolgend abgebildetes Patent *Reversible Befestigungsmechanismen* mit der Patentnummer DE112007002135T5⁶⁷ aus dem Jahr 2007, wie auch das Patent *Electroactive polymer releasable fastening system and method of use* mit der Patentnummer US20040074069A1⁶⁸ aus dem Jahr 2004 folgen demselben Prinzip und werden daher nicht näher beschrieben.

Diese drei Erfindungen beschreiben dem Forschungsziel der vorliegenden Arbeit entsprechend eine Klettverbindung mit biegesteifen Schlaufen- oder Lochelementen. Der Verbindungspartner dieser biegesteifen Komponenten wird mit aktivierbaren, komplementären und flexiblen Einhängeelementen angedacht. Abweichungen zur vorliegenden Arbeit bestehen in der Materialität der jeweiligen Klettkomponenten, wie auch im Gegenstand und Fokus dieser Patente und Patentansprüche, welcher auf der aktivierbaren Einhängekomponente liegt. Dementsprechend stellen die Patente für diese Arbeit eine wesentliche konzeptuelle Ergänzung dar. Die steuerbaren Komponenten könnten einer Klettbetonstruktur als Verbindungspartner dienen. Da eine Erforschung und Entwicklung eines solchen Verbindungspartners den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, besteht dieser Ansatz als Untersuchungsgegenstand für weiterführende Forschungen.

⁶⁶ Vgl. Momoda u.a. 2002.

⁶⁷ Vgl. Barvosa-Carter u.a. 2007.

⁶⁸ Vgl. Browne u.a. 2004.

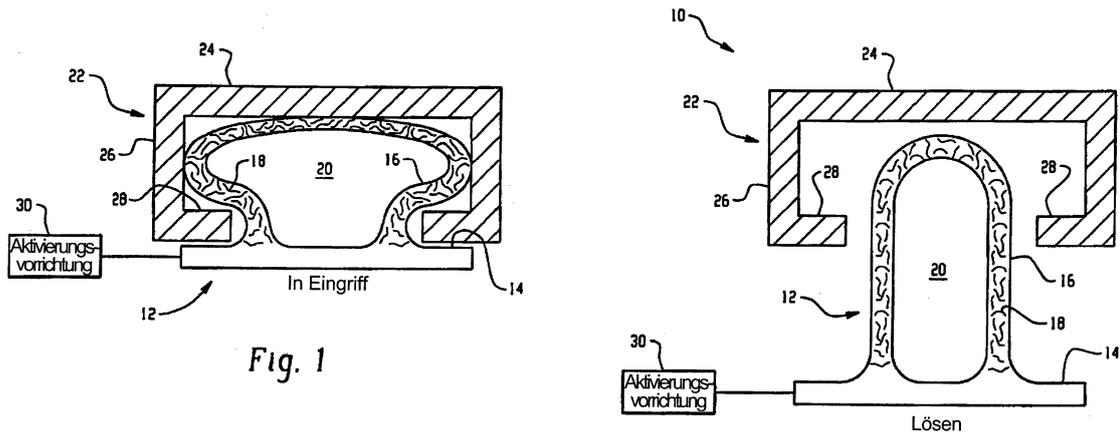


Fig. 1

Abb. 12: Befestigungssystem in Eingriff und außer Eingriff, Barvosa-Carter u.a. 2007

- 10 Knopf und Hohlraum-Befestigungselementsystem
- 12 Knopfabschnitt
- 14 Fläche
- 16 „intelligenter“ Vorsprung
- 18 Fasern/Plättchen innerhalb einer Polymermatrix
- 20 Innenraum
- 22 Hohlraumabschnitt
- 24 Grundwand
- 26 Seitenwände
- 28 Rückhaltewand
- 30 Aktivierungsvorrichtung

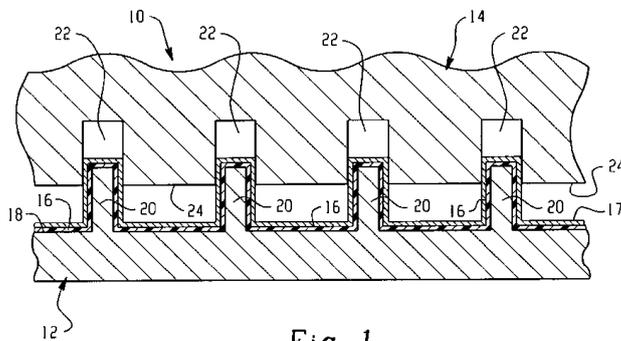


Fig. 1

Abb. 13: Cross-sectional view of an electrolytically activatable

- releasable fastening system, Browne u.a. 2004
- 10 system
- 12 connecting block
- 14 receiving block
- 16 polymer film
- 17 electrolyte
- 18 engagement surface
- 20 posts
- 22 cavities
- 24 engagement surface

2.1.3 Forschung

2.1.3.1 Klett-TGA: Entwicklung von Klett-Befestigungssystemen für die Technische Gebäudeausrüstung

Auf das bereits beschriebene und gemeinsam mit den Firmen *Sto Ges.m.b.H* und *Gottlieb Binder GmbH & Co KG* entwickelte Fassadenprodukt *StoSystain R*, folgte das durch die *Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG)* geförderte und im Jahr 2018 seitens des *Instituts für Architekturtechnologie* der *Technischen Universität Graz* und durch Roger Riewe, Ferdinand Oswald, Aleksandra Pavicevic, Ziga Kresevic und Matthias Raudaschl durchgeführte Sondierungsprojekt *Klett-TGA*. Dieses Projekt bildet den Ursprung der vorliegenden Arbeit in Form von grundlegenden Erkenntnissen zur Anwendung der Klettverbindung an der Schnittstelle zwischen Primärstruktur (Rohbau) und Tertiärstruktur (technische Gebäudeausrüstung).

Das Forschungsziel von *Klett-TGA* bestand dem Namen entsprechend in der Sondierung der Klett-Montage technischer Gebäudeausrüstung auf Rohbauteilen. Mit diesem Ziel konnten 143 Konzepte zur Anwendung der Verbindung bei unterschiedlichen Bauteilen und Materialien entwickelt und analysiert werden. Als grundlegende Erkenntnis wurde festgestellt, dass vor allem in Zonen mit einem hohen Installationsgrad, rohbauseitig eine durchgängige und somit flexibel nutzbare Klettfläche, vorzugsweise Schlaufenfläche, bereitzustellen ist. Aus dem Zeitpunkt der Herstellung dieser Fläche resultieren unterschiedliche Herangehensweisen. Eine Verbindung beispielsweise eines Betonbauteils mit einer Schlaufenkomponente während der Herstellung, kann durch das Einlegen industriell hergestellter Velours- oder Flauschmatten in die Schalung erzeugt werden. Ein im Rahmen des Sondierungsprojektes und diesem Verfahren entsprechend hergestellter Versuchskörper ist nachfolgend abgebildet.⁶⁹



Abb. 14: Versuchsergebnis der Herstellung einer Schlaufenfläche auf Beton durch Einlegen in die Schalung, Freytag u.a. 2018, 48

⁶⁹ Vgl. Riewe u.a. 2019, 9–10.

Für die Herstellung einer Schlaufenfläche während einer Sanierung oder nach der Fertigung eines Bauteils, können industriell hergestellte Velours- oder Flauschmatten, weitestgehend baustoffunabhängig, mittels Kleben aufgebracht werden.⁷⁰ Eine Überprüfung dieser Konzepte auf Beton anhand von ersten Herstellungs-, Haftzug- und Schälzugprüfungen, erfolgte durch das *Labor für Konstruktiven Ingenieurbau* der *TU Graz* und wird nachfolgend kurz dargestellt.⁷¹

Das Konzept „Kleben auf Beton“ wurde mit unterschiedlichen Klebeprodukten (siehe nachfolgende Abbildung) sowie den Klettmaterialien *Flausch* (Art. 15244) und *Velours* (Art. 88297) der Firma *Gottlieb Binder GmbH & Co. KG* auf Normalbeton getestet. Das Ziel der Versuche bestand in der Feststellung der Haftfestigkeit der jeweiligen Verbindung im Vergleich zur maximalen Klettfestigkeit des Velours- oder Flauschproduktes, der Baustellentauglichkeit sowie der Möglichkeit des Rückbaus, also des Ablösens des Klettproduktes „von Hand“. Ein insgesamt positives Ergebnis konnte bei den selbstklebenden Ausführungen des Flauschproduktes (nachfolgende Abbildung, *Flausch SK31*, *Flausch SK26*) sowie dem Kleber *AURO® Universalkleber* (nachfolgende Abbildung, *Auro® Universal*) bei beiden Klettprodukten (*Flausch 15244* und *Velours 88297*) festgestellt werden.⁷²

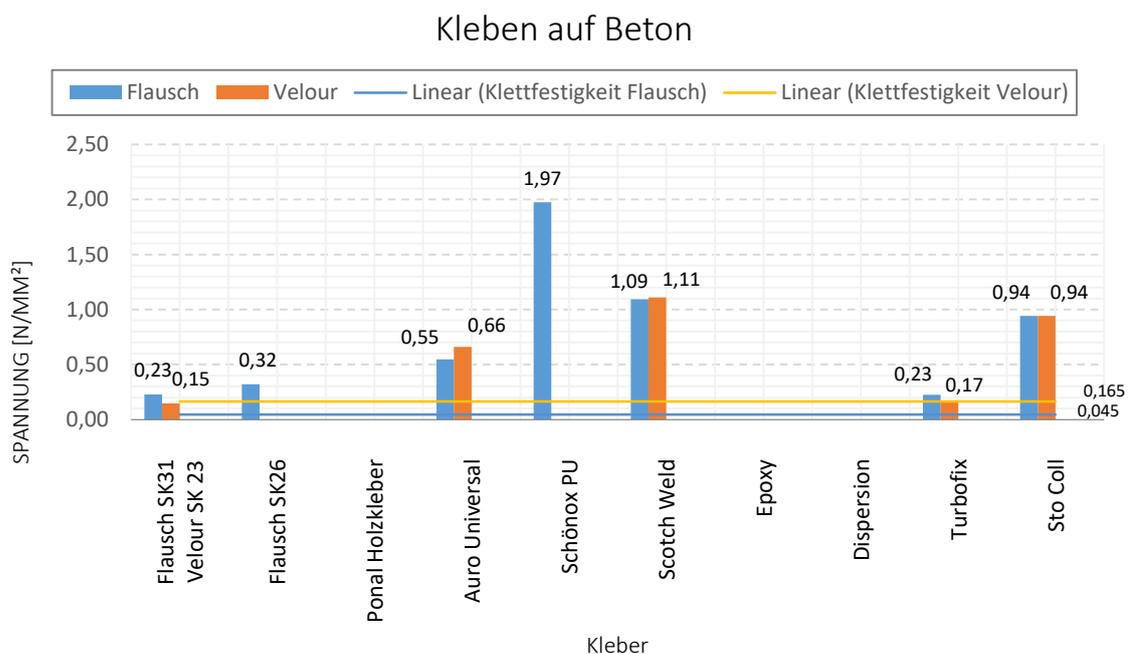


Abb. 15: Übersicht der Versuchsergebnisse der Haftzugprüfung des Konzeptes „Kleben auf Beton“, Riewe u.a. 2019, 42, basierend auf Freytag u.a. 2018, 10

⁷⁰ Vgl. Riewe u.a. 2019, 10.

⁷¹ Vgl. Freytag u.a. 2018.

⁷² Vgl. Riewe u.a. 2019, 39–42.

Das Konzept „Einlegen in Beton“ wurde anhand von Schälzugprüfungen und Haftzugprüfung (Ergebnisse siehe nachfolgende Abbildung) in folgenden Ausführungsvariationen überprüft:

- Versuch 1: Flauschmatte, Klettelemente Richtung Schalung, fixiert durch Klebeband
- Versuch 2: Veloursmatte, Klettelemente Richtung Schalung, fixiert durch Klebeband
- Versuch 3: Doppelflausch kreuzlagenverklebt, Klettelemente Richtung Schalung und Beton, keine Fixierung
- Versuch 4: Velours auf Trägerplatte, Klettelemente Richtung Schalung, keine Fixierung
- Versuch 5: Flauschmatte, Klettelemente Richtung Schalung, fixiert durch Klettprodukt
- Versuch 6: Veloursmatte, Klettelemente Richtung Schalung, fixiert durch Klettprodukt
- Versuch 7: Doppelvelours, Klettelemente Richtung Schalung und Beton, keine Fixierung
- Versuch 8: Pilzkopf mit Flausch verklebt, Schlaufenelemente Richtung Schalung, Pilzkopfelemente Richtung Beton, keine Fixierung

Positiv die Haftzugprüfung (und Baustellentauglichkeit) betreffend, wurden die Versuche 3, 4, 5, 7 und 8 bewertet.⁷³ Ausführungsvarianten mit einer Ausrichtung von Klettelementen Richtung Betonmasse (3, 7, 8) resultierten in einem sehr hohen Verbund und führten im Rahmen der Schälzugversuche teilweise zu einem Versagen des Klettmaterials. Ein insgesamt positives Ergebnis, mit der Möglichkeit des Rückbaus bei gleichzeitig hoher Kraftübertragung, konnte bei den Versuchen 4 und 5 festgestellt werden.⁷⁴

Als eines der 143 Konzepte wurde auch das dem Forschungsansatz der vorliegenden Arbeit zugrundeliegende Konzept „Bohren“ als ein, mit vergleichsweise herkömmlichen Klettprodukten verbindungs-fähiger Rohbauuntergrund, entwickelt. Eine Anwendung dieses Konzeptes auf verschiedene Rohbaustoffe wurde angedacht, erschien jedoch für den Rohbaustoff Holz am zielführendsten (siehe nachfolgende Abbildung).

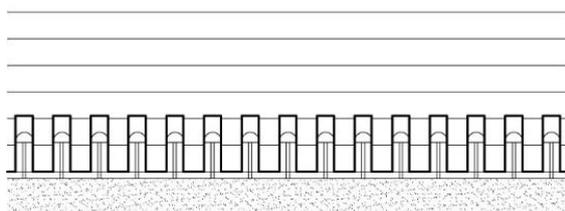
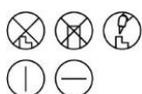


Abb. 16: Konzeptskizze „Bohren“ angewandt auf den Rohbaustoff Holz, Institut für Architekturtechnologie, TU Graz

⁷³ Vgl. Riewe u.a. 2019, 43–53.

⁷⁴ Vgl. Freytag u.a. 2018, 53–60.

Anhand dieses Sondierungsprojektes konnten grundlegende Erkenntnisse über Klettverbindungen, der Anwendung an der Primärstruktur und Tertiärstruktur sowie die Idee eines direkt verbindungs-fähigen, „klettbaeren“ Rohbaustoffes gewonnen werden. Eine Weiterentwicklung des Konzeptes „Bohren“, wie es die vorliegende Arbeit vorschlägt, war nicht Gegenstand der Sondierung. Zudem wurde die aus einem Verbund industrieller Klettprodukte mit langlebigen Bauteilen (Rohbau) resultierende Problematik (siehe vorangehendes Kapitel *Problemstellung*) in diesem Umfang erst im Rahmen dieser Arbeit skizziert.

2.1.3.2 Velcro-like fasteners based on NiTi micro-hook arrays

Untersuchungsgegenstand der Arbeit der Autoren D. Vokoun, P. Sedlak, M. Frost, J. Pilch, D. Majtas und P. Sittner ist der nachfolgend abgebildete Hakenklettverschluss aus einer Formgedächtnislegierung, sowie sein mechanisches Belastungsverhalten im Klettverbund. Die Formgebung der Haken, bestehend aus einer Nickel-Titan-Mischung mit einem Durchmesser von 0,1 mm, erfolgt bei Temperaturen von 300-500° C. Die Herstellung der Hakenkomponente, die Bindung der geformten Haken, anhand den nachfolgend abgebildeten Fertigungsschritten. Wie im Rahmen dieser Untersuchung festgestellt werden konnte, ermöglicht die Materialität der Haken eine hohe Elastizität, eine Festigkeit von ca. 3 kg/cm² bei 240 Haken/cm², eine gute stoßdämpfende Wirkung, eine gesteigerte Festigkeit bei zunehmender Temperatur und umgekehrt, eine gute Schwingungsdämpfung, einen geringen erforderlichen Kraftaufwand zur Herstellung der Verbindung, eine niedrige Geräusentwicklung beim Lösen der Verbindung sowie einen geringen Einfluss von Schmutz (Staub, Öl, usw.) auf die Funktionalität der Verbindung.⁷⁵

Die Bindung der Hakenelemente, siehe nachfolgende Abbildung, erfolgt durch Gießen und damit der grundsätzlichen Methodik der Herstellung von Betonbauteilen und könnte für weiterführende Projekte, das Einbetonieren einzelner Klettelemente betreffend, einen interessanten Untersuchungsgegenstand darstellen.

⁷⁵ Vgl. Vokoun u.a. 2011, 1–13.

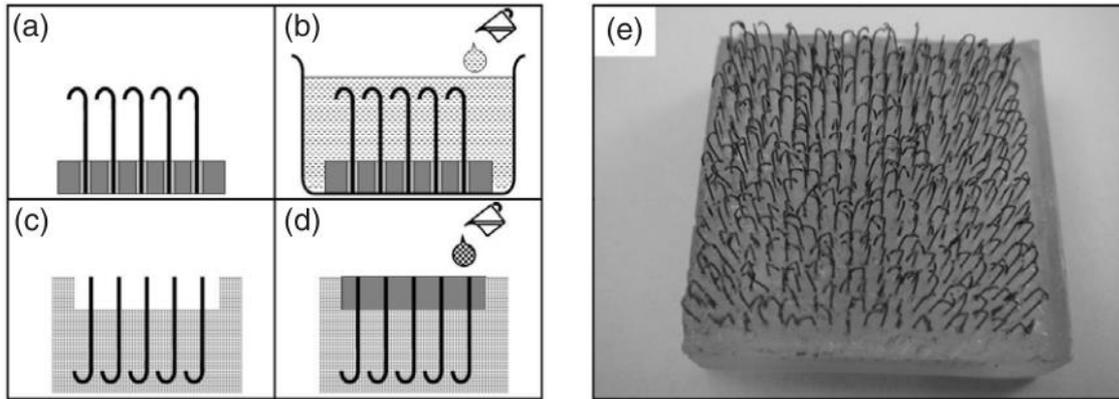


Abb. 17: Herstellungsverfahren einer NiTi-Hakenfläche (li), finale NiTi-Hakenfläche (re), Vokoun u.a. 2011, 3
 a) Die vorgefertigten Haken werden in eine Stahlplatte mit Lochraster eingebracht,
 b) in einem Behälter positioniert und mit einem Zweikomponenten-Elastomer auf Silikonbasis umhüllt.
 c) Die Stahlplatte wird entfernt und der entstehende Hohlraum,
 d) zum Beispiel mit Harz, gefüllt und die Haken gebunden. Abschließend wird das Elastomer entfernt.
 e) Fotografie der finalen NiTi-Hakenfläche.

2.1.3.3 Proof-of-Concept Investigation of Active Velcro Autonomous Docking of Micro- and NanoSatellites

Die Arbeit von Diann Brei, Douglas Lindner, Mary Frecker, Chris LaVigna und Joe Clement aus dem Jahr 2003 behandelt eine neuartige *Smart Attachment Mechanism (SAM)* Technologie zur Anwendung bei Mikro- (<100 kg) und Nano-Satelliten (<10 kg) im Rahmen von Wartungsarbeiten im Weltraum. Die Technologie soll dazu dienen, das Andocken an Muttersatelliten oder an ein Weltraumsystem zu erleichtern. Unter diesem Anspruch ist das Forschungsziel die Entwicklung einer Befestigungstechnologie, welche die primären Funktionen einer aktiven Verbindung (Einrasten, Halten, Lösen) besitzt, wie auch, während der Verbindung eine kontrollierte Bewegungserzeugung (Translation, Rotation) zwischen den beiden verbundenen Flächen ermöglicht.⁷⁶

Das Ergebnis dieser Arbeit besteht in dem Konzept "Active Velcro System" und zwei komplementären Verbindungskomponenten oder Oberflächen (siehe nachfolgende Abbildung). Eine Komponente dient als „Wirt“ und besitzt eine hexagonale Anordnung von aktivierbaren Zinken oder Pilzkopfelementen sowie Antriebs-, Steuerungs- und Energiesysteme. Die zweite Komponente dient als „Gast“ und besteht aus vereinzelt angeordneten, inaktiven Pfosten. Die Verbindung dieser Komponenten erfolgt grundsätzlich mechanisch und entspricht dem Prinzip einer herkömmlichen Klettverbindung. Ein Pfosten tritt jeweils mit einer Gruppe bestehend aus drei Pilzkopfelementen (einer Zelle) in Verbund. Wird nach erfolgter Verbindung die Wirtskomponente aktiviert, kann die verbundene Gastkomponente bewegt und ausgerichtet werden.⁷⁷

⁷⁶ Vgl. Brei u.a. 2003, 33–36.

⁷⁷ Vgl. Ebda., 38.

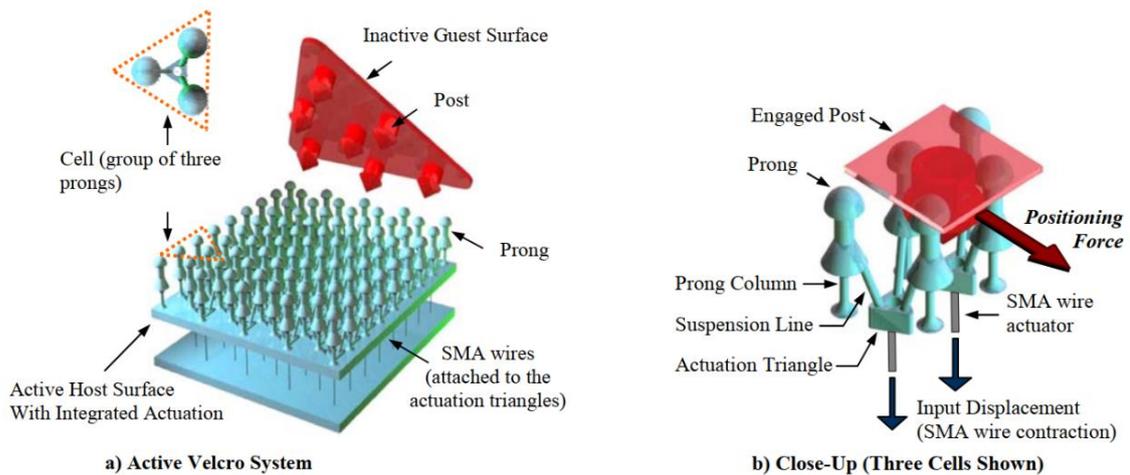


Abb. 18: Übersicht des aktivierbaren Klettsystems (li, a) und Detail aktivierbarer Zellen (re, b), Brei u.a. 2003, 39
 a) Das Konzept "Active Velcro" besteht aus zwei Flächen oder Komponenten, einer inaktiven Gastkomponente mit vereinzelt angeordneten Pfosten (rot) und einer Wirtskomponente mit einer dichten Anordnung von aktivierbaren pilzkopfartigen Klettelementen mit Betätigungs-, Leistungs- und Kontrollsystem (bläulich). Bei kontrollierter Aktivierung kann die Gastfläche in die gewünschte Position und Ausrichtung gebracht werden.
 b) Die Pilzkopfelemente (Prongs) werden infolge der Aufhängungsleitungen (Suspension Line) und der SMA-Drähte in der Mitte der jeweiligen Zelle (Actuation Triangle) aktiviert.

Nachfolgend ist der Aktivierungsmechanismus der Wirtskomponente anhand einer Zelle im Detail dargestellt. Wird der SMA-Draht mit Energie versorgt, zieht er infolge seiner Position das Betätigungsdreieck nach unten und die Zelle schließt sich in einer Greifaktion. Dadurch kann einerseits die Kraftübertragung der Verbindung gesteigert, wie auch, durch gezielte Aktivierung einzelner oder einer Abfolge von Zellen, die einzelnen Pfosten und damit die verbundene Gastkomponente von Zelle zu Zelle verschoben und wie gewünscht ausgerichtet werden.⁷⁸

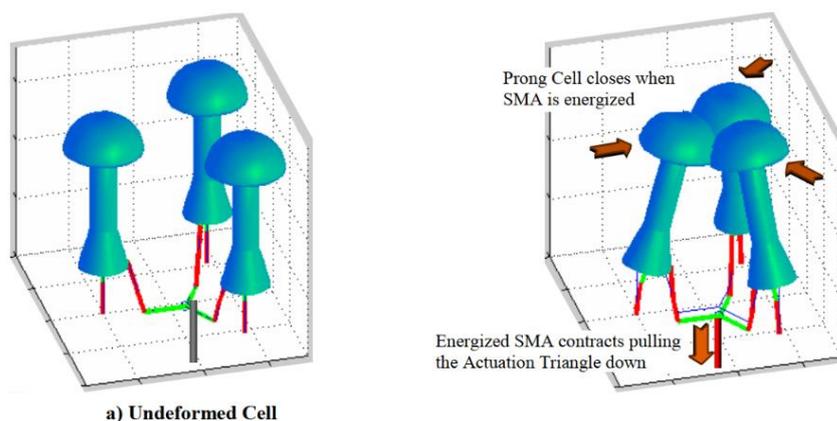


Abb. 19: Inaktive (li) und aktivierte Zelle (re) des aktivierbaren Klettsystems, Brei u.a. 2003, 44

⁷⁸ Vgl. Brei u.a. 2003, 43–44.

Um das Konzept zu demonstrieren und zu bewerten wurden im Rahmen der Untersuchung Prototypen in verschiedenen Maßstäben entworfen, hergestellt und experimentell charakterisiert. Nachfolgende Abbildung zeigt den Prototyp anhand dessen die grundsätzliche Fähigkeit zur Herstellung der aktivierbaren Pilzkopfkomponente, wie auch, infolge eines Pfadplanungsalgorithmus, die Bewegung und Ausrichtung verbundener Flächen (Translation, Rotation) demonstriert werden konnte.⁷⁹

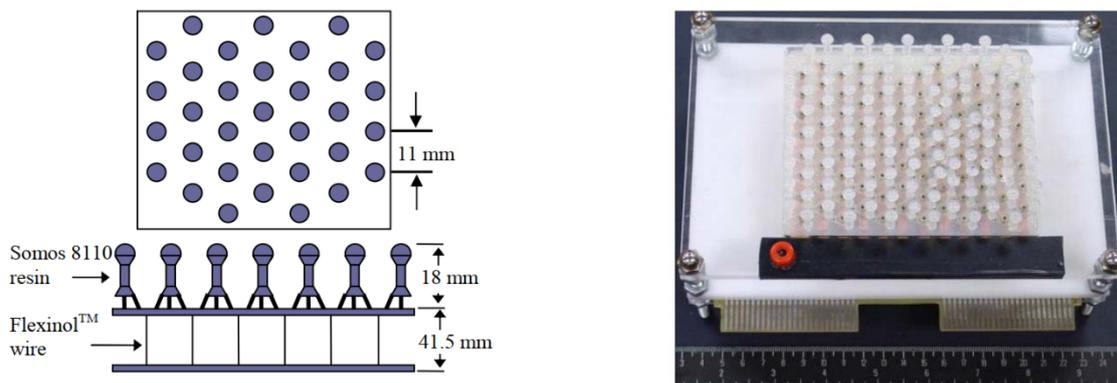


Abb. 20: Übersicht (li) und Prototyp (re) des Klettsystems "Active Velcro", hergestellt aus Somos 8110-Harz und Flexinol™ Drähten, Brei u.a. 2003, 76

Für das Ziel der vorliegenden Arbeit liegt in dem grundlegenden Prinzip einer aktivierbaren Klettverbindung, wie auch im vorangehenden Kapitel *Patente* festgestellt, eine wesentliche konzeptuelle Ergänzung vor und bildet für weiterführende Untersuchungen einen möglichen Forschungsansatz. Im Besonderen das Vorgehen eine Klettkomponente aktivierbar auszuführen und den Verbindungspartner passiv zu belassen, betont die grundsätzliche Möglichkeit der Herstellung einer Klettverbindung mit biegesteifen Klettkomponenten. Zudem birgt das Konzept der Manipulation verbundener Komponenten einen interessanten Ansatz wie auch möglichen Untersuchungsgegenstand.

2.1.3.4 A Bio-Inspired Electro-Active Velcro Mechanism Using Shape Memory Alloy for Wearable and Stiffness Controllable Layers

Die Herstellung intelligenter und thermoelektrisch aktivierbarer sowie kontrollierbarer Hakenklettverschlüsse in zwei Ausführungsvariationen ist Gegenstand der Arbeit der Autoren Hadha Afrisal, S.M.Hadi Sadati und Thrishantha Nanayakkara. Ausführung eins entspricht einem Haken-zu-Hakensystem. Eine Aktivierung und Herstellung der Verbindung erfolgt durch die Stromversorgung der jeweiligen Hakenelemente. Die Berührung der einzelnen Haken resultiert in einem Stromfluss sowie in inaktiven Hakenspitzen und einer daraus folgenden Reduzierung der möglichen Kraftübertragung. Ausführung zwei entspricht der bevorzugten Variante und besteht aus einer aktivierbaren, doppelt ausgeführten Hakenkomponente mit einer inaktiven Schlaufenkomponente als Verbindungspartner (siehe nachfolgende Abbildung). Entsprechende

⁷⁹ Vgl. Brei u.a. 2003, 81–82.

Versuche mit einem Drahtdurchmesser von 0,10 mm, einem Krümmungsdurchmesser von 2,2 mm und verschiedenen Stromstärken führten zu einer Hakenzugkraft von 0,126 N nach einer Dehnung von 4,23 mm.⁸⁰

Wie beim vorangehenden Forschungsprojekt, entspricht das Prinzip einer aktivierbaren Klettverbindung einem möglichen Untersuchungsgegenstand zukünftiger Forschungen. Die bevorzugte Aktivierung nur einer Klett Komponente folgt dem Untersuchungsansatz eine Klett Komponente biegefest und starr auszubilden.

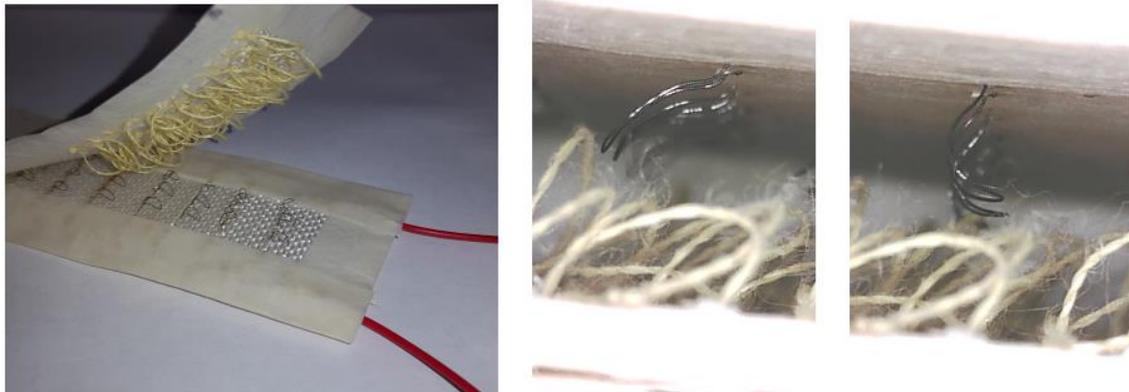


Abb. 21: Elektroaktiver Klettverschluss bestehend aus Schlaufen- und Hakenkomponente (li), mit inaktiven (m) und aktivierten (re) Hakenelementen, Afrisal/Sadati/Nanayakkara 2016, 1

2.1.3.5 Flexible and voltage-switchable polymer velcro constructed using host-guest recognition between poly(ionic liquid) strips

Ebenso mit aktivierbarem Klett, jedoch in molekularem Maßstab, beschäftigt sich diese wie nachfolgende zwei Arbeiten, welche dieses Kapitel abschließend kurz dargestellt werden. Jiangna Guo, Chao Yuan, Mingyu Guo, Lei Wang und Feng Yan aus dem Fachbereich Chemie untersuchen die Entwicklung eines Klettverschlusses aus einem leitfähigen und somit elektrisch steuerbaren Polymerstoff durch den Einsatz chemischer Oberflächenmodifikatoren. Die resultierende Klettverbindung kann mechanisch, chemisch und elektrochemisch hergestellt und gelöst werden. Es wurde festgestellt, dass eine mechanische Verbindungsherstellung eher zu einer geringeren Anzahl an Verbindungspunkten führt, während eine chemische und elektrochemische Herstellung eine hohe Anzahl an Verbindungspunkten ermöglicht.⁸¹

⁸⁰ Vgl. Afrisal/Sadati/Nanayakkara 2016, 1–6.

⁸¹ Vgl. Guo u.a. 2014, 3261–3266.

2.1.3.6 Supramolecular Velcro for Reversible Underwater Adhesion

Die Arbeit der Autoren Youngjoo Ahn, Yoonjung Jang, Narayanan Selvapalam, Gyeongwon Yun und Kimoon Kim beschäftigt sich mit der Synthese eines supramolekularen Klettverschlusses zur Entwicklung eines synthetischen Unterwasserklebstoffes. Die Klett Komponenten werden durch zwei separate Siliziumoberflächen (Si), siehe nachfolgend abgebildetes Prinzip, hergestellt. Die übertragbaren Kräfte werden anhand der Dichte der Verbindungselemente gesteuert.⁸²

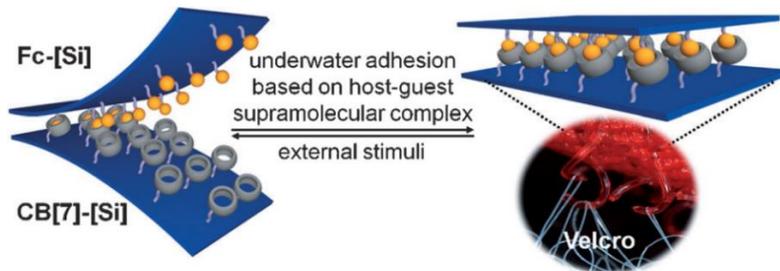


Abb. 22: Prinzip des supramolekularen Klettverschlusses, Ahn u.a. 2013, 3222

2.1.3.7 Molekulare Klettverschlüsse zur reversiblen Bindung makroskopischer Oberflächen

Die Dissertation von Maik Sievers beschäftigt sich mit molekularen Klettverschlüssen und dem Anspruch einer Steigerung der Kraftübertragung. Dieses Ziel soll anhand einer Erhöhung der Anzahl an möglichen Verbindungsstellen infolge eines funktionalisierten Polymers erreicht werden. Interessanterweise sind auch selbstheilende Eigenschaften dieser Klettverbindung Teil des Untersuchungsgegenstandes, welche hier jedoch nicht weiter ausgeführt werden.⁸³

⁸² Vgl. Ahn u.a. 2013, 3222–3223.

⁸³ Vgl. Sievers 2016, 16–18.

2.2 Beton

Da diese Arbeit auf die Untersuchung und Herstellung klettfähiger Betonstrukturen ohne eine Optimierung der Betonzusammensetzung abzielt, werden in diesem Kapitel lediglich Grundlagen der Betontechnologie angeführt, die als Ansatz für weiterführende Forschungen dienen sollen. Eine Untersuchung der Befestigungstechnik in Beton, des Tragverhaltens sowie der Formgebung von Beton anhand der Wachsschalentechnologie erfolgt im Kapitel *Grundlagen*.

Die heutige Betonbauweise basiert auf einer Vielzahl an technischen und wissenschaftlichen Erkenntnissen seit der Antike. Die erste bekannte Anwendung von Kalkmörtel als Baustoff fand um etwa 12.000 v. Chr. in der Türkei statt. Im Jahr 13 v. Chr. beschreibt der römische Baumeister Marcus Vitruvius Pollio die Herstellung des *Opus Caementitium*, bestehend aus Kalkmörtel, Grobzuschlägen bis zu 70 mm Korngröße, Kies, Sand und Wasser und somit einer unserem heutigen Beton bereits sehr ähnlichen Mischung. Die Bewehrung einer Geschosdecke aus Beton und somit Herstellung einer Stahlbetondecke ist erstmals im 19. Jahrhundert dokumentiert. Der Stukkateurmeister William Boutland Wilkinson kombinierte den Baustoff mit Drahtseilen und meldete diese Erfindung 1854 als Patent an.⁸⁴

Beton besteht heute aus fünf möglichen Bestandteilen. Die Gesteinskörnung, das Bindemittel und Wasser bilden die drei Hauptbestandteile. Darüber hinaus ermöglicht die Zugabe von Zusatzstoffen und/oder Zusatzmitteln die Herstellung von Beton mit besonderen Eigenschaften.⁸⁵

2.2.1 Bestandteile

2.2.1.1 Gesteinskörnung

Die Gesteinskörnung hat den größten Anteil am Beton mit ca. 75 % des Gesamtvolumens. Eine gut abgestimmte Sieblinie, ein gutes Verhältnis von groben zu feinen Gesteinskörnern, erhöht grundsätzlich den Anteil an Gesteinskörnung und damit die Festigkeit des Betons, da die Gesteinskörner in der Regel eine höhere Festigkeit als der Zementstein besitzen. Zusätzlich kann durch eine entsprechende Abstimmung die Volumenverminderung beim Erhärten und somit die Rissneigung verringert werden. Je nach Beton werden hauptsächlich natürliche Gesteinskörnungen (rundkörnige Fluss- bzw. Moränekiese oder gebrochene Hartgesteine) aber auch leichte Gesteinskörnungen (mineralisch mit einer Rohdichte von max. 2000 kg/m³), industrielle Gesteinskörnungen (z.B. Blähton) und Recycling-Gesteinskörnungen (z.B. Betonabbruch) eingesetzt.⁸⁶

2.2.1.2 Bindemittel

Das Bindemittel hat mit ca. 15 % den zweitgrößten Anteil am Beton und setzt sich aus Zement und anrechenbaren Zusatzstoffen zusammen. Zement ist ein hydraulisch wirksames Bindemittel, der Erhärtungsprozess von Beton beginnt ab der Zugabe des Wassers. Die Bestandteile je Zement sind

⁸⁴ Vgl. Kind-Barkauskas u.a. 1995, 9–13.

⁸⁵ Vgl. Zement + Beton Handels- und Werbeges.m.b.H. 2019, 23.

⁸⁶ Vgl. Peck u.a. 2013, 28–30.

unterschiedliche Mischungsverhältnisse von Portlandzementklinker, Gips, Hüttensand, Flugasche, Kalkstein und Nebenbestandteile. Portlandzementklinker ist für den Erhärtungsprozess hauptverantwortlich und wird durch die Sinterung einer Mischung aus Kalkstein, Ton, Mergel und den Korrekturmaterialeisenoxid bei etwa 1450° C hergestellt.⁸⁷

2.2.1.3 Wasser

Wasser setzt, wie zuvor erwähnt, die Reaktion des Zements und somit den Erhärtungsprozess des Betons in Gang. Der Anteil am Gesamtvolumen beträgt ca. 10 %. Für die Herstellung von Beton kann Wasser aus der allgemeinen Wasserversorgung, Brunnen, Seen, Bächen oder Flüssen verwendet werden. Meerwasser oder Wasser aus Brachen darf nur bei unbewehrten Bauteilen zum Einsatz kommen⁸⁸. Von besonderer Bedeutung für die Qualität von Beton ist das Verhältnis von Wasser zu Bindemittel. Je niedriger dieses Verhältnis ist, umso geringer fällt der Kapillarporenanteil im erhärteten Beton aus, mit einer daraus resultierenden höheren Festigkeit und höheren Beständigkeit. Ein geringer Wassergehalt im Frischbeton verringert jedoch die Fließfähigkeit und erschwert die Verarbeitung. Um dem entgegenzuwirken, können spezielle Betonzusatzmittel (Verflüssiger oder Fließmittel) beigemischt werden.⁸⁹

2.2.1.4 Zusatzstoffe

Zusatzstoffe sind in der Betonmischung fein verteilte Stoffe die beispielsweise die Verarbeitbarkeit, die Festigkeit oder die Dichtigkeit des Betons beeinflussen und werden in inaktive, puzzolanische, latent hydraulische und organische Zusatzstoffe eingeteilt. Je nach Eignung und Einteilung werden sie, mit Ausnahme der inaktiven und organischen Zusatzstoffe, als Bindemittel angerechnet. Im Vergleich mit Zusatzmitteln ist die mögliche Zugabemenge groß und bei der Stoffraumberechnung von Beton zu berücksichtigen. Mögliche Zusatzstoffe sind beispielsweise *Gesteinsmehl*, *Flugasche* und *Silikastaub*. *Gesteinsmehl* (inaktiv) besteht aus feingemahlene Gesteinen, wie Quarz oder Kalksteinmehl, dient der besseren Verarbeitbarkeit und führt zu einem geschlossenen Gefüge. *Flugasche* (puzzolanisch) besteht aus kugelförmigen, glasigen Partikeln und wird aus Rauchgasen gewonnen. Eine Zugabe führt zu einem geringeren Wasseranspruch, einer besseren Verarbeitbarkeit und einer geringeren Wärmeentwicklung und reduzierten Entmischungsfahr. Außerdem erhöht sie die Wasserundurchlässigkeit und den Sulfatwiderstand. *Silikastaub* ist ein feinkörniger, mineralischer Zusatzstoff der bei der Herstellung von Silizium entsteht. Er hat einen sehr hohen Wasseranspruch und erfordert die Zugabe eines Verflüssigers oder Fließmittels. *Silikastaub* ermöglicht sehr hohe Betondruckfestigkeiten und führt zu einem erhöhten Widerstand gegen chemischen Angriff oder Chloride.⁹⁰

⁸⁷ Vgl. Zement + Beton Handels- und Werbeges.m.b.H. 2019, 56–57.

⁸⁸ Vgl. Peck u.a. 2013, 30–31.

⁸⁹ Vgl. Zement + Beton Handels- und Werbeges.m.b.H. 2019, 64–65.

⁹⁰ Vgl. Kampen/Richter 2014, 4–6.

2.2.1.5 Zusatzmittel

Zusatzmittel haben sehr unterschiedliche Eigenschaften und werden der Betonmischung als flüssige oder feste Stoffe beigemischt. Sie dienen vor allem der Verarbeitbarkeit des Frischbetons.⁹¹ Zusatzmittel sind beispielsweise *Betonverflüssiger*, *Fließmittel*, *Verzögerer*, *Beschleuniger*, *Luftporenbildner*, *Schaumbildner* und *Schwindreduzierer*. *Betonverflüssiger* und *Fließmittel* verbessern die Verarbeitbarkeit des Frischbetons indem sie verflüssigend wirken. *Fließmittel* ermöglichen zudem eine Verminderung des Wasseranspruchs. *Verzögerer* verschieben den Erstarrungszeitpunkt des Zementleims und verlängern so die Verarbeitungszeit. Sie werden beispielsweise bei der Herstellung großer Bauteile ohne Arbeitsfugen eingesetzt. *Beschleuniger* bewirken eine schnellere Erstarrung des Zementleims und eine damit einhergehend schnellere Wärmeentwicklung. *Luftporenbildner* bilden kugelförmige Luftporen. Diese Lufteinschlüsse erhöhen den Widerstand gegen Frost- und Frosttausalzangriffe und können zu einer Verbesserung der Verarbeitbarkeit führen sowie den Wasseranspruch verringern. Eine Nebenwirkung ist die Minderung der Betonfestigkeit. *Schaumbildner* ermöglichen einen Beton mit einem sehr hohen Anteil an Luftporen. *Schwindreduzierer* können das Schwinden des Zementsteins sowie das Auftreten von Rissen und Verformungen während der Aushärtung vermindern.⁹²

2.2.2 Herstellung

Grundsätzlich beginnt die Herstellung von Betonbauteilen mit dem Mischen der Bestandteile (nach Bereitstellen der Schalung). Ab der Wasserzugabe muss der Beton innerhalb von 15 Minuten vor Ende der Verarbeitungszeit (bei keiner abweichenden Angabe 105 Minuten) verarbeitet werden. Das bedeutet, der vermengte Frischbeton muss in die Schalung eingebracht und zur Vermeidung von Lufteinschlüssen ausreichend verdichtet sein.⁹³ Sobald der Zement ausgehärtet und der Beton eine entsprechende Festigkeit erreicht hat, kann mit dem Ausschalen begonnen werden. Je nach Witterung, Anforderung, Anwendung sowie Betonart muss das Bauteil nachbehandelt und vor zu raschem Austrocknen geschützt werden. Die anzuwendenden Nachbehandlungszeiten und Ausschalfristen sind der *ÖNORM B 4710* zu entnehmen.

2.2.3 Betonarten

2.2.3.1 Normalbeton

Normalbeton besteht aus einer Mischung von Gesteinskörnung, Bindemittel, Wasser und je nach Erfordernis Zusatzstoffen und/oder Zusatzmitteln. Er besitzt eine Trockenrohichte von 2000-2600kg/m³. Seine Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität hinsichtlich unterschiedlicher Anwendungen und Einsatzgebiete wird in der *ÖNORM B 4710* geregelt.⁹⁴

⁹¹ Vgl. Peck u.a. 2013, 32.

⁹² Vgl. Kampen/Richter 2014, 1–3.

⁹³ Vgl. ÖNORM B 4710-1:2018 01 01, 161.

⁹⁴ Vgl. ÖNORM B 4710-1:2018 01 01.

2.2.3.2 Leichtbeton

Leichtbeton entsteht durch Verwendung einer Gesteinskörnung mit geringer Dichte (z.B. Blähton oder Blähglas) oder der Zugabe eines Schaum- oder Luftporenbildners und einer daraus resultierenden hohen Anzahl an Luftporen. Der Beton besitzt im Vergleich mit Normalbeton ein geringeres Gewicht, eine geringere Tragfähigkeit und bessere Wärmedämmeigenschaften,⁹⁵ bei einer Trockenrohddichte zwischen 800-2000 kg/m³.⁹⁶

Ein interessantes Beispiel für eine Weiterentwicklung von Leichtbeton ist das Produkt *AIRium™* der Firma *Lafarge Zementwerke GmbH* mit einer Dichte von 70-500 kg/m³. Dieser aus Beton vermengt mit dem Zusatzmittel *Schaumbildner* hergestellte Wärmedämmstoff wird als Schüttung unter Estrichen, als Flachdach- oder Dachbodendämmung oder in Verbindung mit Mauerwerkssteinen eingesetzt, ist langlebig, formstabil, hitze-, kälte-, feuchtbeständig und nicht brennbar,⁹⁷ bei entsprechend geringer Tragfähigkeit.



Abb. 23: Produktfoto des mineralischen Wärmedämmstoffs *AIRium™*, Lafarge Zementwerke GmbH

2.2.3.3 Faserbeton

Um Beton eine höhere Festigkeit sowie innere Bindung zu verleihen, werden der Betonmischung Kurzfasern aus Stahl, Kunststoff oder Glas beigemengt. Bis zu einer gewissen Rissbreite unterstützen diese Fasern die Stabstahlbewehrung in der Aufnahme von Zugkräften. Kunststofffasern verbessern zudem den Widerstand des Bauteiles gegen Schläge und Stöße.⁹⁸

2.2.3.4 Textilbeton

Textilbeton besitzt eine Bewehrung aus einem dreidimensionalen Fasergewebe, bestehend aus Glas- oder Carbonfasern. Aus dieser Herstellungsmethode resultierende Bauteile sind sehr materialarm und dünnwandig bei gleichzeitig hoher Tragfähigkeit.⁹⁹

⁹⁵ Vgl. Peck u.a. 2013, 36–37.

⁹⁶ Vgl. ÖNORM B 4710-1:2018 01 01, 17.

⁹⁷ Vgl. Lafarge Zementwerke GmbH 2018, 2–7.

⁹⁸ Vgl. Peck u.a. 2013, 37–39.

⁹⁹ Vgl. Ebda., 39.

2.2.3.5 Ultrahochfeste Betone (UHPC)

Die Haupteigenschaft eines UHPC-Betons ist die hohe Festigkeit resultierend aus einem sehr niedrigen Wasser zu Bindemittelwert von ca. 0,2 und dem daraus folgenden geringen Porenanteil im Betongefüge. Neben Wasser, Zement und Gesteinskörnung werden der Betonmischung unterschiedliche Mengen an Gesteismehl, Flugasche, Silikastaub, Fließmittel und Fasern beigemischt.¹⁰⁰

Eine interessante Eigenschaft von UHPC-Beton ist, neben der hohen Festigkeit, die hohe Packungsdichte der Feinstpartikel. Daraus folgt, dass Mikrostrukturen sehr gut abgebildet werden können. Dieses Merkmal zeigt sich in einem Forschungsprojekt der Berliner *Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)*, in dessen Rahmen mittels Silikonschalung eine Vinylschallplatte abgeformt und mit UHPC-Beton abgegossen wurde. Das Ergebnis, die resultierende UHPC-Schallplatte (siehe nachfolgende Abbildung) kann auf jedem herkömmlichen Plattenspieler abgespielt werden.¹⁰¹



Abb. 24: Konfokalmikroskopische Aufnahme der Stereorille der UHPC-Schallplatte, Fontana 2016, 38

¹⁰⁰ Vgl. Peck u.a. 2013, 40–41.

¹⁰¹ Vgl. Fontana 2016, 36–38.

3 Klettbeton

Die Untersuchung und Herstellung einer monolithischen, materialreinen und biegesteifen klettfähigen Betonstruktur erfolgt anhand entsprechender Grundlagen, die im nachfolgenden gleichnamigen Kapitel anhand einer Analyse des Funktionsprinzips und des Tragverhaltens der Klettverbindung, einer Untersuchung des Verhaltens von Beton unter Belastung und der Feststellung seiner Zugfestigkeit, sowie einer Beurteilung der Anwendbarkeit der Wachsschalungstechnologie geschaffen werden.

Im darauffolgenden Kapitel *Herstellungskonzepte* werden drei aus diesen Grundlagen resultierende Konzepte zur Herstellung von Klettbeton angeführt. Das umschließt eine Beschreibung des Konzeptprinzips, der Wachskörper, der Betonstrukturen, des angenommenen Belastungsverhaltens im Klettverbund, des Verbindungspartners und eine abschließende Überprüfung der Konzepte im Rahmen einer Machbarkeitsstudie anhand von Herstellungsversuchen sowie, je nach Versuchsergebnis, infolge einer Feststellung der Klettfähigkeit durch Tastversuche mit einem nicht aktivier- und deaktivierbaren (steuerbaren) Verbindungspartner.

3.1 Grundlagen

3.1.1 Analyse der Klettverbindung

Das Ziel der Analyse der Klettverbindung besteht in einem grundlegenden Verständnis der Verbindung wie auch in der Feststellung geometrischer als auch materialspezifischer Bedingungen zur Nachbildung industrieller Klettelemente in Beton, sowie in Ansätzen zur Ausbildung eines entsprechenden Verbindungspartners.

3.1.1.1 Funktionsprinzip

Eine industriell hergestellte Klettverbindung besteht aus zwei Verbindungspartnern, die wiederum aus einer Basis und darauf angeordneten, komplementären Klettelementen bestehen. Durch eine Optimierung und Abstimmung der jeweiligen materialspezifischen und geometrischen Parameter ist es möglich, Klettprodukte für unterschiedliche Anwendungszwecke, beispielsweise mit hoher Haftkraft bei gleichzeitig niedriger Schälkraft herzustellen.¹⁰²

Die häufig an derselben Position wiederholbare Verbindung erfolgt durch das aufeinanderpressen der Verbindungspartner,¹⁰³ Einhängekomponente mit Einhängekomponente oder Einhängekomponente mit Schlaufenkomponente. Dies erfordert einen ausreichend starken Anpressdruck und kann bei industriell hergestellten Klettverbindungen mit 0,2 N/mm² angenommen werden¹⁰⁴. Eine Einhängekomponente besitzt Klettelemente in Haken- oder Pilzkopfform mit ausreichender Steifigkeit und geometrisch bedingten Hinterschneidungen, eine Schlaufenkomponente Klettelemente in Schlaufen- oder Schlingenform mit ausreichender

¹⁰² Vgl. Krüger 2013, 9–10.

¹⁰³ Vgl. Ebda., 4.

¹⁰⁴ Vgl. Ebda., 95.

Flexibilität. Die Verbindung beruht auf dem Zufallsprinzip und entsteht aufgrund der hohen Anzahl an Verbindungselementen und möglichen Verbindungspunkten. Eine Einhängekomponente kann an jeder klettfähigen Position einer Schlaufenkomponente befestigt werden, eine Einhängekomponenten-Kombination erfordert eine geringfügig lagerichtige Position. Die jeweilige Anzahl der aktiven oder erfolgten Verbindungspunkte kann nicht vorhergesehen werden, die mögliche Kraftübertragung liegt somit in einem statistischen Streubereich.¹⁰⁵ Kommt es unter Belastung zu einer Überschreitung der Höchstlast, lösen sich die einzelnen Klettelemente und damit die Verbindungspartner. Ein Versagen der Verbindung führt erst nach vielen Verbindungszyklen zu Kräfteinbußen und einer Beschädigung der Klettelemente. Beispielsweise führt bei dem Produkt *Klettostar*[®] von *Gottlieb Binder GmbH & Co KG* ein 5000-maliges Öffnen und Schließen der Verbindung zu einer Verringerung der Haftfestigkeit um 66%¹⁰⁶.

3.1.1.2 Tragverhalten von Klettverbindungen

Das Tragverhalten einer Klettverbindung wird durch geometrische Bedingungen, materialspezifische Eigenschaften und die Last bestimmt. Geometrische Bedingungen sind beispielsweise die Größe, Form, Struktur und Dichte der Klettelemente. Materialspezifische Eigenschaften oder Einflussfaktoren sind das Flächengewicht, die Materialart, die Oberflächenstruktur der Klettelemente, die Lagerungsbedingungen der Komponenten, die Temperatur während der Anwendung sowie die Anzahl an Schließ- und Öffnungszyklen mit daraus folgenden Abnutzungen.¹⁰⁷ Die Last wird nach Art und Angriffsrichtung unterschieden. Entsprechend der angestrebten Anwendung im Bauwesen sind das statische Lasten (ständig wirkend und ruhend oder selten auftretend), häufig veränderliche Lasten (häufige Lastwechsel) und dynamische Lasten (Massenkräfte infolge von Explosionen, Anpralllasten, Erdbeben oder Maschinen)¹⁰⁸. Nach Lastrichtung und Angriffspunkt werden Zug-, Quer- und Schällasten unterschieden,¹⁰⁹ und je Klettsystem verschiedene Festigkeiten festgestellt. Wie anhand des Datenblattes des Produktes *Klettostar*[®]-Haft¹¹⁰ und *Pressotex*[®]-Haft¹¹¹ der Firma *Gottlieb Binder GmbH & Co KG* ersichtlich, sind diese Festigkeiten unter Querlast wesentlich höher als unter einer schälenden Belastung. Die Festigkeit unter Zuglast liegt zwischen diesen Werten.

¹⁰⁵ Vgl. Krüger 2013, 9–10.

¹⁰⁶ Vgl. Gottlieb Binder GmbH & Co KG 2018c.

¹⁰⁷ Vgl. Krüger 2013, 95.

¹⁰⁸ Vgl. Eligehausen/Mallée 2000, 6–7.

¹⁰⁹ Vgl. Krüger 2013, 75.

¹¹⁰ Vgl. Gottlieb Binder GmbH & Co KG 2018c.

¹¹¹ Vgl. Gottlieb Binder GmbH & Co KG 2018d.

3.1.1.2.1 Zuglast

Die Zugfestigkeit beschreibt die maximale Zugbelastung im Verhältnis zu einer Verbindungsfläche, bei einer normal auf die Verbindungsfläche gerichteten Zugbeanspruchung. Die maximale Zuglast wird von geometrischen Bedingungen sowie materialspezifischen und lastspezifischen Eigenschaften bestimmt und steigt nicht proportional mit der Klettfläche. Eine statische Last oder Dauerlast hat keinen Einfluss auf die Zugfestigkeit,¹¹² häufige Lastwechsel oder dynamische Lasten können jedoch zu einer Ermüdung der Verbindung führen.

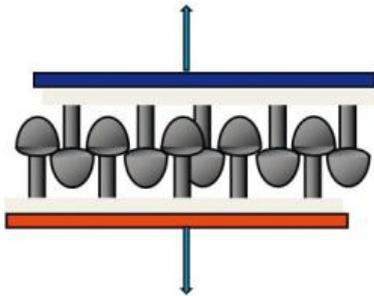


Abb. 25: Prinzip der Haftzugprüfung einer Pilzkopf-Pilzkopf-Klettverbindung, Krüger 2013, 111

3.1.1.2.2 Querlast

Die Scherfestigkeit bemisst die maximale Querbelastung im Verhältnis zu einer Verbindungsfläche bei einer längs gerichteten Zugbeanspruchung, siehe nachfolgende Abbildung. Die maximale Querlast hängt von geometrischen Bedingungen sowie materialspezifischen und lastspezifischen Eigenschaften ab. Einflussfaktoren auf die Festigkeit sind die Flexibilität, das Verformungsverhalten, das Materialversagen sowie die Lastrichtung in Bezug auf die Ausrichtung der Klettelemente. Ein Pilzkopfsystem besitzt eine regelmäßige Struktur bei nicht gerichteten Klettelementen, die Scherfestigkeit ist von der Lastrichtung unabhängig. Ein Hakensystem besitzt gerichtete Hakenelemente, je Lastangriffsrichtung können unterschiedliche Scherfestigkeiten angenommen werden. Grundsätzlich kommt es unter Querlast nicht zu einem Spontanversagen, sondern zu einem „abrutschen“ der Verbindungspartner. Die maximale Querlast steigt nicht proportional mit der Klettfläche oder der Anzahl an Verbindungselementen. Nach einem Versuch von Georg Krüger in dem Buch *Klettverschlüsse - Materialien, Herstellung, Prüfung, Anwendungen* zeigt eine Verdoppelung der Klettfläche eine Erhöhung der maximalen Querlast um 33,3%.¹¹³

¹¹² Vgl. Krüger 2013, 76–114.

¹¹³ Vgl. Ebda., 102–111.

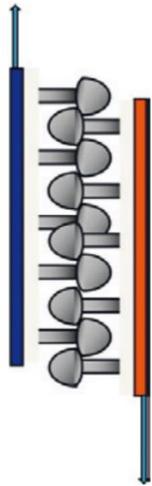


Abb. 26: Prinzip der Scherzugprüfung einer Pilzkopf-Pilzkopf-Klettverbindung, Krüger 2013, 105

3.1.1.2.3 Schällast

Die Schällast entspricht einer linear wirkenden Kraft um eine Klettkomponente von einer Fläche oder einem Verbindungspartner zu lösen. Dem Anspruch der häufigen Wiederholbarkeit der Verbindung infolge eines möglichst einfachen Trennvorgangs folgend, ist die maximale Schällast, im Gegensatz zu Zuglast und Scherlast, möglichst gering und wird von last-, geometrie- und materialspezifischen Eigenschaften beeinflusst. Für einen einfachen Schälvorgang ist die Flexibilität der Basis der abzulösenden Klettkomponente wie auch der Klettelemente von besonderer Bedeutung.¹¹⁴

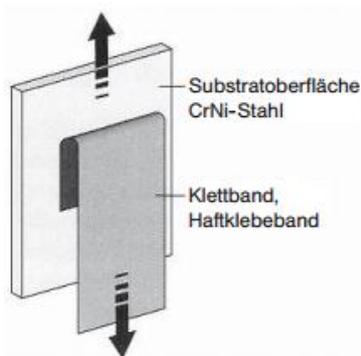


Abb. 27: Prinzip der Schälzugprüfung flexibler Klettbänder oder Haftklebstoffbeschichtungen unter 180°, Krüger 2013, 98

¹¹⁴ Vgl. Krüger 2013, 75–99.

3.1.1.2.4 Reibungskraft

Die Maximallast einer Klettverbindung wird zudem durch die Reibung zwischen Klettelementen beeinflusst (vor allem bei Pilzkopf-Pilzkopfverbindungen).¹¹⁵ Reibungskraft (Haftkraft oder Gleitreibungskraft) setzt sich aus einem Verhältnis zwischen Anpresskraft und einem material- sowie oberflächenabhängigen Koeffizienten (Haftungskoeffizient oder Gleitreibungszahl) zusammen. Dieser Koeffizient ist eine dimensionslose physikalische Größe und von den jeweiligen Versuchsmaterialien und deren Oberflächenbeschaffenheit aber auch der Temperatur, Feuchtigkeit und der Größe der Normalkraft abhängig. Daraus folgen mögliche Ungenauigkeiten in diesen Werten.¹¹⁶

Bei Kunststoffen kommt die Gleitreibungszahl zur Anwendung und wird in weiterer Folge für die Stoffe Polyamid (Klettelemente der Schlaufenkomponenten *Flausch*¹¹⁷ und *Velour*¹¹⁸), Polypropylen (Klettelemente der Einhängekomponente *Duotec*¹¹⁹) sowie für den Rohbaustoff Beton angegeben. Die Bestimmung des Koeffizienten bei Kunststoff erfolgt durch Versuche mit einem Anpressdruck von 0,15 – 1 MPa und einer Gleitgeschwindigkeit von 0,5 m/s gegen gehärteten Stahl mit einer Rautiefe von 2,4 mm¹²⁰. Der Reibungskoeffizient von *Polyamid 6 (PA 6)* beträgt 0,38-0,45¹²¹, der von *Polypropylen Homopolymer (PP-H)* 0,30-0,40¹²². Der Reibungskoeffizient von erhärtetem Beton mit rostfreiem Stahl wurde in der Arbeit *Friction in temporary works* von Pallett Peter, Gorst Nicholas, Clark Leslie und Williamson S. anhand von drei Belastungsstufen (0 kg, 25 kg, 50 kg) auf einem sich hebenden Kipptisch gemessen und auf einen Wert von 0,50 gemittelt.¹²³ Infolge des (geringfügig) höheren Reibungskoeffizienten des Baustoffes Beton und Erfahrungswerten wird angenommen, dass zwischen Beton und Polyamid oder Polypropylen eine höhere Reibungskraft herrscht als bei einer Polyamid-Polypropylen-Kombination.

Neben material- sowie oberflächenspezifischen Bedingungen kann die Reibungskraft geometrisch, durch eine Maximierung der Berührungs- und somit Reibfläche erhöht werden. Dahingehend wird abschließend die Arbeit *Modeling the adhesion between nanoneedle surfaces bonded based on Velcro® or Gecko principle* der Autoren Shervin Keshavarzi, Ulrich Mescheder und Holger Reineck dargestellt. Auf dem Prinzip der Klettverbindung aufbauend, besteht der Gegenstand dieser Untersuchung im Mechanismus der Verbindung nanoskopischer, nadelähnlicher Oberflächen. Das zugrunde liegende exemplarische Modell, sowie die hergestellten und getesteten Nadelflächen sind nachfolgend abgebildet.¹²⁴

¹¹⁵ Vgl. Krüger 2013, 130.

¹¹⁶ Vgl. Dankert/Dankert 2013, 133–134.

¹¹⁷ Vgl. Gottlieb Binder GmbH & Co KG 2018b.

¹¹⁸ Vgl. Gottlieb Binder GmbH & Co KG 2018e.

¹¹⁹ Vgl. Gottlieb Binder GmbH & Co KG 2018a.

¹²⁰ Vgl. Kern GmbH, Reibbeiwert, <https://www.kern.de/de/kunststofflexikon/reibbeiwert>, 14.04.2020.

¹²¹ Vgl. Kern GmbH, Polyamid 6 (PA 6), https://www.kern.de/de/technisches-datenblatt/polyamid-pa-6?n=1102_1, 14.04.2020.

¹²² Vgl. Kern GmbH, Polypropylen Homopolymer (PP-H), https://www.kern.de/de/technisches-datenblatt/polypropylen-pp-h?n=1502_1, 14.04.2020.

¹²³ Vgl. Pallett u.a. 2003, 7–20.

¹²⁴ Vgl. Keshavarzi/Mescheder/Reinecke 2013, 864–865.

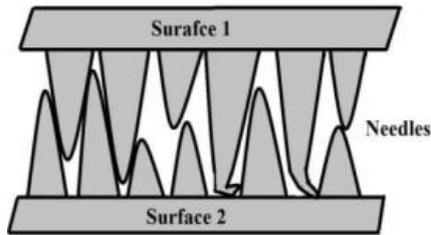


Abb. 28: Verbundprinzip der Nadelflächen, Keshavarzi/Mescheder/Reinecke 2013, 865

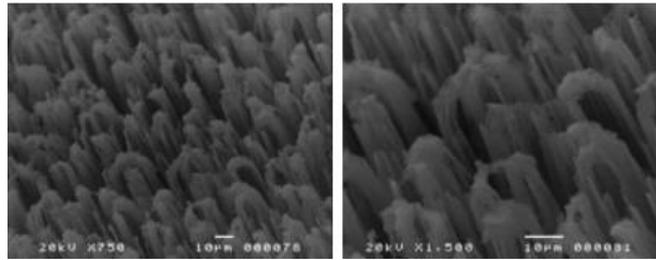


Abb. 29: Mikroskopische (SEM) Aufnahmen der hergestellten Nadelflächen mit 750-facher (li) und 1500-facher Vergrößerung (re), Keshavarzi/Mescheder/Reinecke 2013, 866

Die Herstellung der Testkörper erfolgte durch den chemischen Produktionsprozess des Eloxierens und einer Bündelung durch Kapillarkraft. Die Versuche wurden durch das Aufeinanderpressen von jeweils zwei 0,4 cm² großer Nadelflächen bei unterschiedlichen Gewichtslasten durchgeführt. Bei einem Anpressdruck von 6,33 kg und einer, laut den Autoren daraus folgenden maximalen Berührungsfläche bei dieser Gewichtslast, konnte eine maximale Kraftübertragung von ca. 11 N festgestellt werden. Ein höherer Anpressdruck verringerte die Kraftübertragung infolge einer Deformation der Nadeln, ein geringerer Anpressdruck aufgrund des sich vergrößernden Abstandes zwischen den Verbindungselementen.¹²⁵

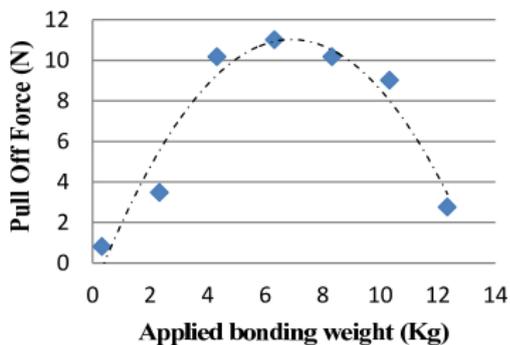


Abb. 30: Versuchsergebnis der Haftzugversuche verbundener Nadelflächen unter unterschiedlichen Anpresslasten, Keshavarzi/Mescheder/Reinecke 2013, 866

¹²⁵ Vgl. Keshavarzi/Mescheder/Reinecke 2013, 866–867.

3.1.1.3 Tragverhalten von Klettelementen

Da das Tragverhalten von Klettverbindungen auf dem Tragverhalten einzelner Klettelemente beruht, wird dieses nachfolgend für natürliche und industrielle Elemente dargestellt und hinsichtlich einer Nachbildung industrieller Komponenten in Beton analysiert.

3.1.1.3.1 Natürliche Klettelemente

Hakenelement

Wie das Paper *Natural hook-and-loop fasteners: anatomy, mechanical properties, and attachment force of the jointed hooks of the Galium aparine fruit* von Elena Gorb, Valentin L. Popov und Stanislav Gorb beschreibt, bestehen die Haken der Frucht *Galium aparine* aus einer Basis, einem Hakenkegel und einem Hakenkopf (siehe nachfolgende Abbildung). Die Basis bildet eine Verbindung mit dem Fruchtkörper und nimmt als Gelenk, aus unterschiedlichen Lastrichtungen resultierende Rotationen des Hakenkegels auf. Der Hakenkegel ist ein Hohlkörper mit einem viskoelastischen Materialverhalten woraus eine gewisse Beständigkeit der Verbindung gegen Biegebeanspruchung resultiert. Der Hakenkopf ist massiv, nach einem Parabelsegment geformt und bildet die eigentliche Verbindung. Anhand von Haftzugversuchen (siehe nachfolgende Abbildung) wurde die Kontakttrennkraft, die maximale Kraftübertragung im Moment des LöSENS der Verbindung verschiedener Haken gemessen und mittels Kraft-Weg-Kurven dargestellt. Aufgrund der großen Vielfalt der Dimensionierung natürlicher Haken wurden Werte zwischen 9.37 mN (Millinewton) und 44.89 mN gemessen.¹²⁶

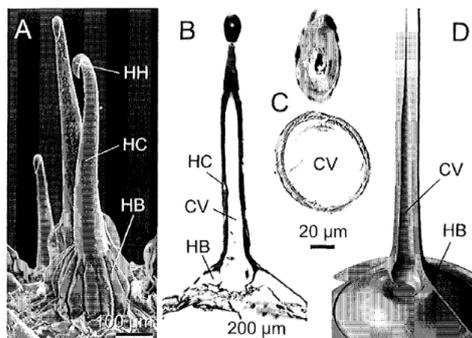


Abb. 31: REM-Aufnahme (A), Längsschnitt, (B), Querschnitt unten und oben (C) und 3D-Modell (D) des Hakenelements der Frucht der Klettpflanze *Galium aparine*, Gorb/Popov/Gorb 2002, 154

HB: Hakenbasis
CV: Hohlraum
HC: Hakenkegel
HH: Hakenkopf

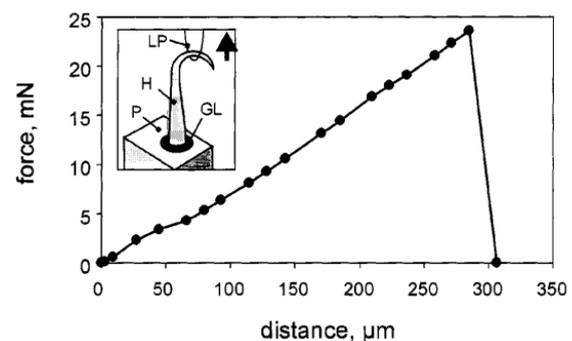


Abb. 32: Versuchsaufbau und Kraft-Weg-Kurve eines Haftzugversuchs eines Hakenelements der Klettpflanze *Galium aparine*, Gorb/Popov/Gorb 2002, 155

GL: Kleber
H: Haken
LP: Stahlschleife
P: Plattform

¹²⁶ Vgl. Gorb/Popov/Gorb 2002, 151–157.

Weiterführende Untersuchungen von Klettelementen der Klettpflanzen *Agrimonia eupatoria*, *Circaea lutetiana* und *Geum urbanum* zeigen, dass ein größeres Hakenelement grundsätzlich eine größere Kraftübertragung ermöglicht, im Detail die Kontakttrennkraft jedoch vor allem durch die Hakenspannweite (sh) und den Durchmesser (dd , dh) beeinflusst wird. Bei der Betrachtung der möglichen Variablen (siehe nachfolgende Abbildungen) wurde festgestellt, dass die Kontakttrennkraft der Haken mit einer Zunahme der Hakenspannweite sowie des Durchmessers am Hakenende (sh/dd) und einer Zunahme der Hakenspannweite sowie des Durchmessers des Hakens (sh/dh) linear abnimmt, eine Steigerung des Durchmessers des Hakens wie auch des Durchmessers am Hakenende (dh/dd) zu einer exponentiellen Zunahme der möglichen Kraft führt, als auch eine Zunahme des Durchmessers des Hakens sowie der Hakenlänge (sh/lh) zu einer raschen, dann gleichbleibenden Abnahme der Kontakttrennkraft führt. Eine geometriebedingt höhere Flexibilität des Hakenkopfes führt daher eher zu einer Verformung und einem verfrühten Lösen der Verbindung, ein größerer Durchmesser des Hakenelements zu einer höheren Kontakttrennkraft.¹²⁷

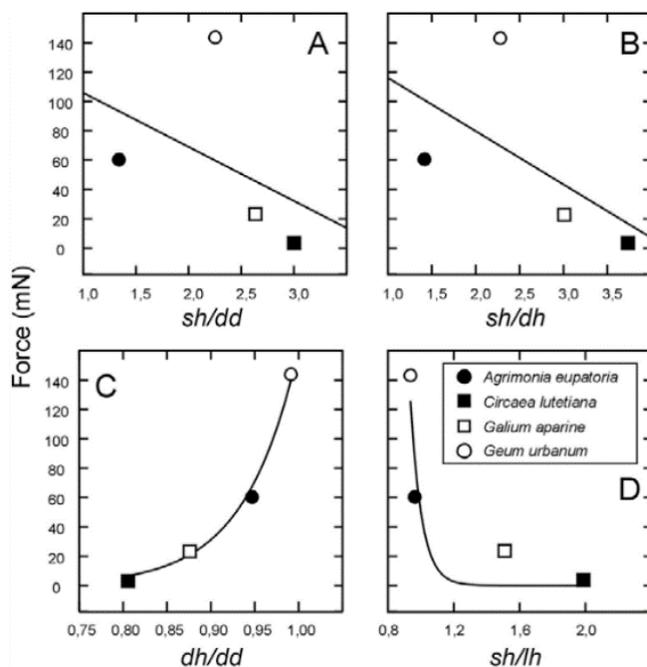


Abb. 33: Morphologische Einflüsse auf die Kontakttrennkraft pflanzlicher Haken, Gorb/Gorb 2002, 379
 sh : Hakenspannweite
 lh : Hakenlänge
 dh : Hakendurchmesser
 dd : Durchmesser am Hakenende

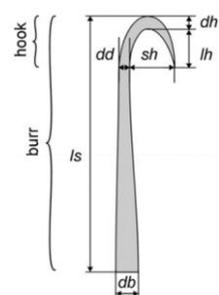


Abb. 34: Schematische Darstellung morphologischer Hakenvariablen, Gorb/Gorb 2002, 380
 sh : Hakenspannweite
 ls : Länge der Klette
 lh : Hakenlänge
 dh : Hakendurchmesser
 dd : Durchmesser am Hakenende
 db : Durchmesser an der Basis

¹²⁷ Vgl. Gorb/Gorb 2002, 375–378.

Wird ergänzend die Hakenlänge (lh) oder die Länge der Klette (ls) erhöht, entsteht bei gleicher Belastung eine stärkere Verschiebung und Verformung. Das Klettelement ist biegeweicher und es kommt früher zu einem Lösen der Verbindung.¹²⁸ Diese Kraft-Weg-Beziehung ist in nachfolgender Abbildung dargestellt.

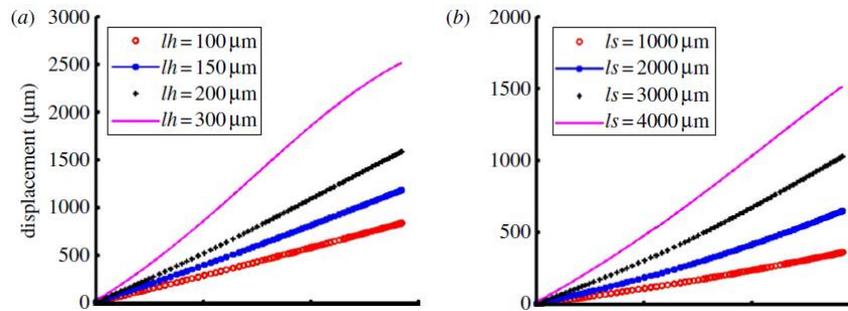


Abb. 35: Einfluss der Hakenlänge und der Klettenlänge auf das mechanische Verhalten pflanzlicher Haken, Chen u.a. 2013, 3
 ls : Länge der Klette, h : Hakenlänge

Pilzkopfelement

Verbindungselemente mit einer pilzkopffähnlichen Form werden in der Natur beispielsweise bei Libellen vorgefunden. Diese Elemente dienen dazu, den Kopf im Falle hoher Belastungen, während der Nahrungsaufnahme oder beim Flug, zu fixieren und ruhig zu stellen. Die Verbindung der Körpersegmente Kopf und Hals erfolgt aufgrund korrespondierender „Auswüchse“, die je nach Libellenart hakenförmig, pilzkopfförmig, parabolisch, keulenförmig oder plattenförmig ausgebildet sind, siehe nachfolgende Abbildung.¹²⁹ Die Aktivierung oder Herstellung der Verbindung verläuft passiv und erfolgt durch flexible „Federn“ zwischen Kopf und Hals. Die Deaktivierung der Verbindung entsteht durch Muskelkraft. Werden die Abduktionsmuskeln kontrahiert, verlieren die Verbindungsflächen den Kontakt und der Kopf ist frei. Es wird angenommen, dass die Stabilität der Verbindung durch die verschiedenen Formen der Verbindungselemente und nicht durch eine Vergrößerung der Kontaktfläche gesteuert wird.¹³⁰

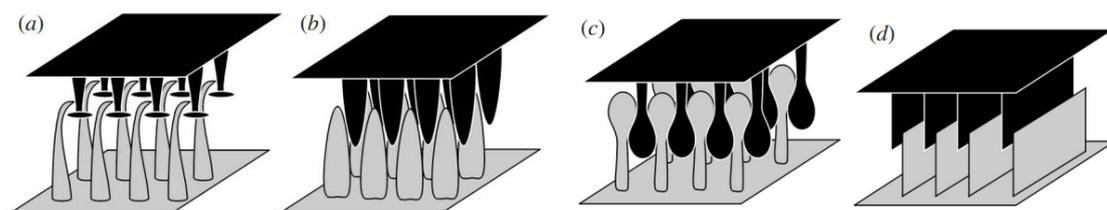


Abb. 36: Verbindungselemente unterschiedlicher Libellenarten, Gorb/Popov 2002, 214
 a) hakenförmige Elemente und pilzkopfförmige Elemente, b) Parabolische Elemente
 c) Keulenförmige Elemente, d) Plattenförmige Elemente

¹²⁸ Vgl. Chen u.a. 2013, 6–7.

¹²⁹ Vgl. Gorb/Popov 2002, 213.

¹³⁰ Vgl. Gorb 1999, 526–529.

Schlaufenelement

Im Rahmen des Sondierungsprojektes *Klett-TGA* konnten anhand von Faserstrukturen an den Blattbasen verschiedener Palmarten pflanzliche Schlaufenkomponenten identifiziert werden, siehe nachfolgende Abbildungen. Auf eine auf geometrischer Analyse basierenden Auswahl entsprechender Strukturen folgte ein qualitativer Nachweis der Klettfähigkeit (der grundsätzlichen Funktionalität als Schlaufenkomponente) durch Tastversuche mit industriellen Klettkomponenten in Pilzkopf- sowie Hakenform. Trotz vereinzelt hoher Klettfähigkeit (siehe nachfolgende Abbildung) kam es rasch zu einer Überschreitung der Maximallast und einem Bruch der spröden Fasern oder einem Lösen aus dem Verbund der Faserstruktur.¹³¹



Abb. 37: Fotografie der Faserstruktur der Palme *Livistona chinensis*, Institut für Architekturtechnologie, TU Graz



Abb. 38: Fotografie der Faserstruktur der Palme *Cocos nucifera*, Institut für Architekturtechnologie, TU Graz



Abb. 39: Mikroskopische Detailaufnahme der Faserstruktur der Palme *Livistona chinensis* im Verbund mit dem Klettprodukt Pressotex® 75161, Florian Mittermayr, Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie, TU Graz



Abb. 40: Mikroskopische Detailaufnahme der Faserstruktur der Palme *Cocos nucifera* im Verbund mit dem Klettprodukt Pressotex® 75161, Florian Mittermayr, Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie, TU Graz

¹³¹ Vgl. Riewe u.a. 2019, 59–62.

3.1.1.3.2 Industrielle Klettelemente

Der wesentliche Unterschied industrieller Klettelemente zu ihren natürlichen Vorbildern besteht in der Materialität. Die geometrische Form natürlicher Klettelemente wird grundsätzlich nachgeahmt und um weitere Geometrien ergänzt. Eine Einteilung nach dieser Form erfolgt erneut in Hakenelemente, Pilzkopfelemente und Schlaufenelemente. Das Trag- oder Ablöseverhalten unter Schälzugbelastung dieser Klettelemente wird in weiterer Folge anhand *The peeling of flexible probabilistic fasteners* der Autoren J. A. Williams, S. G. Davies und S. Frazer beschrieben, um das Tragverhalten im Verbund wie auch eine geometrische Beschreibung industrieller Produkte ergänzt und hinsichtlich des Forschungsziels, einer Nachbildung in Beton, untersucht.

Hakenelement

Hakenkomponenten stellen die ursprünglichste Form der Klettverbindung und die erste Gruppe von industriellen Einhängekomponenten dar. Ein Verbindungspunkt einer Hakenkomponente kann wie nachfolgend abgebildet, durch einen Haken und eine Schlaufe gebildet werden. Wird der Verbindungspartner, die Schlaufe, unter einem entsprechenden Winkel auf Zug belastet, verformt sich der Haken bis die Schlaufe beginnt abzugleiten und sich schlussendlich vollständig löst. Als Einflussfaktoren auf das Löseverhalten bestehen die Abmessungen des Hakens sowie die materialspezifischen Verformungseigenschaften. Die Reibung zwischen diesen Verbindungselementen spielt laut Williams, Davies und Frazer eine eher untergeordnete Rolle.¹³²

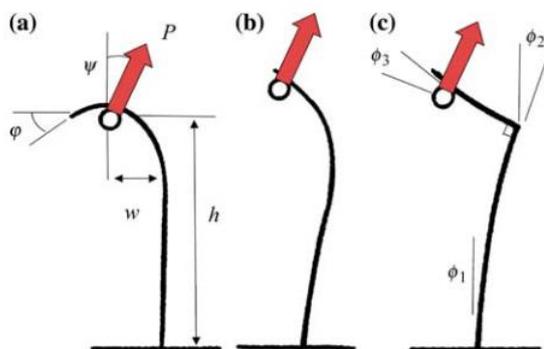


Abb. 41: Lösemechanismus eines industriellen Haken-Klettelements im Verbund mit einer Schlaufe unter Schälzugbelastung, Williams/Davies/Frazer 2007, 217
 a) Die Kraft P wirkt im Winkel ψ auf einen Kletthaken mit einer wirksamen Länge h .
 b) Der Haken verformt sich in Lastrichtung, die Schlaufe beginnt abzugleiten.
 c) Darstellung als zwei geradlinige, elastische Balken. Die Winkel ϕ_1 , ϕ_2 und ϕ_3 beschreiben Rotationen oder Neigungsänderungen der Balken unter Last.

¹³² Vgl. Williams/Davies/Frazer 2007, 217.

Grundsätzlich entspricht eine Haken-Schlaufenkomponenten-Verbindung einer Gruppenbefestigung mit vielen einzelnen Haken in Verbundwirkung. Es wird angenommen, dass das Tragverhalten und Ablöseverhalten der einzelnen Hakenelemente im Verbund mit vorangehender Darstellung übereinstimmt. Abweichungen können je nach Lastrichtung, oder im Falle von Verbindungspunkten mit mehreren, benachbarten Schlaufen, aufgrund der ungleichmäßigen Mehrfachbelastung auftreten. Für unterschiedlich gerichtete Lasten sowie die Herstellung einer Klettverbindung zwischen Haken- und Schlaufenkomponente können zudem an der Basis gelenkige und somit bewegliche Haken besser geeignet sein. Versuche im Rahmen der Arbeit *Natural hook-and-loop fasteners: anatomy, mechanical properties, and attachment force of the jointed hooks of the Galium aparine fruit* von Elena Gorb, Valentin L. Popov und Stanislav Gorb mit einzelnen, mittels Lasche aus Stahldraht um eine Nadel befestigten industriellen Haken ließen gegenüber aufgeklebten Haken den Schluss einer erhöhten Chance auf eine Verbindung sowie eine bessere Lastaufnahme bei unterschiedlich gerichteten Lasten zu, da so benachbarte Schlaufen vermehrt an der Verbindung mitwirken konnten.¹³³

Nachfolgende Abbildungen zeigen eine typische Hakenkomponente im Detail (li) und das dieser Hakenform entsprechende Produkt *Klettostar®* im Verbund mit *Klettostar® Flausch* von *Gottlieb Binder GmbH & Co KG* (re) aus dem Material Polyamid. Die Haken sind eher dicht angeordnet, der Abstand zwischen den Elementen beträgt in etwa der Länge der Hakenelemente (in Draufsicht). In ihrer geometrischen Form sind sie dem natürlichen Vorbild nachempfunden und beschreiben ein Parabelsegment. In Kombination mit dem Produkt *Klettostar® Flausch* beziffert das Produktdatenblatt des Produktes *Klettostar®* eine Haftfestigkeit von 3 N/cm^2 , eine Schälfestigkeit von ca. $2,3 \text{ N/cm}$ und eine Scherfestigkeit von ca. 10 N/cm^2 .¹³⁴



Abb. 42: Haken-Klettkomponente mit parabelförmigen Klettelementen, Krüger 2013, 12



Abb. 43: Produktfoto der Klettprodukte *Klettostar®* und *Klettostar® Flausch*, *Gottlieb Binder GmbH & Co KG*

Aufgrund der vielfältigen Herstellungsmethoden von Klettprodukten kann die Form eines Hakenelements zudem einer palmartigen, T-förmigen oder Y-förmigen Geometrie entsprechen, siehe nachfolgende Abbildungen. Unterschiede zu oberem Hakenelement bestehen in der doppelseitigen, sowie insgesamt stärkeren Ausführung der Haken als auch der Form der Hinterschneidungen. Der Hakenkopf eines palmartigen Hakens entspricht zwei flach verlaufenden

¹³³ Vgl. Gorb/Popov/Gorb 2002, 156-158

¹³⁴ Vgl. *Gottlieb Binder GmbH & Co KG* 2018c.

Bogensegmenten, der Kopf des T-förmigen Hakens in etwa einem zum Komponentengrund parallelen Balken und das Y-förmige Hakenelement zwei geschwungenen und an den Enden auf halber Höhe verbundenen Bögen. Der Abstand zwischen den Elementen beträgt in der Draufsicht in etwa eine Hakenlänge und geht darüber hinaus (palmartigen Klettelemente). Hervorzuheben ist die zum Verbindungspartner geneigte Hinterschneidung des Y-förmigen Hakenelements woraus ein sofortiges Abgleiten der Klettelemente des Verbindungspartners folgen müsste. Es wird angenommen, dass der Verbund mit einer Schlaufenkomponente infolge von einseitig angeordneten Widerhaken (zu sehen in nachfolgender Abbildung (re) an der Außenseite des weißen linken Hakenbogens), sowie der Verbundwirkung der einzelnen Haken zustande kommt. Für das grundsätzliche Löseverhalten der nachfolgend abgebildeten Klettelemente wird angenommen, dass die erhöhte Materialstärke eine verringerte Verformung zur Folge hat, es ansonsten jedoch zu keinen Abweichungen zu oben dargestellten Lösemechanismus kommt.



Abb. 44: Haken-Klettkomponente mit palmartigen Klettelementen, Krüger 2013, 13



Abb. 45: Haken-Klettkomponente mit Y-förmigen Klettelementen, Krüger 2013, 11

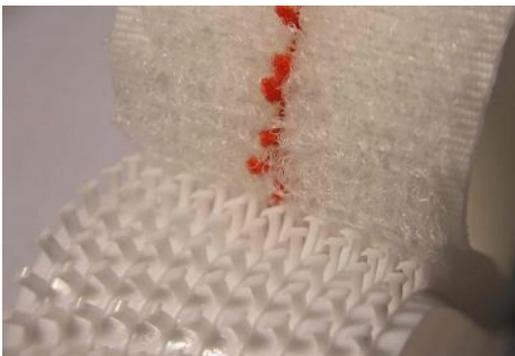


Abb. 46: Produktfoto der Klettprodukte Klettplast® und Klettplast® Flausch, Gottlieb Binder GmbH & Co KG

Eine Sonderform der Hakenprodukte ist *Metaklett* (siehe nachfolgende Abbildungen) und soll dieses Kapitel abschließend untersucht werden. Dieses Produkt besteht aus Klettcomponenten, die durch das Stanzen¹³⁵ eines rost- und säurebeständigen Chrom-Nickel-Stahlblechs hergestellt werden. Das Blech ist austenitisch, gut schweißbar und chemisch wie auch thermisch beständig.¹³⁶ Neben der Materialität besteht der größte Unterschied zu den bislang beschriebenen Klettsystemen in der Anzahl der Hakenelemente pro Fläche und der Geometrie der Schlaufenelemente. Da *Metaklett*-Komponenten aus einem Stück hergestellt werden, ist die Anzahl an Klettelementen stark begrenzt. Dementsprechend kommt es bei der Komponentenkombination *Flamingo* mit *Lochblech* oder *Entenkopf* mit *Stanzflausch* zur Verbindung jeweils eines Hakenelements mit immer nur einem Schlaufenelement.¹³⁷

Das Hakenelement *Flamingo* wird aus jeweils zwei gegenüberliegend angeordneten gebogenen Haken mit zum Verbindungspartner geneigten Hinterschneidungen gebildet. Die Verbindung mit der Komponente *Lochblech*, einer Schlaufenkomponente mit Klettelementen in Form quadratischer Ausnehmungen, erfolgt durch Spreizwirkung und ein Verhaken im Gegenstück. Die Klettelemente der Ausführungsform und Einhängekomponente *Entenkopf* werden durch zwei nebeneinander angeordnete Haken, mit zum Verbindungspartner geneigten Hinterschneidungen gebildet. Aufgrund dieser Geometrie wird angenommen, dass die Verbindung mit der Komponente *Stanzflausch*, mit Klettelementen in Form mehrerer Schlaufen aus Blech, wie auch mit einem herkömmlichen Textilflausch, infolge einer starken Verbundwirkung der einzelnen Haken entsteht.¹³⁸ Dementsprechend stehen die jeweiligen zwei Haken in einem Nahverhältnis, während der Abstand zu den anderen Hakenelementen erhöht ist.

Für die Komponentenkombination *Entenkopf* mit *Stanzflausch* kann bei 23°C eine Haftfestigkeit von ca. 9N/cm², eine Schällast von ca. 3N/cm und eine Scherfestigkeit von ca. 41 N/cm² angenommen werden. Bei 200°C wird eine Haftfestigkeit von ca. 9 N/cm², eine Schällast von ca. 4 N/cm und eine Scherfestigkeit von ca. 54 N/cm² erreicht.¹³⁹



Abb. 47: *Metaklett-Klettverbindung bestehend aus den Komponenten Flamingo und Lochblech, Höhe u.a. 2009, 44*

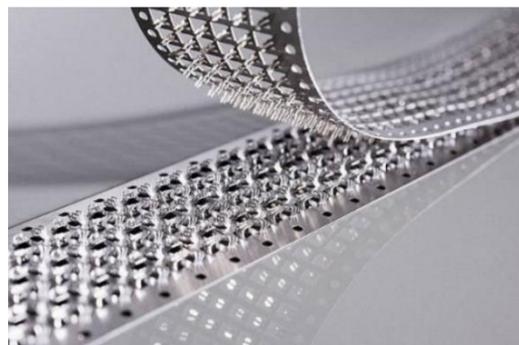


Abb. 48: *Metaklett-Klettverbindung bestehend aus den Komponenten Entenkopf und Stanzflausch, Höhe u.a. 2009, 44*

¹³⁵ Vgl. Höhe u.a. 2009, 44–45.

¹³⁶ Vgl. Reinz-Dichtungs-GmbH/Hölzel Stanz - und Feinwerktechnik GmbH & Co.KG/Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München 2010, 1.

¹³⁷ Vgl. Höhe u.a. 2009.

¹³⁸ Vgl. Ebda.

¹³⁹ Vgl. Reinz-Dichtungs-GmbH/Hölzel Stanz - und Feinwerktechnik GmbH & Co.KG/Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München 2010, 4.



Abb. 49: Metaklett-Klettverbindung bestehend aus den Komponenten Entenkopf und Textilflausch, Höhe u.a. 2009, 44

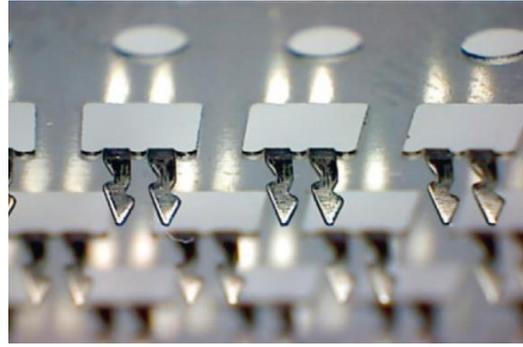


Abb. 50: Detailaufnahme des Metaklett-Klettelements Entenkopf, Krüger 2013, 13

Die zu Beginn des Kapitels angeführte und für das Funktionsprinzip der herkömmlichen Klettverbindung wesentliche Flexibilität der Einhängeelemente wie auch der darauf beruhende Lösemechanismus kann nicht in Beton nachgebildet werden. Aufgrund der Erkenntnisse des Kapitels *Stand der Technik* wird jedoch angenommen, dass bei entsprechender Ausbildung und Steuerung des Verbindungspartners eine Klettfähigkeit erreicht, wie auch Beschädigungen der Betonstruktur vermieden werden können. Zudem ist die Anwendung von Verbindungspartnern, die mit herkömmlichen Schlaufenkomponenten vergleichbare Eigenschaften aufweisen, bei Anwendung spezieller Trennwerkzeuge oder auch Trennmethoden, denkbar.

Für das Ziel der Nachbildung von industriellen Hakenelementen in Beton ist vor allem das geometrische Detail der zum Komponentengrund parallelen (T-förmiges Hakenelement) oder auch Richtung Verbindungspartner geneigten Hinterschneidungen (Y-förmiges Hakenelement und *Metaklett-Entenkopf*) hervorzuheben. Im Hinblick auf die Verarbeitung von Frischbeton wird angenommen, dass diese Geometrien eher herzustellen sind. Des Weiteren wird angenommen, dass für eine erfolgreiche Nachbildung in Beton die Hakenelemente, verglichen mit industriellen Produkten, entsprechend größer zu skalieren sind.

Pilzkopfelement

Pilzkopfkomponenten entsprechen der zweiten Gruppe industriell gefertigter Einhängekomponenten. Ein Verbindungspunkt kann durch einen Pilzkopf und eine Schlaufe, oder wie nachfolgend dargestellt (im Randbereich der Verbindung) durch einen Pilzkopf und einen weiteren Pilzkopf (in der Regel zwei Pilzköpfe) gebildet werden. Unter der Belastung P kommt es zu einer Verformung der Klettelemente um den Betrag δ bis die Pilzköpfe beginnen abzugleiten und sich die Verbindung schlussendlich vollständig löst. Das Belastungsverhalten hängt von der Belastung P , der möglichen Verformung δ , den Abmessungen und der Geometrie der Elemente sowie dem Elastizitätsmodul ab.¹⁴⁰

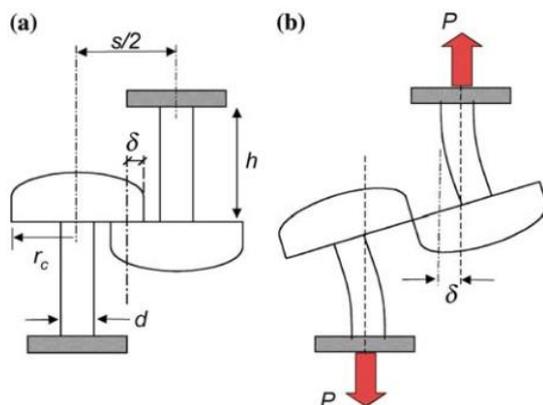


Abb. 51: Lösemechanismus eines industriellen Pilzkopf-Klettelements im Verbund mit einem Pilzkopf unter Schälzugbelastung, Williams/Davies/Frazer 2007, 219
 a) Ausgangssituation zwei Pilzköpfe im Verbund.
 b) Aus der Schälzugbelastung resultiert die Kraft P , eine Verformung des Schaftes um den Betrag δ und ein Abgleiten der Verbindungspartner.

Eine Pilzkopf-Pilzkopfkomponenten-Verbindung entspricht einer Gruppenbefestigung. Die flächige Verbindung wird durch einen Pilzkopf im Verbund mit, je nach Struktur, drei oder vier komplementären Pilzköpfen gebildet, wovon jeder einzelne Pilzkopf wiederum mit drei oder vier Pilzköpfen im Verbund steht (die Randsituation der Klettverbindung entspricht oberer Darstellung). Daher wird angenommen, dass es unter zentrischer Zuglast wie auch unter Querlast, bis zur Überschreitung der Höchstlast, zu einer Verformung auch im Bereich der Pilzkopfköpfe kommt.

Nachfolgend sind ein herkömmliches Pilzkopfprodukt sowie eine Variation in Dreiecksform abgebildet. Der Durchmesser eines regulären, halbkugelförmigen Pilzkopfkopfes beträgt ca. 1,15 mm, der Durchmesser des zylinderförmigen Pilzkopfschaftes 0,5 mm und die Gesamthöhe der Pilzkopfelemente 3,1 mm. Die Dichte der Klettelemente liegt zwischen 20-60 Stück/cm², bei speziellen Anwendungen bei bis zu 280 Stück/cm².¹⁴¹ Der Abstand zwischen den Pilzkopfelementen entspricht in der Regel dem Durchmesser der jeweiligen Elemente.

¹⁴⁰ Vgl. Williams/Davies/Frazer 2007, 219.

¹⁴¹ Vgl. Krüger 2013, 20.



Abb. 52: Pilzkopf-Klettelemente auf schwarzer Bindemittelschicht, Krüger 2013, 20



Abb. 53: Pilzkopf-Klett Komponente mit dreieckigen Klettelementen, Krüger 2013, 19

Das Produkt *Duotec® 50* von *Gottlieb Binder GmbH & Co KG* (siehe nachfolgende Abbildung) entspricht einer herkömmlichen Pilzkopfkomponente und kann mit entsprechenden Schlaufenkomponenten wie auch mit sich selbst eine Klettverbindung herstellen. Die Basis, der Grund der Komponente, besteht aus Polyamid mit Polyurethanbeschichtung, die Pilzköpfe aus Polypropylen. Die Haftfestigkeit als Pilzkopf-Pilzkopf-Kombination beträgt 35 N/cm^2 bei einer Dichte von ca. 42 Stück/cm^2 .¹⁴²

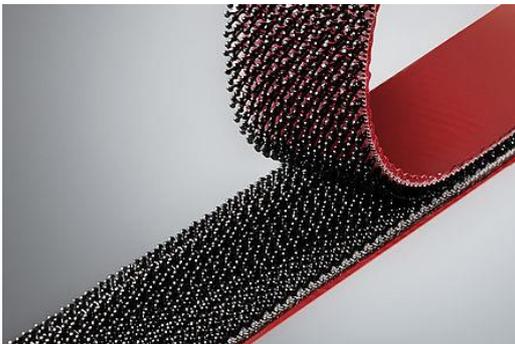


Abb. 54: Produktfoto des Klettproduktes *Duotec® 50*, *Gottlieb Binder GmbH & Co KG*

Da die Klettelemente von industriellen Pilzkopfkomponenten in der Regel mit rundum gleichmäßigen, zur Bauteiloberfläche parallelen Hinterschneidungen gebildet werden, wird im Hinblick auf eine Nachbildung dieser Klettelemente in Beton und die Verarbeitung des Frischbetons angenommen, dass diese Form der Hinterschneidung nachgebildet werden kann. Wie beim vorangehenden Klettelement ist eine größere Skalierung der Klettelemente vorzunehmen. Zudem ist erneut darauf hinzuweisen, dass aus Beton hergestellte Klettelemente keine Flexibilität aufweisen und hinsichtlich der Herstellung der Verbindung wie auch des Lösens, seitens des Verbindungspartners, entsprechend reagiert werden muss.

¹⁴² Vgl. Gottlieb Binder GmbH & Co KG 2018a.

Schlaufenelement

Schlaufenkomponenten bilden anhand ihrer Klettelemente in Schlaufenform den komplementären Verbindungspartner von Einhängekomponenten. Die Schlaufen weisen eine hohe Anzahl pro Fläche wie auch eine gewisse Vielfalt und Unregelmäßigkeit auf. Die Belastung einzelner Schlaufen im Verbund kann daher unterschiedlich sein.¹⁴³ Wird die einwirkende Last zu groß, kommt es zu einer Verformung der Einhängeelemente und einem Versagen der Verbindung durch ein Abgleiten der Schlaufe,¹⁴⁴ oder auch durch Materialversagen.

Die geometrische Form der Klettelemente entspricht einer Schlaufe oder Schlinge in unterschiedlichen Materialstärken mit aus der Schlaufenlänge und der materialspezifischen Steifigkeit resultierenden Krümmungsradien. Die einzelnen Schlaufen sind an ihren Enden gelagert oder verankert. Unter Belastung entsteht eine Verformung und Dehnung entlang der Schlaufenachse. Normalkräfte wirken durch Zug an den Enden der Schlaufen,¹⁴⁵ sowie an der Position der Verbindung mit dem Einhängeelement, in der Regel dem Scheitelpunkt der Schlaufe. Das Tragverhalten ist mit einem entsprechend biegesteifen Seil zu vergleichen, das bedeutet, dass Zuglasten aber auch Querlasten anhand von Umlenkkraften, bestehend aus Längskraft und Neigung, abgeleitet werden können¹⁴⁶.

Nachfolgend sind die Produktvariationen *Flauchband*, *Veloursband* und *Vlies* abgebildet. Vlies besitzt regellose Fasern, Flauch wie auch Velour in der Regel geordnete Schlaufen in unterschiedlichen Skalierungsgraden.¹⁴⁷ Das Produkt *Velour* der Firma *Gottlieb Binder GmbH & Co KG* besteht aus zu einer Einheit gewirkten, gerauten Schlingen aus Polyamid mit einer Gesamtstärke von ca. 1,5 mm. Im Verbund mit beispielsweise dem Produkt *Pressotex*[®] (einem Pilzkopfklettprodukt) weist es eine Haftfestigkeit von ca. 16,5 N/cm², eine Schälfestigkeit von ca. 3,5 N/cm und eine Scherfestigkeit von ca. 35 N/cm² auf. Das Produkt *Flauch* von *Gottlieb Binder GmbH & Co KG* besteht aus gewebten, gebürsteten Schlingen aus Polyamid mit einer Gesamtstärke von ca. 2,5 mm. In Kombination mit *Klettostar*[®] (einem Hakenklettprodukt) besitzt es eine Haftfestigkeit von ca. 4,5 N/cm², eine Schälfestigkeit von ca. 2,3 N/cm und eine Scherfestigkeit von ca. 10 N/cm².¹⁴⁸

¹⁴³ Vgl. Williams/Davies/Frazer 2007, 218.

¹⁴⁴ Vgl. Ebda., 217.

¹⁴⁵ Vgl. Moro u.a. 2009, 410.

¹⁴⁶ Vgl. Dinkler 2017, 229.

¹⁴⁷ Vgl. Krüger 2013, 14.

¹⁴⁸ Vgl. Gottlieb Binder GmbH & Co KG 2018b.

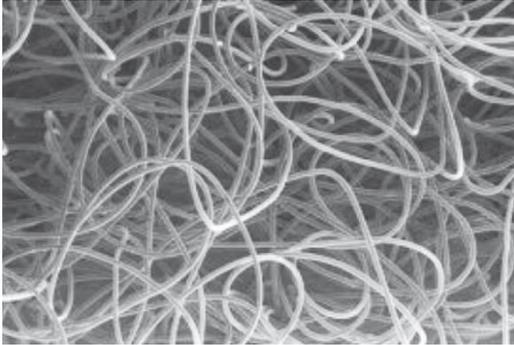


Abb. 55: REM-Aufnahme der Schlaufen-Klett Komponente Vliesband mit ungeordneten Fasern, Krüger 2013, 15



Abb. 56: Produktfoto der Klettprodukte Velour und Klettostar® LS, Gottlieb Binder GmbH & Co KG

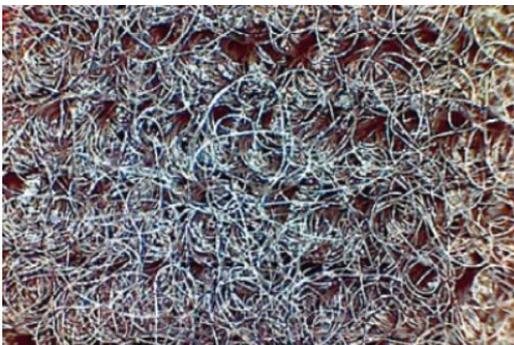


Abb. 57: Schlaufen-Klett Komponente Flauschband mit ungeordneten Schlingen, Krüger 2013, 15

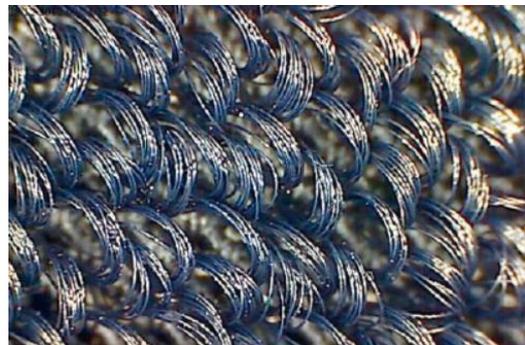


Abb. 58: Schlaufen-Klett Komponente Flauschband mit ausgerichteten Schlingen, Krüger 2013, 15

Für eine Nachbildung von Schlaufenelementen in Beton wird eine Abstrahierung der Klettelemente als „Löcher“ oder Vertiefungen anhand des Vorbildes der *Metaklett* Schlaufenkomponente *Lochblech* (siehe vorangehendes Kapitel *Hakenelement*) angedacht. Im Hinblick auf die Verarbeitung von Frischbeton sind diese Elemente, verglichen mit dem industriellen Produkt, erneut entsprechend größer zu skalieren. Es wird angenommen, dass die biegesteifen Vertiefungen in der Lage sind mit einem aktivier- und deaktivierbaren Verbindungspartner (siehe Kapitel *Stand der Technik*) eine Verbindung einzugehen. Dieser Mechanismus dient der Herstellung wie auch dem Lösen der Verbindung und verhindert Beschädigungen an der Betonstruktur.

3.1.2 Analyse der Befestigungstechnik in Beton

Das Forschungsziel sieht eine Anwendung von Beton als Verbindungskomponente, in Form einer Schlaufenkomponente aber auch Einhängekomponente, im Verbund mit einem entsprechenden Verbindungspartner vor. Aufgrund der Analyse der Klettverbindung im vorangehenden Kapitel wird angenommen, dass Klettelemente aus Beton hinsichtlich des Prinzips der Klettverbindung und angestrebten Klettfähigkeit, im Vergleich mit herkömmlichen Betonbauteilen, sehr kleinteilig (im Millimeterbereich) zu strukturieren sind. Dahingehend werden in diesem Kapitel, infolge einer Analyse des Verhaltens von Beton unter Belastung, des Tragverhaltens von Befestigungen in Beton sowie der Feststellung der Zugfestigkeit dieses Baustoffes, materialspezifische Grundregeln sowie bauteilgeometrische Bedingungen abgeleitet welche in nachfolgende Herstellungskonzepte einfließen. Zudem werden die grundsätzlichen Anforderungen an eine Befestigung in Beton festgestellt.

Da die nachfolgend dargestellten Grundlagen des Tragverhaltens von Befestigungen in Beton anhand stark variierender Verankerungstiefen geschaffen wurden, beispielsweise der Untersuchung des Maßstabeffektes mit Verankerungstiefen von 50-2700 mm von Joško Ožbolt,¹⁴⁹ (und Zementstein unter einer Biegelast ähnliche Bruchigenschaften wie Beton hinsichtlich der Rissbildung besitzt)¹⁵⁰ wird angenommen, dass das Tragverhalten von Befestigungen in Beton grundsätzlich auf geringere Verankerungstiefen, in der Randzone von Beton, übertragbar ist. Inwieweit es von dieser Annahme abweichend, bei Klettbeton im Verbund mit einem Verbindungspartner zu einem abweichenden Tragverhalten kommt, muss in weiterführenden Untersuchungen festgestellt werden.

3.1.2.1 Anforderungen

Eine sicherheitsrelevante Befestigung in Beton erfordert den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit, der Dauerhaftigkeit und der Tragfähigkeit. Je nach Anwendungsfall bedeutet Gebrauchstauglichkeit beispielsweise eine Begrenzung an Verformung, Dauerhaftigkeit einen angemessenen Widerstand gegen Korrosion oder chemische Angriffe und Tragfähigkeit einen Widerstand der Befestigung zumindest den einwirkenden Kräften entsprechend. Die Bemessung der Befestigung erfolgt anhand der Art der auftretenden Lasten sowie der Angriffsrichtung. Nach Lastart werden statische, veränderliche oder dynamische Lasten unterschieden. Statische Lasten sind ständig wirkend, ruhend oder selten auftretend. Veränderliche Lasten zeichnen sich durch häufige Lastwechsel aus. Dynamische Lasten entsprechen Massenkräften und resultieren aus Explosionen, Anpralllasten, Erdbeben oder Maschinen. Nach Lastrichtung werden Zuglasten, Querlasten sowie Kombinationen dieser Lasten unterschieden, siehe nachfolgende Abbildung.¹⁵¹ Ein dahingehender Nachweis wie auch eine Bemessung von Klettbeton im Verbund mit einem Verbindungspartner ist nicht Teil dieser Untersuchung.

¹⁴⁹ Vgl. Ožbolt 1995, 129–130.

¹⁵⁰ Vgl. Zhu/Xu 2007, 3.

¹⁵¹ Vgl. Eligehausen/Mallée 2000, 5–7.

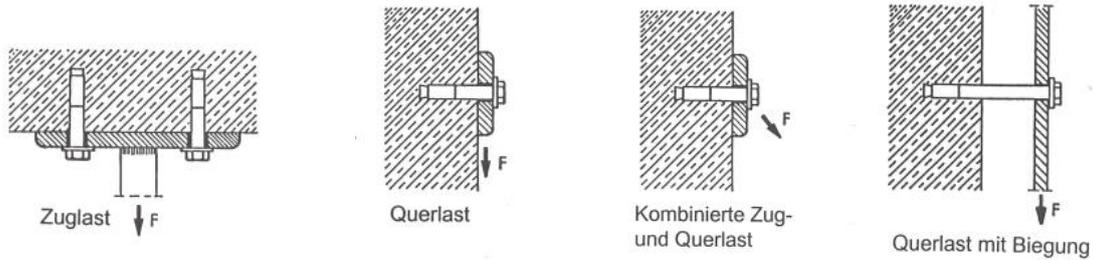


Abb. 59: Beanspruchungsrichtungen von Befestigungen, Eligehausen/Mallée 2000, 7

3.1.2.2 Belastungsverhalten von Beton

Wird Beton zentrisch auf Zug belastet, zeigt der Baustoff ein nahezu linear-elastisches Verhalten bis zu einem Überschreiten der Höchstlast und einem daraus resultierenden Riss an der Position der geringsten Zugfestigkeit. Während die aufnehmbare Belastung stetig abnimmt öffnet sich der Riss bis sich das Bauteil schlussendlich vollständig abtrennt. Diese Last-Verformungskurve ist in nachfolgender Abbildung dargestellt. Zone A bildet den Anteil außerhalb der Rissprozesszone ab, die Betondehnung. Zone B die Rissprozesszone anhand der übertragbaren Spannung in Abhängigkeit zur Rissbreite.¹⁵²

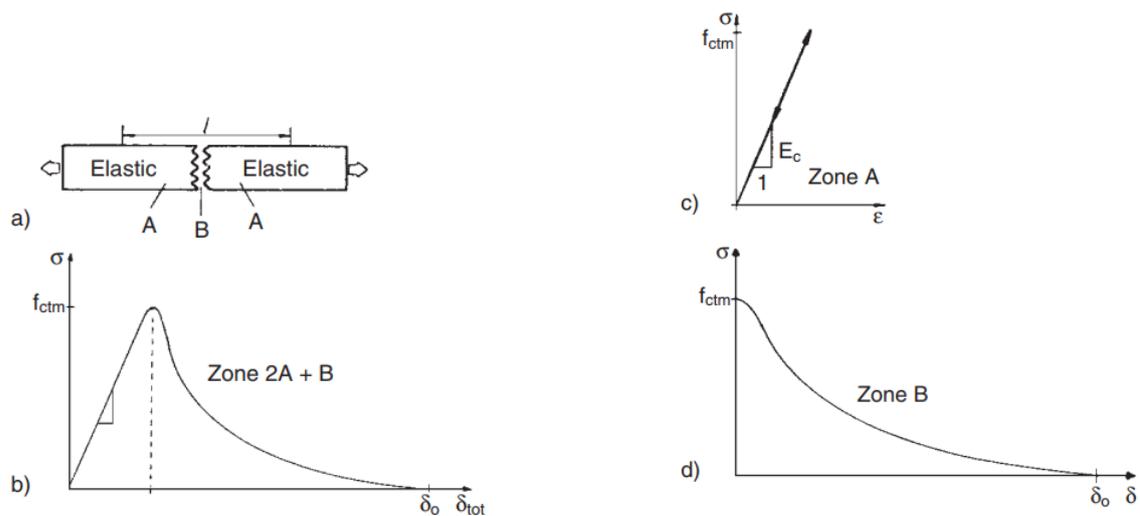


Abb. 60: Verformungslinie von Beton unter Zugbelastung, Reinhardt 1997, 39

- Betonkörper unter zentrischem Zug
- Spannungs-Dehnungskurve des Bauteils
- Spannungs-Dehnungskurve außerhalb der Rissprozesszone
- Spannungs-Dehnungskurve im Riss

¹⁵² Vgl. Eligehausen/Mallée 2000, 37–38.

Das Spannungs-Verformungsverhalten von Beton wird durch den E-Modul, die Betonzugfestigkeit, die Form der Last-Verformungskurve, die Verschiebung und die Bruchenergie beschrieben. Der E-Modul unter Zugbelastung entspricht in etwa dem Wert unter Druckbelastung und wird durch die Bestandteile des Betons und die Ausführungsqualität bestimmt. Die Betonzugfestigkeit ist von der Kraftübertragung zwischen Zementstein und Gesteinskorn und somit von der Betonzusammensetzung, der Zuschlagsmenge, der Kornform, der Oberflächenbeschaffenheit der Körnung sowie dem Größtkorn abhängig. Die Last-Verformungskurve ist von der Betonzusammensetzung aber auch der Geometrie des Bauteiles und der Betondehnung abhängig. Die Bruchenergie bestimmt den Rissfortschritt und beschreibt den Energieaufwand zur Bildung eines Risses. Dieser Wert liegt je nach Betonfestigkeit, Größtkorn und Zuschlagsart zwischen 80 und 200 J/m² (N/m).¹⁵³ Die Verschiebung beschreibt die Rissbreite und bestimmt den Abstand, ab wann keine Kraft mehr übertragen werden kann und eine vollständige Abtrennung des Betonkörpers erfolgt. Dieser Wert beträgt je nach Betonzusammensetzung 0,14-0,2 mm.¹⁵⁴

Wird Beton nun beispielsweise durch einen zentrisch auf Zug belasteten Kopfbolzen beansprucht, so entstehen zunächst Mikrorisse im Lasteinleitungsbereich, die sich bei zunehmender Belastung zur Betonoberfläche fortbilden. Nach einer Überschreitung der Höchstlast ist das Risswachstum instabil und es kommt zum Versagen der Befestigung durch die Bildung und Abtrennung eines sogenannten Betonausbruchkegels. Der Neigungswinkel dieses Kegels ist von der Verankerungstiefe abhängig (siehe nachfolgende Abbildung) und beträgt im Mittel ca. 35°. Die maximal übertragbare Kraft (Bruchlast) wird von der Betonzusammensetzung sowie der Verankerungstiefe und geometrisch somit von der Kegelmantelfläche bestimmt. Obwohl die Kegelmantelfläche des Betonausbruchkegels mit dem Quadrat der Verankerungstiefe zunimmt, steigt die Bruchlast proportional nur um das 1,5-fache der Verankerungstiefe. Dieser sogenannte Maßstabeffekt ist auf die mit zunehmender Verankerungstiefe abnehmende Zugspannung über die Bruchoberfläche zurückzuführen.¹⁵⁵

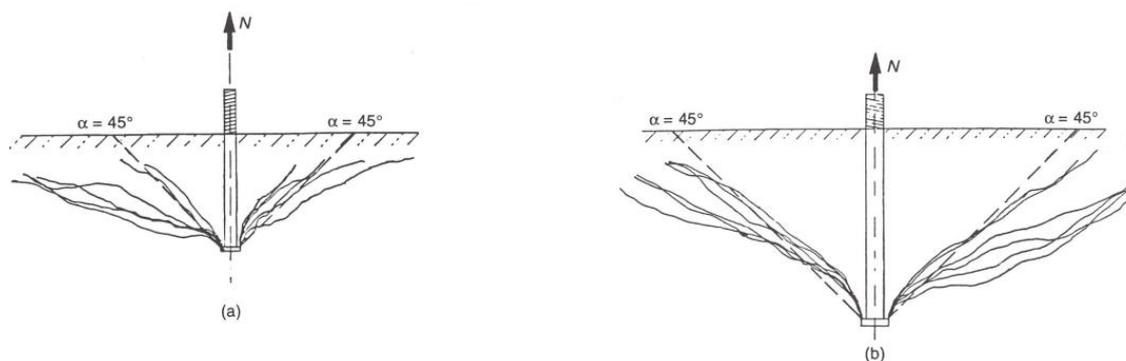


Abb. 61: Querschnitte durch den Betonausbruchkegel eines Kopfbolzens, Eligehausen/Mallée 2000, 69, zitiert nach Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg 1985 (nicht veröffentlicht)

a) hef = 260 mm

b) hef = 520 mm

¹⁵³ Vgl. Eligehausen/Mallée 2000, 38–40.

¹⁵⁴ Vgl. Reinhardt 1997, 40.

¹⁵⁵ Vgl. Eligehausen/Mallée 2000, 45–53.

3.1.2.3 Tragverhalten von Befestigungen

Eine Befestigung in Beton erfolgt durch das Einlegen einer Gewindehülse, Ankerschiene oder eines Kopfbolzens in die Schalung, oder durch nachträgliches Vorbohren und Einbringen eines Metallspreizdübels, Hinterschnittdübels, Verbunddübels, Verbund-Spreizdübels, Verbund-Hinterschnittdübels oder einer Betonschraube. Ebenfalls möglich, aber unüblich, ist eine nachträgliche Direktmontage mittels Setzbolzen.¹⁵⁶

Da zwischen dem Befestigungsmittel Kopfbolzen sowie Hinterschnittdübel und den Einhängeelementen einer Klettverbindung am ehesten geometrische Ähnlichkeiten festzustellen sind, beschränkt sich die weitere Untersuchung auf diese Befestigungsmittel und ihr Tragverhalten anhand der bereits bekannten Lastrichtungen.

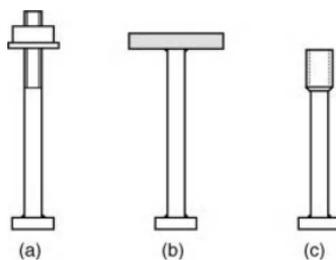


Abb. 62: Übersicht Kopfbolzen,
Mallée/Fuchs/Eligehausen 2013, 5
a) Kopfbolzen mit Gewinde
b) Kopfbolzen mit Stahlplatte
c) Kopfbolzen mit Innengewindehülse

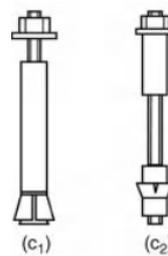


Abb. 63: Übersicht Hinterschnittdübel,
Mallée/Fuchs/Eligehausen 2013, 4
c1) Hinterschnittdübel in Richtung
Bohrlochsohle
c2) Hinterschnittdübel in Richtung
Betonoberfläche

3.1.2.3.1 Zuglast

Unter einer Beanspruchung auf Zug können Befestigungen in Beton durch Herausziehen, Betonausbruch, Spalten und Stahlbruch versagen (siehe nachfolgende Abbildung). Versagen durch Herausziehen erfolgt aufgrund zu geringer Spreiz- und Reibkräfte, Spalten infolge geringer Bauteilabmessungen oder Achsabstände zwischen Befestigungselementen sowie zu kleiner Randabstände und Stahlversagen durch ein Versagen des Montagemittels selbst. Bei Betonausbruch bildet sich der bereits beschriebene kegelförmige Betonausbruchkörper.¹⁵⁷ Hinsichtlich des Ziels dieser Arbeit, stellt die Versagensart durch Betonausbruch die maßgebende Versagensart dar. Bei weiterführenden Untersuchungen sind unter Einbindung des Verbindungspartners weitere Versagensarten zu behandeln.

¹⁵⁶ Vgl. Eligehausen/Mallée 2000, 1.

¹⁵⁷ Vgl. Ebda., 65–67.

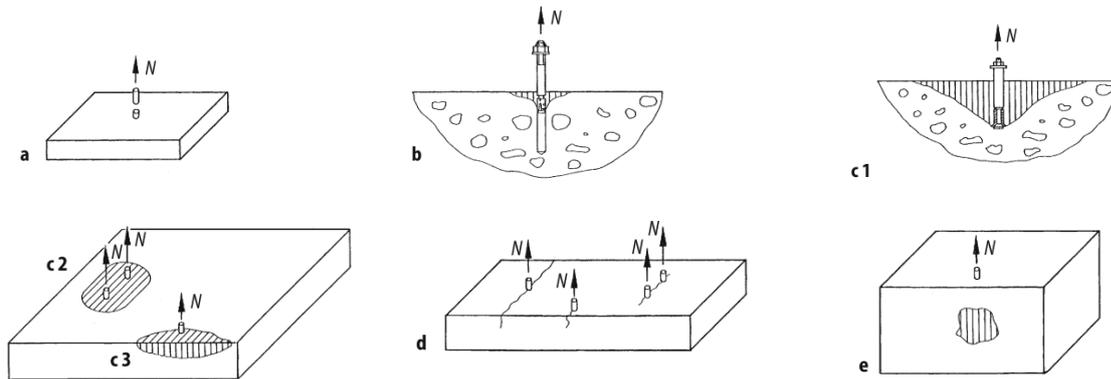


Abb. 64: Versagensarten bei zentraler Zugbeanspruchung, Eligehausen/Fuchs 2019, 15

- a) Stahlbruch
- b) Herausziehen
- c) Betonausbruchkegel
- d) Spalten
- e) Seitlicher Betonausbruch

Der Betonausbruchkegel beginnt auf Höhe des Endes oder Kopfes des in den Beton eingebrachten Befestigungsmittels. Der Neigungswinkel des Kegels beträgt im Mittel 35° und ändert sich, wie zuvor beschrieben, in Abhängigkeit zur Verankerungstiefe aber auch infolge von Druck- oder Zugkräften im Ankergrund. Bei Befestigungsgruppen oder einem geringen Achsabstand mehrerer Befestigungselemente kann es zu einer Überschneidung der Bruchkegel und einem daraus folgenden gemeinsamen Ausbruchkegel kommen (siehe nachfolgende Abbildung). Dies hat eine Verringerung der Bruchkegelmantelfläche und der Bruchlast zur Folge. Idealerweise sind die Abstände der einzelnen Befestigungselemente einer Befestigungsgruppe sowie die Verankerungstiefe so gewählt, dass es zu keiner Überschneidung kommt. Da der Durchmesser des Ausbruchkörpers ungefähr der 3-fachen Verankerungstiefe (h_{ef}) entspricht, sollte der Abstand zwischen den Befestigungselementen mindestens der 3-fachen Verankerungstiefe ($3h_{ef}$) entsprechen.¹⁵⁸

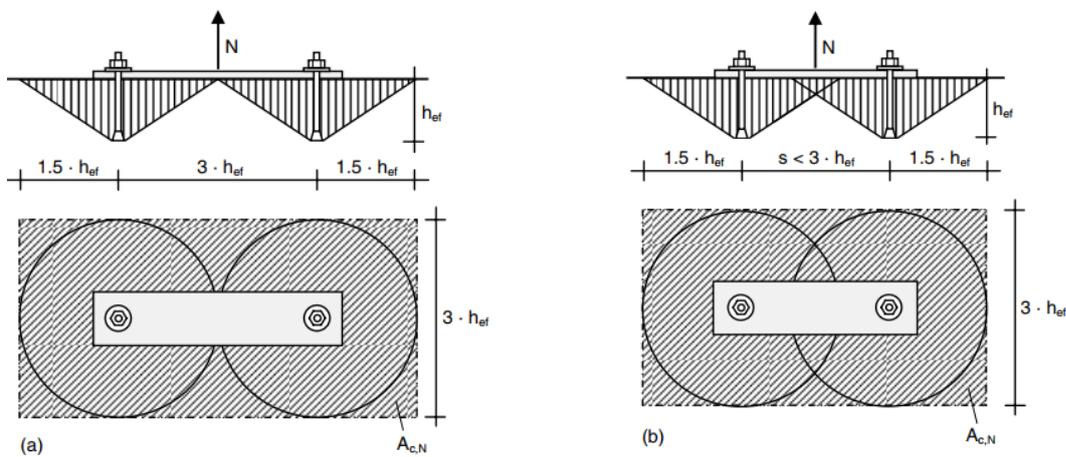


Abb. 65: Einfluss des Achsabstandes auf die Form des Betonausbruchkörpers bei zugbeanspruchten Zweiergruppen, Mallée/Fuchs/Eligehausen 2013, 49

- a) Großer Achsabstand
- b) Kleiner Achsabstand

¹⁵⁸ Vgl. Eligehausen/Mallée 2000, 69–76.

Bei Befestigungen nah am Bauteilrand und einer entsprechenden Verankerungstiefe kann sich kein vollständiger Bruchkegel ausbilden. Aus der verringerten Kegelmantelfläche sowie einem, aus der randnahen Befestigung resultierenden, gestörten Spannungszustand im Bereich der Lasteinleitung, folgt eine verringerte Bruchlast. Als Faustregel für die Einschätzung dieser Bruchlast dient die Annahme, dass ein Randabstand der 1,5-fachen Verankerungstiefe (vollständig ausbildbarer Bruchkegel) einer Bruchlast von 100%, und ein Randabstand von 0 zu einer Reduktion der Bruchlast auf 70% führt.¹⁵⁹

Ergänzend ist zu erwähnen, dass bei einer Verankerung direkt in einem Riss (bei einer Rissbreite von 0,3-0,4 mm) die Bruchlast eines Kopfbolzens oder Hinterschnittdübels nur noch 75% der Bruchlast in ungerissem Beton entspricht.¹⁶⁰

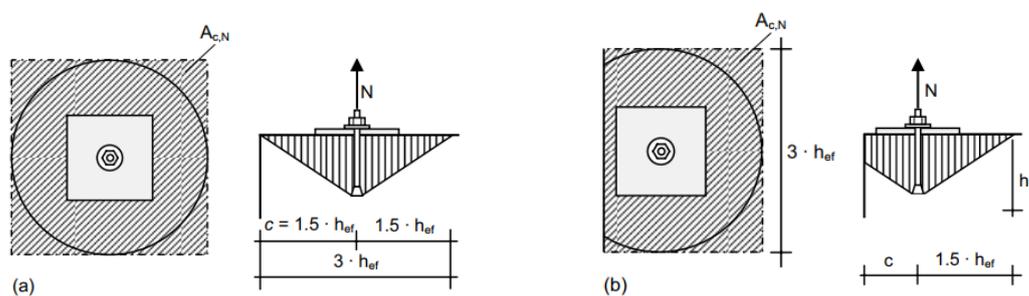


Abb. 66: Einfluss des Randabstandes auf die Form des Betonausbruchskörpers bei zugbeanspruchten Einzelbefestigungen, Elgehausen/Mallée 2000, 81

- a) Randfern
b) Randnah

Hinsichtlich des Forschungsziels dieser Arbeit wird für ein Schlaufenelement oder Einhängeelement aus Beton, beansprucht durch einen entsprechenden Verbindungspartner unter Zuglast angenommen, dass es zu einem Betonversagen durch Ausbildung eines Betonausbruchkegels kommen kann. Dahingehend ist ein Achsabstand der einzelnen Klettelemente, der 3-fachen Verankerungstiefe entsprechend, einzuhalten.

3.1.2.3.2 Querlast

Wird ein Kopfbolzen durch Querlast beansprucht, resultiert daraus eine Zugbeanspruchung im Bolzen sowie eine Zug- und Druckbelastung im Beton. Unter zunehmender Querlast steigt zunächst die Leibungspressung im Randbereich der Befestigung und es kommt zu Betonabplatzungen an der Betonoberfläche. Daraus folgt ein vergrößerter Hebelarm und eine erhöhte Biegebeanspruchung des Befestigungsmittels sowie eine stärkere Verschiebung in Lastrichtung. Zu einem Versagen der Verbindung kann es durch Stahlversagen, Betonkantenbruch, Betonausbruch auf der lastabgewandten Seite und Herausziehen kommen (siehe nachfolgende Abbildung). Stahlversagen ist ein Versagen des Befestigungsmittels selbst. Herausziehen erfolgt aufgrund zu geringer Spreizkraft und zu hohen Querverformungen.

¹⁵⁹ Vgl. Elgehausen/Mallée 2000, 81–82.

¹⁶⁰ Vgl. Ebda., 141–142.

Betonkantenbruch kann bei kleinen Randabständen oder sehr dünnen und schmalen Bauteilen erfolgen. Betonausbruch auf der lastabgewandten Seite entsteht infolge einer zu geringen Verankerungstiefe.¹⁶¹ Hinsichtlich des Forschungsziels ist erneut das Versagen durch Betonbruch maßgebend, wie auch bei weiterführenden Untersuchungen und Einbindung des Verbindungspartners weitere Versagensarten zu beachten.

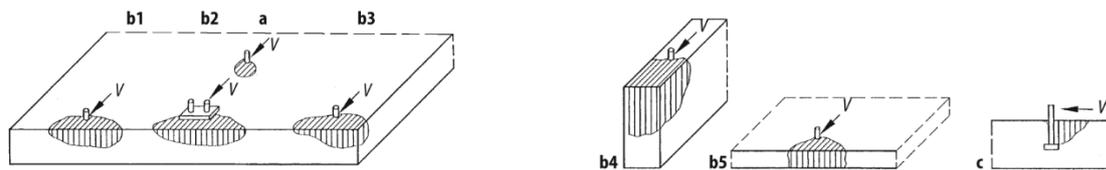


Abb. 67: Versagensarten bei Beanspruchung durch Querlast, Eligehausen/Fuchs 2019, 17

- a) Stahlversagen
- b) Betonkantenbruch
- c) Betonausbruch auf der lastabgewandten Seite

Betonausbruch auf der lastabgewandten Seite entsteht, wie bereits erwähnt, aufgrund einer geringen Verankerungstiefe bei gleichzeitig hoher Beanspruchung und wird von der Art des Befestigungsmittels, der Verankerungstiefe, der Stahlfestigkeit, dem Durchmesser des Befestigungsmittels, der Betonfestigkeit und bei Gruppenbefestigungen von den Achsabständen beeinflusst. Wirkt eine Querlast beispielsweise auf eine Gruppenbefestigung bestehend aus Kopfbolzen und Ankerplatte (siehe nachfolgende Abbildung), resultiert eine Druckbelastung im Beton in Lastrichtung infolge der Kopfbolzen, eine Oberflächenpressung infolge der Ankerplatte und eine Zugbelastung in den Bolzen und im Beton. Übersteigt die Zugbelastung im Bolzen die Zugtragfähigkeit der Betonbruchfläche kommt es zum Versagen der Befestigung durch Betonausbruch auf der lastabgewandten Seite. Die Bruchfläche des Ausbruchkegels beträgt ca. 60-70% der Fläche unter zentrischer Zugbelastung.¹⁶²

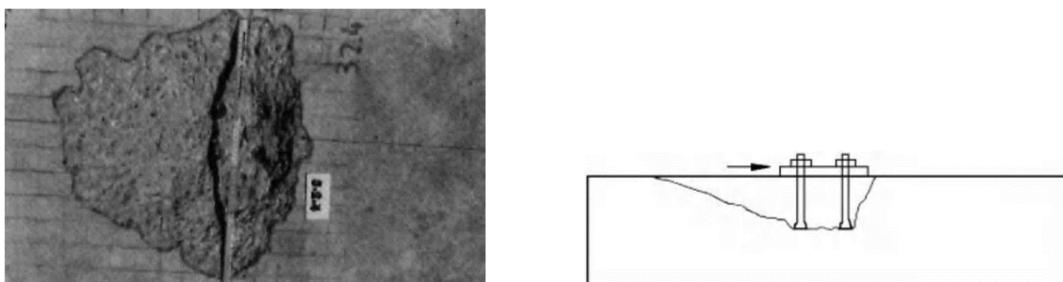


Abb. 68: Fotografie des Bruchbildes einer Vierergruppe randfern unter Querlast in Draufsicht (li) und Ausbruchkörper schematisch (re), Eligehausen/Mallée 2000, 107, zitiert nach Eligehausen/Lehr 1993 (nicht veröffentlicht)

¹⁶¹ Vgl. Eligehausen/Mallée 2000, 101–102.

¹⁶² Vgl. Ebda., 106–108.

Wird nun ein mit einer klettfähigen Betonstruktur kraftschlüssig verbundener Verbindungspartner in Form einer Einhängekomponente auf Querlast beansprucht, so wird aufgrund der geringen Verankerungstiefe angenommen, dass das Tragverhalten grundsätzlich dem Versagen durch Betonausbruch auf der lastabgewandten Seite entspricht. Die auf den Verbindungspartner wirkende Querlast resultiert in Lastrichtung sowie an der Oberfläche in einer Druckbelastung im Beton und einer Zugbelastung auf der lastabgewandten Seite. Übersteigt diese Zugbelastung die Zugtragfähigkeit der Betonbruchfläche, kommt es zum Versagen der Befestigung. Aufgrund der geringen Verankerungstiefe wird angenommen, dass es im Unterschied zu obiger Darstellung zu einzelnen Brüchen je Klettelement und nicht zu einem gemeinsamen Bruchkegel kommt.

Wird der Verbindungspartner Schlaufenkomponente durch Querlast beansprucht, wird aufgrund der materialspezifischen Eigenschaften eine einseitige Schrägzubelastung in Lastrichtung mit unbeanspruchten Schlaufen auf der lastabgewandten Seite angenommen. Aufgrund der verringerten Bruchfläche, verglichen mit einer zentrischen Zugbelastung, wird unter Querlast eine verringerte Bruchlast angenommen.

Betonkantenbruch (siehe nachfolgende Abbildung) erfolgt bei randnahen Befestigungen in Beton durch die Ausbildung eines Ausbruchkegels mit einem Winkel von ca. 35° . Die Tiefe des Kegels beträgt ca. das 1,3-1,5-fache des Randabstandes (c_1). Der Randabstand bestimmt die Größe des Betonausbruchkörpers und die Betonausbruchlast. Dabei gilt die Faustregel, dass die Bruchlast bis zum Erreichen der Höchstlast linear mit dem Randabstand zunimmt. Bei Befestigungsgruppen ist zwischen den einzelnen Befestigungselementen ein Achsabstand des 3-fachen Randabstandes einzuhalten damit sich die jeweiligen Bruchkörper nicht überschneiden. Erfolgt die Gruppenbefestigung mittels Dübel, so haben diese in der Regel ein geringes Lochspiel. Dadurch kann die Situation entstehen, dass der randnächste Dübel alleine den Großteil der Last aufnimmt, woraus ein früheres Versagen infolge einer verringerten Bruchlast resultiert.¹⁶³

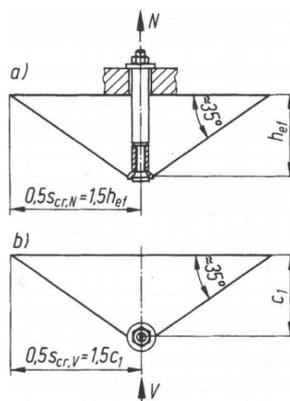


Abb. 69: Vergleich Betonausbruchkörper unter Zuglast und Querlast, Elgehausen/Mallée 2000, 109
a) Zentrische Zugbeanspruchung
b) Querlastbeanspruchung am Bauteilrand

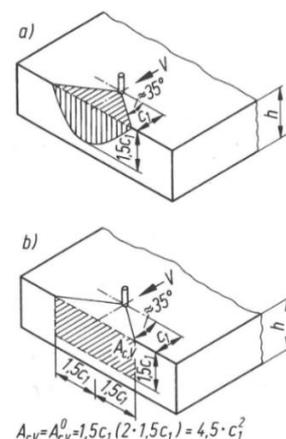


Abb. 70: Betonausbruchkörper unter Querlast, Elgehausen/Mallée 2000, 110
a) Betonausbruchkörper nach Versuchsergebnissen
b) Projizierte Fläche nach dem CC-Verfahren

¹⁶³ Vgl. Elgehausen/Mallée 2000, 109–115.

Bei einer Befestigung in einem schmalen und gleichzeitig dünnen Bauteil unter Querlast bildet sich ein Bruchkegel über das gesamte Bauteil, was eine vollständige Spaltung des Bauteiles zur Folge hat, siehe auch nachfolgende Abbildung.¹⁶⁴

Ergänzend ist zu erwähnen, dass das Verhalten einer Befestigung in gerissenem Beton unter Querlast vom Rissverlauf abhängig ist. Richtet sich die Last senkrecht zum Riss, zeigen sich keine Auswirkungen auf die Bruchlast. Beansprucht sie den Kopfbolzen oder Hinterschnittdübel in Rissrichtung, verringert sich die maximal aufnehmbare Last auf 75%.¹⁶⁵

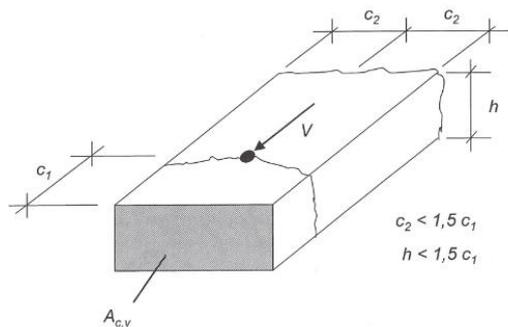


Abb. 71: Einzelbefestigung in einem schmalen und dünnen Bauteil, Elgehausen/Mallée 2000, 117

Die Klettelemente einer klettfähigen Struktur aus Beton können je nach Dimensionierung und Verhältnis zum Verbindungspartner als schmales, dünnes Bauteil angesehen werden. Wird der Verbindungspartner dieser Elemente auf Querlast oder auf Zuglast beansprucht, kommt es ausgehend vom Lastangriffspunkt zur Ausbildung eines Bruchkegels über das gesamte jeweilige Klettelement.

3.1.2.3.3 Zug- und Querlast

Die Beanspruchung einer Befestigung durch eine Kombination aus Zug- und Querlast führt zu einem Tragverhalten, welches je nach Lastrichtung und Angriffswinkel, dem Verhalten und den Versagensarten unter Zug- oder Querlast entspricht. Ein dennoch erwähnenswerter Sonderfall ist nachfolgend abgebildet. Während bei Einzelbefestigungen unter zentrischer Zug- oder Querlast erste Risse bei einer Bruchlast von ca. 25-40 % der Höchstlast entstehen, führt eine Schrägzugbelastung von 45° bei einer randnahen Befestigung deutlich früher zu ersten Rissen und einer Reduktion der Zugtragfähigkeit.¹⁶⁶

¹⁶⁴ Vgl. Elgehausen/Mallée 2000, 116–117.

¹⁶⁵ Vgl. Ebda., 151–153.

¹⁶⁶ Vgl. Ebda., 124–131.

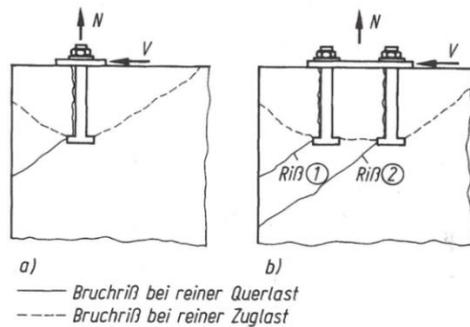


Abb. 72: Schematische Darstellung von Bruchrissen bei Befestigungen am Bauteilrand unter Schrägzugbelastung Richtung Bauteilkante, Eligehausen/Mallée 2000, 131, zitiert nach Zhao/Eligehausen 1992 (nicht veröffentlicht)

3.1.2.4 Zugfestigkeit von Beton

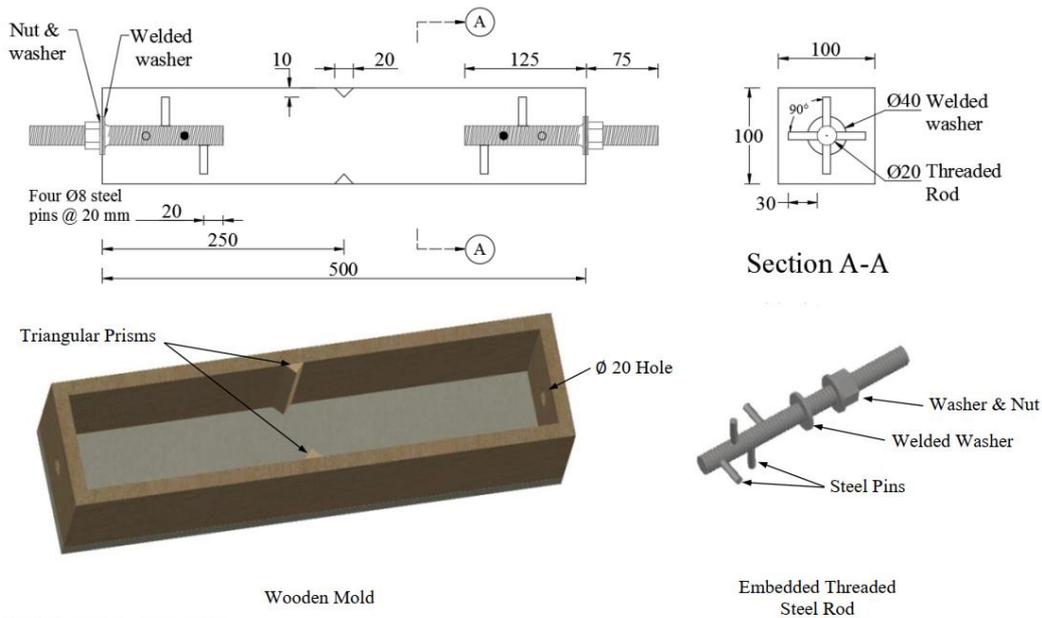
Hinsichtlich einer Einschätzung der möglichen Kraftübertragung von Beton in der Randzone, mit einem Vergleich der Festigkeit herkömmlicher Klettprodukte, werden nachfolgend die direkte Zugfestigkeit von Beton und die Oberflächenzugfestigkeit im oberflächennahen Bereich untersucht, sowie entsprechende Kennwerte festgestellt.

3.1.2.4.1 Direkte Zugfestigkeit

Für die Bestimmung der direkten Zugfestigkeit von Beton gibt es keine standardisierten Tests. Eine Prüfung führt in der Regel zu Schwierigkeiten bei der Fixierung, Ausrichtung und Zentrierung der Proben. Zur Überwindung dieser Probleme entwickelten Faez Alhussainy, Hayder Alaa Hasan, M Neaz Sheikh und Muhammad N. S Hadi in ihrer Arbeit *A New Method for Direct Tensile Testing of Concrete* eine Prüfmethode anhand einer speziellen Herstellungsweise der Prüfkörper. Die dahingehend angewandten und entwickelten Komponenten sind in nachfolgender Abbildung dargestellt. Die demontierbare Schalung formt die Prüfkörper und sorgt infolge der eingelegten Prismen für eine Sollbruchstelle. Die Gewindestangen aus Stahl werden vor dem Einbringen des Betons durch Löcher in der Schalung in Position gehalten und dienen zur späteren, zentrischen Verbindung mit der Zugprüfungsmaschine.¹⁶⁷ Das vorangehende Kapitel ergänzend, kann aus diesem Versuchsaufbau hinsichtlich des Tragverhaltens von Beton abgeleitet werden, dass es zu einem Versagen durch Betonbruch infolge einer geometrisch bedingten Schwachstelle an einem Bauteil kommen kann.

¹⁶⁷ Vgl. Alhussainy u.a. 2018, 2–6.

3 Klettbeton



* All dimensions are in mm

Abb. 73: Komponenten zur Herstellung der Prüfkörper, Alhussainy u.a. 2018, 23

Mit der entwickelten Prüfmethode wurden verschiedene Betonarten anhand von jeweils drei Prüfkörpern getestet. Die Betonmischungen mit einem Größtkorndurchmesser von 10 mm, wie auch die ermittelten Zugfestigkeiten sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt.¹⁶⁸

Mix	Cement (kg/m ³)	Fly ash (kg/m ³)	Slag (kg/m ³)	Silica fume (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Coarse aggregate (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	HRWR ^a (l/m ³)	Steel fiber content (%)
Normal-strength concrete	350	-	-	-	850	1000	185	-	---
High-strength concrete	576	64	-	30	540	990	197	6	---
Steel Fiber high-strength concrete	576	64	-	30	540	990	197	6	1
Self-consolidating concrete	280	120	50	-	950	780	182	3.4	---

^a HRWR: High range water reducer

Tab. 1: Mischungsverhältnisse des geprüften Betonmaterials, Alhussainy u.a. 2018, 21

¹⁶⁸ Vgl. Alhussainy u.a. 2018, 8–9.

Type of test	Standard tests	Tested specimens for different types of concrete															
		Normal-strength concrete (NSC)				High-strength concrete (HSC)				Self-consolidating concrete (SCC)				Steel fiber high-strength concrete (SFHSC)			
		S1	S2	S3	Ave	S1	S2	S3	Ave	S1	S2	S3	Ave	S1	S2	S3	Ave
Compressive strength (MPa)	ASTM C39-16 [22]	39	38.5	39.5	39	82.8	86.6	85.5	85	56.5	57	-	57	92.3	94.7	91.2	93
Splitting tensile strength (MPa)	ASTM C496-11 [23]	3.56	3.65	3.42	3.54	5.4	5.3	4.8	5.2	3.7	3.78	3.87	3.8	6.8	6.2	6.1	6.4
Flexural strength (MPa)	ASTM C78-16 [24]	4.2	4.37	4.31	4.3	6.2	6.8	6.1	6.0	6.0	6.39	7.1	6.5	6.9	6.8	7.2	6.9
Direct tensile strength (MPa)	Developed method	3.08	3.29	3.2	3.19	3.6	3.3	3.5	3.5	3.4	3.49	3.6	3.5	4.1	4.0	4.3	4.1
Modulus of elasticity (compression) (GPa)	ASTM C469-14 [25]	30.5	31	30	30.5	40.5	39.3	38.5	39	29.5	30	31	30	42	39.8	41	41
Modulus of elasticity (direct tension) (GPa)	Developed method	21	22.4	23.5	22.3	21.4	21.8	21.6	21.6	19.5	20.4	21	20	21.9	23.5	24.7	23.4

Tab. 2: Testergebnisse der direkten Zugfestigkeit der Betonmischungen Normalbeton (NSC), hochfester Beton (HSC), selbstverdichtender Beton (SCC) und hochfester Beton mit Stahlfasern (SFHSC), Alhussainy u.a. 2018, 22

Im Rahmen der Untersuchung konnte eine durchschnittliche direkte Betonzugfestigkeit der Betonmischung Normalbeton mit 3,19 MPa (N/mm²), des hochfesten Betons mit 3,5 MPa, des selbstverdichtenden Betons mit 3,5 MPa und des hochfesten Betons mit Stahlfasern mit 4,1 MPa festgestellt werden.¹⁶⁹

Diese Festigkeiten beschreiben die maximale Bruchlast im Verhältnis zur Bruchfläche an der Sollbruchstelle des Betonprüfkörpers. Die Werte bilden demnach die Festigkeiten von Beton mit einem eher geringen Anteil an oberflächennahem Beton ab. Da industriell gefertigte Klettelemente, wie eingangs festgestellt, kleinteilig sind und angenommen wird, dass die Klettelemente von Klettbeton hinsichtlich einer entsprechenden Klettfähigkeit möglichst kleinteilig zu strukturieren sind, wird nachfolgend die Zugfestigkeit von Betonoberflächen untersucht.

3.1.2.4.2 Oberflächenzugfestigkeit

Die Publikation *Erhaltung von Betonbauwerken* von Michael Raupach und Jeanette Orłowsky beschäftigt sich mit verschiedenen Methoden und Prinzipien der Instandsetzung beschädigter Betonbauteile und beurteilt dahingehend die Eigenschaften von Betonoberflächen. Das betrifft die Zusammensetzung des oberflächennahen Betons, den Feuchtegehalt, die Wasseraufnahme, die Benetzbarkeit der Betonoberfläche, die Oberflächenrauheit, die Betondeckung, die Lage und den Durchmesser der Bewehrung, die Karbonatisierungstiefe, die Chloridverteilung, Kiesnester, Hohlstellen, Abplatzungen, Risse und die Oberflächenzugfestigkeit,¹⁷⁰ welche folgendermaßen definiert wird: „Die Oberflächenzugfestigkeit ist ein Maß für die Kohäsion der Betonrandzone unter Zugbeanspruchung. Sie ist als maximale Zugkraft (Abzug- bzw. Abreißkraft) bezogen auf die Fläche eines auf die Betonoberfläche geklebten Prüfstempels definiert.“¹⁷¹

¹⁶⁹ Vgl. Alhussainy u.a. 2018, 22.

¹⁷⁰ Vgl. Raupach/Orłowsky 2008, 4–20.

¹⁷¹ Ebda., 23.

Die Bestimmung der Oberflächenzugfestigkeit wird nach *DIN 1048-2:1991* durch das Bohren einer Ringnut, das Aufkleben eines Stahlstempels, das Abziehen des Stahlstempels mit einem Haftzugerät und der Ermittlung der Festigkeit anhand der Maximalkraft und der Fläche des Stahlstempels durchgeführt, siehe nachfolgende Abbildung.¹⁷²

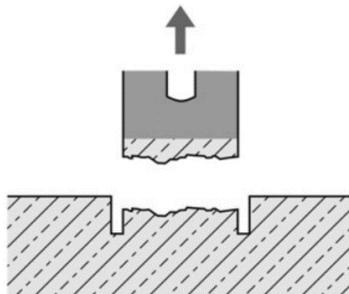


Abb. 74: Prinzip der Oberflächenzugprüfung, Raupach/Orlowsky 2008, 24

Einflussfaktoren auf die Oberflächenzugfestigkeit sind die Ausführungsqualität, die Betonzusammensetzung und die Kornverteilung. Eine schlechte Ausführungsqualität während der Herstellung kann beispielsweise zu einer Entmischung und somit zu oberflächennahen Schichten mit einem hohen Wasseranteil und einer daraus folgenden hohen Porosität und geringen Zugfestigkeit führen. Eine fehlende oder falsche Nachbehandlung kann ein zu frühes Austrocknen der Betonrandzonen sowie frühe Frosteinwirkungen nach sich ziehen, was zu einer Unterbrechung der Hydratation und einer Verringerung der Endfestigkeit führt. Einflussfaktoren die Betonzusammensetzung betreffend, umschließen die Größenverteilung der Gesteinskörnung, den Mehlkorngelalt, die Temperatur des Anmachwassers, die Art und Menge der Betonzusatzmittel, die Schalung, die Art und Menge der Entschalmittel, die Betoneinbringung und die Verdichtungsmethode.¹⁷³

Die Kornverteilung beschreibt den Aufbau des Betons und unterteilt ihn in eine Kernzone und eine Randzone. Der gleichmäßige Aufbau, der Kernbeton, beginnt ab einem Abstand zur Betonoberfläche die dem 1,3 bis 1,6-fachen des Größtkorndurchmessers entspricht. Die Randzone zeichnet sich durch einen, im Vergleich zur restlichen Betonmasse, reduzierten Anteil an Gesteinskörnung und einen erhöhten Anteil des Feinmörtels- bzw. des Zementsteingehaltes aus.¹⁷⁴ Daraus resultiert eine geringere Zugfestigkeit der Randzone.¹⁷⁵

Aufgrund der Vielfalt an Einflussfaktoren weisen Zugfestigkeitsmessungen eine große Streubreite auf.¹⁷⁶ Zudem sind je nach Richtlinie und Anwendungsfall unterschiedliche Kennwerte anzunehmen. Beispielsweise fordert die *Instandsetzungsrichtlinie RL-SIB* für Versuchs-Betonkörper eine mittlere Oberflächenzugfestigkeit von mindestens 3,0 N/mm² und einen

¹⁷² Vgl. Raupach/Orlowsky 2008, 25–26.

¹⁷³ Vgl. Ebda., 21–22.

¹⁷⁴ Vgl. Schulz 1984, 4.

¹⁷⁵ Vgl. Raupach/Orlowsky 2008, 21.

¹⁷⁶ Vgl. Schulz 1984, 19.

kleinsten Einzelwert von mindestens $2,0 \text{ N/mm}^2$,¹⁷⁷ während die *ÖNORM B 4710-1* mit der Bezeichnung *A 1,0* den Mindestwert der sogenannten Abreißfestigkeit mit $1,0 \text{ N/mm}^2$ festlegt.¹⁷⁸ Oliver Mann bemisst in seinem Artikel *Prüfung der Oberflächenzugfestigkeit von Beton* den Kleinstwert der Oberflächenzugfestigkeit mit $1,0 \text{ N/mm}^2$ bei einem Mittelwert von $1,5 \text{ N/mm}^2$. Zu beachten gilt laut Mann, dass Beton diese Anforderung erst ab der Festigkeitsklasse C25/30 ausreichend erfüllt.¹⁷⁹ Zusammengefasst kann somit angenommen werden, dass ein entsprechend qualitativer Normalbeton mit der Festigkeitsklasse C25/30, zumindest eine Oberflächenzugfestigkeit von $1,0 \text{ N/mm}^2$ aufweist.

Setzt man diesen Wert mit der Zugfestigkeit der Klett­komponenten-Kombination *Duotec® 50* mit *Duotec® 50* von *Gottlieb Binder GmbH & Co KG*, einem Klettsystem mit sehr hoher Haftkraft und einer Haftzugfestigkeit von 35 N/cm^2 ($0,35 \text{ N/mm}^2$) ins Verhältnis,¹⁸⁰ so zeigt sich, dass Beton in der Theorie eine beinahe dreifache Zugfestigkeit aufweist. Verglichen mit dem Klettsystem welches bei der Entwicklung der Klett­fassade *StoSystain R* zum Einsatz kam und eine Zugfestigkeit von ca. 16 N/cm^2 aufweist,¹⁸¹ bietet Beton eine ca. 6-fache Zugfestigkeit.

Abschließend soll hinsichtlich des Forschungsziels das Potential einer Verbindung in der Randzone anhand von zwei Versuchsergebnissen des Forschungsprojektes *Klett-TGA* betont werden. Der Versuch des Einlegens einer Klett­komponente in eine herkömmliche Schalung, bestehend aus zwei verklebten Schlaufenkomponente (siehe nachfolgende Abbildung, li) wie auch aus einer mit einer Schlaufenkomponente verklebten Pilzkopfkomponente (siehe nachfolgende Abbildung, re), führte infolge der Ausrichtung von Klettelementen Richtung Betonmasse (aus Normalbeton) und einer maximalen Verankerungstiefe von ca. 3 mm (Länge der Pilzkopfelemente), zu einem nahezu untrennbaren Verbund und im Rahmen einer Schälzugprüfung zum Versagen des Klettmaterials und Rückständen im Betonkörper.¹⁸²

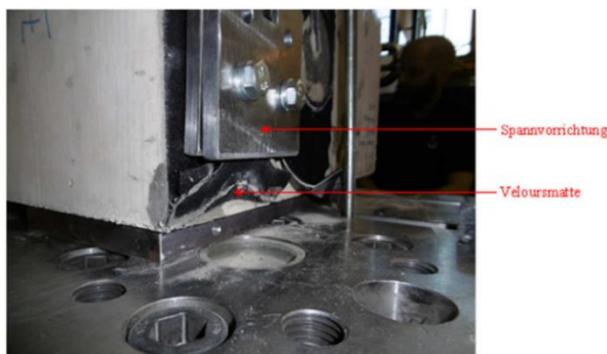


Abb. 75: Fotografie des Schälzugversuchs des Konzeptes „Einlegen in Beton“ bei Versagen des Versuchsmaterials Schlaufenmatte, Freytag u.a. 2018, 68

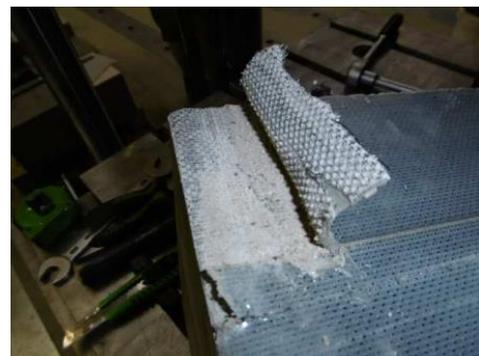


Abb. 76: Fotografie des Ergebnisses des Schälzugversuchs des Konzeptes „Einlegen in Beton“ bei Versagen des Versuchsmaterials Pilzkopfmatte, Freytag u.a. 2018, 69

¹⁷⁷ Vgl. Raupach/Orlowsky 2008, 23.

¹⁷⁸ Vgl. *ÖNORM B 4710-1:2018 01 01*, 31.

¹⁷⁹ Vgl. Mann 2011, 18.

¹⁸⁰ Vgl. Gottlieb Binder GmbH & Co KG 2018a.

¹⁸¹ Vgl. Riewe/Oswald 2014, 121.

¹⁸² Vgl. Freytag u.a. 2018, 68–69.

3.1.3 Wachsschalungstechnologie

Die Untersuchung der Wachsschalungstechnologie dient der Feststellung der Anwendbarkeit zur Herstellung einer monolithischen, materialreinen und klettfähigen Betonstruktur.

Grundsätzlich ermöglichen auch Matrizenschalungen aus Kunststoff eine vielfältige Formgebung und Strukturierung von Betonoberflächen (siehe nachfolgende Abbildungen), sowie eine aus den materialspezifischen Eigenschaften resultierende, gute Entformbarkeit ebenso bei tiefen Strukturen¹⁸³. Bei einer Ausbildung von Klettelementen mit entsprechenden Hinterschneidungen führt diese Schalungsart und das Lösen vom Betonkörper jedoch zu einer Beschädigung der Betonstruktur.

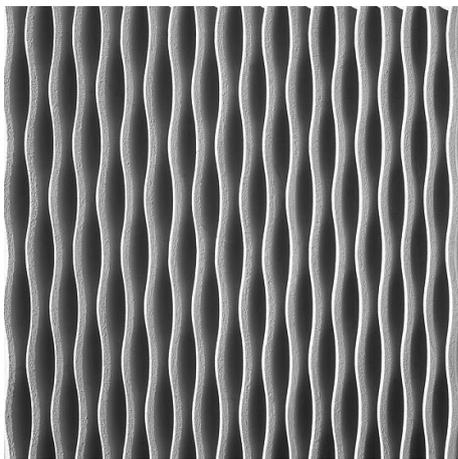


Abb. 77: Draufsicht auf die Matrizenschalung RECKLI 1/43 Corse, RECKLI GmbH

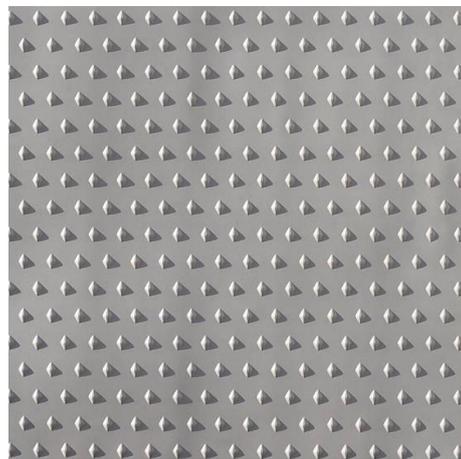


Abb. 78: Draufsicht auf die Matrizenschalung RECKLI 2/174 Breisgau, RECKLI GmbH

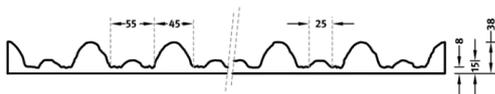


Abb. 79: Schnitt durch die Matrizenschalung RECKLI 1/43 Corse, RECKLI GmbH

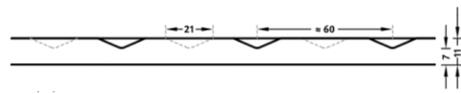


Abb. 80: Schnitt durch die Matrizenschalung RECKLI 2/174 Breisgau, RECKLI GmbH

Mit dem Anspruch an eine entsprechende Fähigkeit zur Formgebung von Beton bei gleichzeitiger Entformbarkeit, wird nachfolgend die Wachsschalungstechnologie anhand dem Artikel *Non-Waste-Wachsschalungen: Neuartige Präzisionsschalungen aus recycelbaren Industriegewachsen* der Autoren Jeldrik Mainka, Harald Kloft, Sarah Baron, Hans-Werner Hoffmeister und Klaus Dröder dargestellt. Dieser Artikel resultiert aus dem Forschungsprojekt *Non-Waste-Wachsschalungen: Neuartige Präzisions-Schalungen aus 100% recycelbaren Industrie-Wachsen zur Herstellung von geometrisch komplexen Beton-Bauteilen* mit dem Ausgangspunkt, der gängigen Anwendung CNC-gefräster Holz- oder Polystyrolschalungen (XPS) bei diesen Bauteilen und die daraus folgende Problematik des hohen Aufwandes in der Herstellung und die geringe Wiederverwendbarkeit und

¹⁸³ Vgl. Peck u.a. 2013, 56.

somit Entsorgung als Sondermüll.¹⁸⁴ Mit dem Ziel der Lösung dieser Problematik durch die Anwendung der Wachsschalungstechnologie, behandelt dieses Projekt und der Artikel die Wachsauswahl, die Fertigung und Formgebung von Wachsschalungen durch spanende Bearbeitung und den Abguss mit UHPC-Beton. Diese Themen werden nachfolgend angeführt.

Die Auswahl der geeigneten Wachse, *I-Paraffin* und *P-Montan*, erfolgte anhand eines Anforderungsprofils und entsprechenden Vorversuchen. Diese Anforderungen bestehen in einem Schmelzpunkt über 60°C, einer Penetrationshärte geringer 10 (1/10 mm), einem geringen thermischen Schwund und einer geringen Öligkeit. Das Wachs *I-Paraffin* besitzt eine Druckfestigkeit von 2,5 N/mm², einen E-Modul von 1923 N/cm² ein elasto-plastisches Verhalten bei Belastung sowie eine maximale Anwendungstemperatur von 45 °C. Für das Wachs *P-Montan* wurde eine Druckfestigkeit von 7,0 N/mm², ein E-Modul von 6295 N/cm², ebenso ein elasto-plastisches Verhalten bei Belastung sowie eine maximale Anwendungstemperatur von 45 °C festgestellt.¹⁸⁵

Die ermittelten Druckfestigkeiten (siehe nachfolgende Abbildung) entsprechen den Anforderungen einer Anwendung auch bei hohen Bauteilen, beispielsweise am Fußpunkt einer 10 m hohen Betonsäule. Ab einer Temperatur von 20 °C, infolge direkter Sonneneinstrahlung oder durch Hydratationswärmeentwicklung, nimmt diese Festigkeit ab. Eine Beeinträchtigung zur grundsätzlichen Anwendung als Wachsschalung erfolgt jedoch erst ab einer Temperatur von 45 °C. Ebenso zu erwähnen, für den angedachten Einsatz jedoch vernachlässigbar, sind temperaturabhängige Volumenänderungen der Wachse wie Verformungen oder innere Spannungen resultierend aus dem Abkühlen der Industriewachsböcke im Herstellungsprozess, wie auch eine zeitabhängige Verformung durch Kriechen, da diese bei einer konstanten Last von 1 N/mm², 20 °C und über eine Zeitdauer von 24 h weniger als 2 % beträgt. Zusammengefasst genügen die physikalisch-technischen Eigenschaften der Wachse einer Anwendung als Schalungsmaterial für freigeformte Betonbauteile.¹⁸⁶

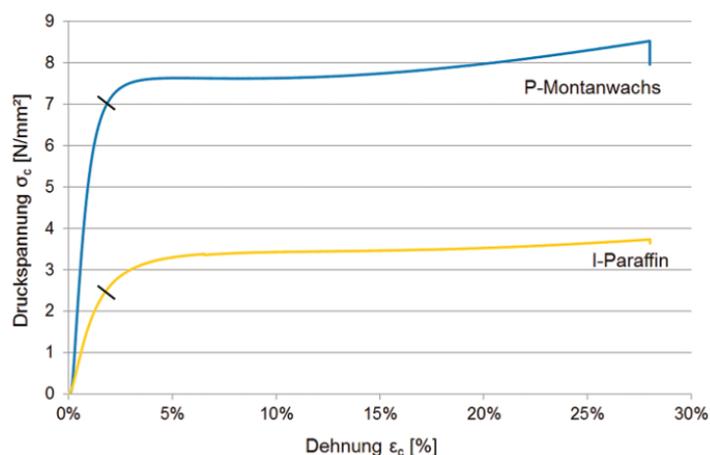


Abb. 81: Einachsige Zylinderdruckfestigkeit der Wachse bei 20 °C, Mainka u.a. 2016, 786

¹⁸⁴ Vgl. Mainka u.a. 2016, 784.

¹⁸⁵ Vgl. Ebda., 785.

¹⁸⁶ Vgl. Ebda., 785–786.

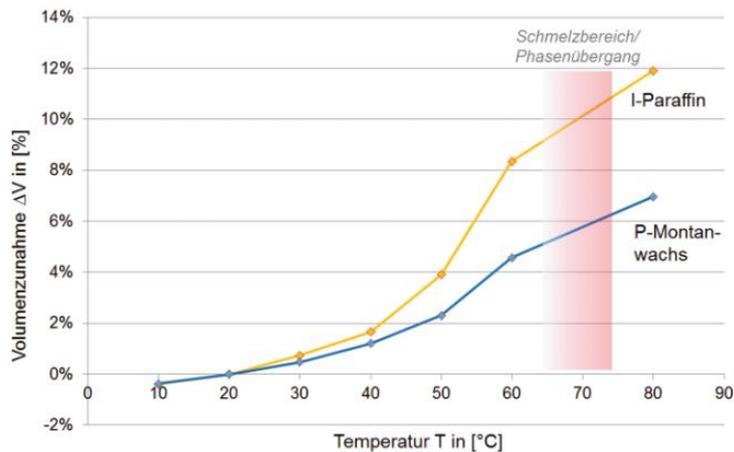


Abb. 82: Volumenzunahme der Wachs bei einer Bezugstemperatur von 20°C, Mainka u.a. 2016, 786

Die Formgebung der Wachskörper wurde anhand CNC-gesteuerter Fräswerkzeuge an Industriewachsblöcken mit den Abmessungen 300 mm × 300 mm × 80 mm untersucht. Ausschlaggebend für ein positives Ergebnis waren hohe Präzision, scharfe Kanten, kleine Krümmungsradien, eine entsprechende Oberflächenqualität sowie die Entformbarkeit des Betonabgusses infolge entsprechender Entformungswinkel. Anhand dieser Anforderungen wurde das Wachs *I-Paraffin* positiv bewertet, während die im Wachs *P-Montan* enthaltene Terephthalsäure die Gefahr eines hohen Verschleißes an Werkzeugen, einer schlechten Oberflächenqualität und einem Ansäuern der finalen Betonoberfläche bedeutet. Eine Auswahl der im Rahmen des Projektes, aus Wachsblöcken mit den Abmessungen 500 mm × 500 mm × 120 mm hergestellten Wachsschalkkörper aus *I-Paraffin*, sind nachfolgend abgebildet. Die Schalkkörper zeigen Stege, Nuten, Stümpfe, uni- und multidirektional gekrümmte Oberflächen, historisch inspirierte Elemente sowie parametrisch strukturierte Oberflächen.¹⁸⁷

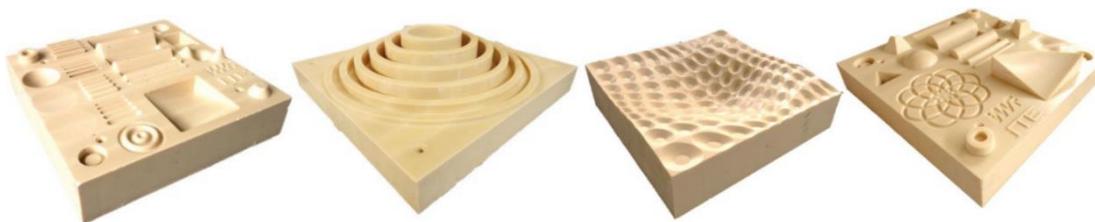


Abb. 83: Untersuchung der CNC-gesteuerten Fertigung von Wachsschalungen anhand von Industriewachsblöcken, Mainka u.a. 2016, 790

¹⁸⁷ Vgl. Mainka u.a. 2016, 786–790.

In einem nächsten Schritt wurden im Rahmen der Untersuchung die Wachskörper in Standard-Systemschalungen eingebracht, mit Trennmittel eingestrichen und mit UHPC-Beton abgegossen. Zur Entformung der Wachskörper wurden Bohrungen vorgesehen um entsprechende Maschinenschrauben einzudrehen und so die Wachs Schalung vom Betonkörper zu lösen. Infolge zu hoher Adhäsionskräfte musste in einem ersten Schritt jedoch Wasser mit einem Druck von 10 bar eingebracht werden, um in einem zweiten Schritt die Körper (ohne Beschädigung) mittels der bereits erwähnten Schrauben voneinander zu trennen. Nachfolgende Abbildung zeigt einen Wachskörper und den komplementären Betonabguss. Anhand einer abschließenden Überprüfung des Ergebnisses durch eine digitale Vermessung des Betonkörpers und einem Abgleich mit den ursprünglichen CAD-Daten konnten Abweichungen im Millimeterbereich festgestellt werden, was für das Bauwesen eine sehr hohe Präzision bedeutet.¹⁸⁸



Abb. 84: Wachs Schalung nach dem Ablösen des UHPC-Betonkörpers (li) mit UHPC-Abguss (re), Mainka u.a. 2016, 790

Der angewandte Mechanismus der direkten Entformung führt zu der bereits erwähnten Problematik der Beschädigung der Betonstruktur. Aufgrund der materialspezifischen Eigenschaften von Wachs wird daher vorgeschlagen, die Entformung infolge hoher Temperatur und einer Anwendung von heißem Wasser durchzuführen. Eine Methodik die auch in der Dissertation *Non-Waste-Wachsschalungen* von Jeldrik L.C. Mainka im Rahmen der Untersuchung von „Hohlraum-Wachsschalungen“ Anwendung findet und im Rahmen von Versuchen mit 95° C heißem Wasser getestet wurde. Infolge der temperaturbedingten Dehnung des Wachses kam es dabei zu einer Sprengwirkung und zu Rissen an einem der Hohlraum-Versuchskörper. Daraus kann gefolgert werden, dass bei den Konzepten zur Herstellung von Klettbeton wie auch der Entformung im Rahmen der Herstellungsversuche, eine langsame Erhitzung und ein kontinuierlicher Abtrag des geschmolzenen Wachses zu gewährleisten ist.¹⁸⁹

¹⁸⁸ Vgl. Mainka u.a. 2016, 790–791.

¹⁸⁹ Vgl. Mainka 2019, 140–145.

Für die vorliegende Arbeit bedeuten diese Forschungsergebnisse, die Feststellung der Eignung des Wachses *I-Paraffin* für die Schalung von Beton bei hoher geometrischer Vielfalt und gleichzeitiger Präzision, wie auch die grundsätzliche Anwendbarkeit der vorgeschlagenen Entformungsmethode, eine Eignung der Wachsschalungstechnologie hinsichtlich des Forschungsziels, der Herstellung einer monolithischen, materialreinen und klettfähigen Betonstruktur.

Den Abschluss dieses Kapitels bildet ein Konzept zur Automatisierung des oben beschriebenen Wachsschal-Verfahrens, welches einen interessanten Ansatz für zukünftige Forschungen bietet. Dieses Konzept umschließt den Entwurf des Betonbauteils und die daraus folgende Schalung, die Unterteilung der Schalung in verschiedene (Wachs-) Segmente mittels spezieller Software, die Herstellung von Wachsböcken durch Formpressen, das Fräsen der Wachsböcke zu einzelnen Schalungssegmenten durch einen Fräsroboter, den Transport zur Baustelle oder in die Fertigungshalle, die Positionierung durch einen Kran oder Gabelstapler (Anwendung als selbsttragenden Schalung, oder Integration in konventionelle Schalungssysteme), das Betonieren und Ablösen der Wachsschalung und die Wiederverwendung durch eine Rückführung in den Herstellungskreislauf.¹⁹⁰ Nachfolgende Abbildung zeigt das Prinzip dieses Fertigungsverfahrens.

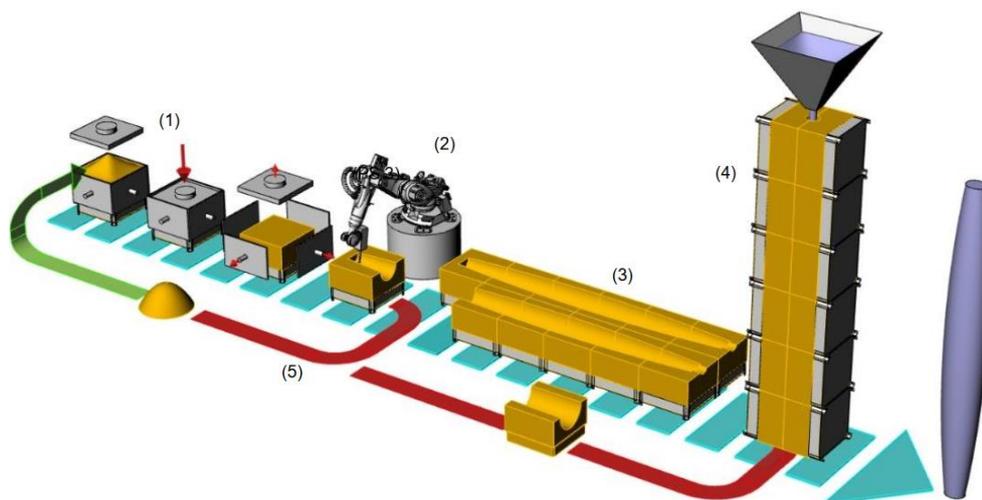


Abb. 85: Prinzip des vollautomatisierten Fertigungsverfahrens für eine modulare Wachsschalung, Mainka 2019, 149

- 1) Pressen der Wachsspäne zu Blöcken
- 2) CNC-Fräsen der Form
- 3) Zusammenbau der modularen Schalung
- 4) Ausbetonieren der Schalung
- 5) Wachs Recycling, z. B. durch Schreddern / Mahlen

¹⁹⁰ Vgl. Wirth/Mainka/Kloft 2018, 150–151.

3.1.4 Zusammenfassung

Das Ziel des Kapitels Grundlagen besteht in einem grundlegenden Verständnis der Klettverbindung, des Verhaltens von Beton unter Belastung sowie der Wachsschalungstechnologie, als auch daraus abzuleitende geometrische und materialspezifische Bedingungen zur Herstellung einer monolithischen, materialreinen und klettfähigen Betonstruktur. Die wesentlichen Erkenntnisse sind nachfolgend dargestellt.

3.1.4.1 Analyse der Klettverbindung

Das Funktionsprinzip der Klettverbindung beruht auf der hohen Anzahl komplementärer Verbindungselemente und einer daraus folgenden hohen Anzahl an möglichen Verbindungspunkten.¹⁹¹ Das Tragverhalten wird durch geometrische Bedingungen, materialspezifische Eigenschaften,¹⁹² die Lastart sowie die Lastrichtung bestimmt.¹⁹³

3.1.4.1.1 Einhängeelement

Ein Verbindungspunkt einer Einhängekomponente kann durch das entsprechende Einhängenelement (Haken oder Pilzkopf) und den Verbindungspartner (Schleife oder komplementäres Einhängenelement) gebildet werden. Wird der Verbindungspartner auf Zug belastet, verformt sich das Einhängenelement (oder die im Verbund stehenden Einhängenelemente) bis der Verbindungspartner beginnt abzugleiten und sich löst.¹⁹⁴ Das Belastungsverhalten hängt von der Belastung, der möglichen Verformung, den Abmessungen und der Geometrie der Klettelemente sowie dem Elastizitätsmodul ab.¹⁹⁵

Für die Herstellung einer Klettverbindung mit einer Schlaufenkomponente oder die Aufnahme unterschiedlich gerichteter Lasten, können an der Basis gelenkige und somit bewegliche Haken (oder Pilzköpfe) einen Vorteil bieten.¹⁹⁶

Klettelemente aus Beton ermöglichen keine Flexibilität, woraus eine Verringerung der Klettfähigkeit, wie auch Beschädigungen der Betonstruktur beim Herstellen und Lösen der Verbindung resultieren können. Seitens des Verbindungspartners (Einhänge- oder Schlaufenkomponente) ist daher ein entsprechender Mechanismus auszubilden.

Bei der Nachbildung von Einhängenelementen wird aufgrund der materialspezifischen Eigenschaften des Baustoffes angenommen, dass die Elemente größer zu skalieren sind, zur Bauteiloberfläche parallele Hinterschneidungen eher hergestellt werden können, wie auch mit einem entsprechenden Verbindungspartner eine Klettfähigkeit erreicht werden kann.

¹⁹¹ Vgl. Krüger 2013, 9–10.

¹⁹² Vgl. Ebda., 95.

¹⁹³ Vgl. Ebda., 75.

¹⁹⁴ Vgl. Williams/Davies/Frazer 2007, 217.

¹⁹⁵ Vgl. Ebda., 219.

¹⁹⁶ Vgl. Gorb/Popov/Gorb 2002, 157

3.1.4.1.2 Schlaufenelement

Das Tragverhalten eines Schlaufenelements ist mit einem entsprechend biegesteifen Seil zu vergleichen. Zuglasten können direkt, Querlasten anhand von Umlenkkraften, bestehend aus Längskraft und Neigung, abgeleitet werden¹⁹⁷. Unter Last bildet sich eine Verformung und Dehnung entlang der Seilachse. Normalkräfte wirken an den Enden der Schlaufen,¹⁹⁸ sowie an der Position der Verbindung mit dem Einhängeelement. Nimmt die Belastung weiter zu, kommt es zur Verformung des Einhängeelements und einem Lösen der Verbindung durch ein Abgleiten der Schlaufe oder auch durch Materialversagen.

Die Nachbildung eines Schlaufenelements in Beton wird anhand einer Abstraktion als „Loch“, Vertiefung oder Hohlraum mit einer Öffnung zur Bauteiloberfläche angedacht und entspricht damit der *Metaklett* Schlaufenkomponente *Lochblech*. Zur Vermeidung von Beschädigungen der biegesteifen Betonstruktur beim Herstellen oder Lösen der Verbindung ist auch bei dieser Komponente, seitens des Verbindungspartners (Einhängekomponente), ein entsprechender Mechanismus auszubilden. Aufgrund der Erkenntnisse aus Kapitel *Stand der Technik* wird angenommen, dass mit einem aktivier- und deaktivierbaren Verbindungspartner eine Klettfähigkeit besteht.

3.1.4.2 Analyse der Befestigungstechnik in Beton

Da die Grundlagen des Tragverhaltens von Befestigungen in Beton anhand stark variierender Verankerungstiefen geschaffen wurden, wird daraus folgend angenommen, dass dieses Tragverhalten grundsätzlich auf geringere Verankerungstiefen, in der Randzone von Beton, übertragbar ist.

3.1.4.2.1 Zuglast

Wird Beton durch einen Kopfbolzen auf Zug belastet, entstehen bei einem Versagen durch Betonbruch zunächst Mikrorisse im Lasteinleitungsbereich, die sich bei zunehmender Belastung bis zur Betonoberfläche fortbilden. Wird die Höchstlast überschritten, kommt es zu einem Versagen der Befestigung durch die Abtrennung eines Betonausbruchkegels. Der Neigungswinkel dieses Kegels beträgt ca. 35° und beginnt auf Höhe des Kopfbolzens. Bei einem zu geringen Achsabstand mehrerer Befestigungselemente kann es zu einer Überschneidung der Bruchkegel und einer Verringerung der Bruchlast kommen. Der Abstand zwischen den Befestigungselementen sollte daher mindestens der 3-fachen Verankerungstiefe ($3h_{ef}$) entsprechen.¹⁹⁹

Für ein Klettelement aus Beton (Einhänge- oder Schlaufenelement) unter Zuglast, resultierend aus einem Verbindungspartner, wird angenommen, dass es zu einem Versagen durch die Ausbildung eines Betonausbruchkegels, oder einem Bruch an einer geometrisch bedingten Schwachstelle kommt.

¹⁹⁷ Vgl. Dinkler 2017, 229.

¹⁹⁸ Vgl. Moro u.a. 2009, 410.

¹⁹⁹ Vgl. Eligehausen/Mallée 2000, 69–76.

3.1.4.2.2 Querlast

Wird ein Kopfbolzen zunehmend durch Querlast beansprucht, steigt zunächst die Leibungspressung im Randbereich der Befestigung und es kommt zu Betonabplatzungen an der Betonoberfläche. Daraus folgt ein vergrößerter Hebelarm und eine erhöhte Biege- und Zugbeanspruchung des Befestigungsmittels wie auch im Beton, wodurch es zum Versagen durch Betonausbruch auf der lastabgewandten Seite in Form eines Bruchkegels kommen kann. Bei einer randnahen Befestigung kann ein Versagen durch Betonkantenbruch und bei einem schmalen und gleichzeitig dünnen Bauteil infolge eines Bruchkegels über das gesamte Bauteil angenommen werden.²⁰⁰

Für ein Klettelement (Einhänge- oder Schlaufenelement) aus Beton unter Beanspruchung durch Querlast, resultierend aus einem Verbindungspartner in Form eines Eihängeelements wird angenommen, dass es zu einem Versagen durch Betonausbruch auf der lastabgewandten Seite je Klettelement kommt, wie auch aus dem Verbindungspartner Schlaufenkomponente (Einhängeelement aus Beton) eine Schrägzugbelastung in Lastrichtung resultiert. Des Weiteren kann ein Versagen durch Betonbruch an einer geometrisch bedingten Schwachstelle auftreten.

3.1.4.2.3 Oberflächenzugfestigkeit

Die Oberflächenzugfestigkeit von Beton wird durch die Kornverteilung in der Randzone, die Betonzusammensetzung und die Ausführungsqualität beeinflusst.²⁰¹ Der gleichmäßig aufgebaute Kernbeton beginnt ab einem Abstand zur Betonoberfläche des 1,3 bis 1,6-fachen Größtkorndurchmessers. Die Randzone zeichnet sich durch einen reduzierten Anteil an Gesteinskörnung und erhöhten Anteil des Zementsteingehaltes aus.²⁰² Bei Beton der Festigkeitsklasse C25/30 kann eine Oberflächenzugfestigkeit von 1,0 N/mm² angenommen werden.²⁰³

Setzt man diesen Wert mit der Haftzugfestigkeit des Klettproduktes *Duotec® 50* von *Gottlieb Binder GmbH & Co KG* (Pilzkopfklett mit Pilzkopfklett) von 35 N/cm²²⁰⁴ (oder 0,35 N/mm²) ins Verhältnis so zeigt sich, dass Beton in der Theorie eine beinahe dreifache Zugfestigkeit aufweist. Verglichen mit dem angewandten Klettsystem bei der Entwicklung der Klettfassade *StoSystain R*, mit einer Haftzugfestigkeit von ca. 16 N/cm²,²⁰⁵ besitzt Beton eine beinahe 6-fache Zugfestigkeit.

²⁰⁰ Vgl. Eligehausen/Mallée 2000, 101–117.

²⁰¹ Vgl. Raupach/Orlowsky 2008, 21.

²⁰² Vgl. Schulz 1984, 4.

²⁰³ Vgl. Mann 2011, 18.

²⁰⁴ Vgl. Gottlieb Binder GmbH & Co KG 2018a.

²⁰⁵ Vgl. Riewe/Oswald 2014, 121.

3.1.4.3 Wachsschalungstechnologie

Das industrielle Wachs *l-Paraffin* genügt hinsichtlich der physikalisch-technischen Eigenschaften den Anforderungen zur Anwendung als Wachsschalung für die Herstellung komplexer, freigeformter Bauteile aus Beton bei hoher Genauigkeit und gleichzeitiger Wiederverwendbarkeit des Schalmaterials. Die Formgebung erfolgt durch die Bearbeitung mit CNC-gesteuerten Fräsworkzeugen mit dem Ergebnis einer hohen Präzision, scharfen Kanten, kleinen Krümmungsradien sowie einer entsprechenden Oberflächenqualität.²⁰⁶

Zur Vermeidung der Beschädigung von Betonstrukturen mit Hinterschneidungen wird, unter Beachtung der Sprengwirkung von Wachs, eine Entformung durch heißes Wasser vorgeschlagen, eine Methodik die auch in der Dissertation *Non-Waste-Wachsschalungen* von Jeldrik L.C. Mainka im Rahmen der Untersuchung von „Hohlraum-Wachsschalungen“ Anwendung findet.²⁰⁷

Zusammengefasst kann die grundsätzliche Eignung der Wachsschalungstechnologie zur Herstellung einer monolithischen, materialreinen und klettfähigen Betonstruktur festgestellt werden.

²⁰⁶ Vgl. Mainka u.a. 2016, 792.

²⁰⁷ Vgl. Mainka 2019, 140–145.

3.2 Herstellungskonzepte

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Konzepte zur Herstellung von Klettbeton mit der Bezeichnung *Hakenstruktur*, *Pilzkopfstruktur* und *Lochstruktur* orientieren sich an industriellen Klettprodukten und entsprechen zwei Einhängekomponenten und einer Schlaufenkomponente. Klettbeton besteht als ein materialreiner Betonkörper der infolge einer geometrischen Ausbildung einzelner Verbindungselemente eine biegesteife, klettfähige Struktur oder Oberfläche aufweist. Die Verbindungselemente sind herkömmlichen industriellen Klettelementen nachempfunden, besitzen eine Haken-, Pilzkopf- oder Lochgeometrie und bieten dadurch eine Klettfähigkeit, die Fähigkeit mit einer komplementären, vergleichsweise herkömmlichen Klett Komponente, einem Verbindungspartner, eine Verbindung einzugehen.

Die nachfolgende Darstellung der Konzepte umschließt eine Beschreibung des jeweiligen Konzeptprinzips, der Wachkörper, des Betonkörpers anhand der Klettelemente, des angenommenen Tragverhaltens im Klettverbund mit entsprechenden Verbindungspartnern, des Verbindungspartners und eine abschließende Überprüfung der Konzepte im Rahmen einer Machbarkeitsstudie anhand von Herstellungsversuchen in unterschiedlichen Skalierungsgraden, sowie, je nach Versuchsergebnis, eine Feststellung der Klettfähigkeit durch Tastversuche zur Einschätzung des Potentials zur Anwendung in einem Klettsystem. Eine Beschreibung der Versuchskomponenten, des Aufbaus und der Durchführung der *Herstellungsversuche* und der *Klettversuche* findet sich im Anhang.

3.2.1 Hakenstruktur

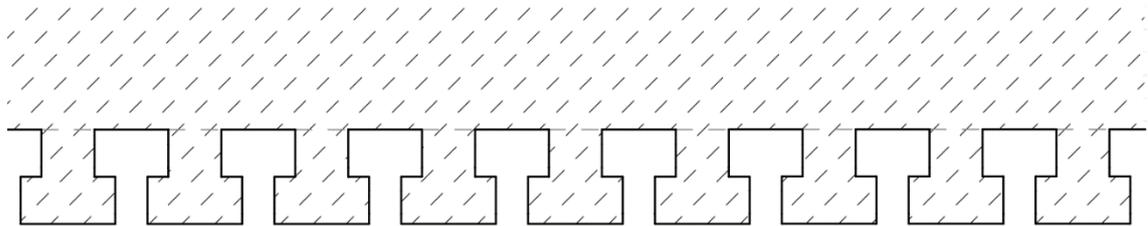


Abb. 86: Konzeptprinzip Hakenstruktur

Das Konzept Hakenstruktur entspricht der Herstellung einer Einhängekomponente aus Beton durch die Nachbildung industrieller Haken-Klettelemente. Als Vorbild wurde ein Hakenprodukt mit Hakenelementen in T-Form gewählt. Es wird angenommen, dass die beidseitig gerichteten, zur Bauteiloberfläche parallelen Hinterschneidungen eine Klettfähigkeit bei gleichzeitiger Herstellbarkeit aus herkömmlichem Beton ermöglichen, während eine Y-Form eher zu einem Abgleiten der Schlaufen und einer verringerten Klettfähigkeit führt. Das Konzept wird in weiterer Folge auf einen quaderförmigen Körper begrenzt dargestellt, kann aber der Herstellungsmethode entsprechend in Größe der Klettelemente und Anwendungsfläche skaliert werden.

3.2.1.1 Wachskörper

Der Wachskörper, die Negativform des Konzeptes, besteht aus zwei Komponenten. Teil A (siehe nachfolgende Abbildung, o) weist gedrungene, quaderförmige Ausnehmungen auf und bildet den Schaft der Klettelemente. Teil B (siehe nachfolgende Abbildung, u) besitzt längliche, quaderförmige Ausnehmungen und bildet den Hakenkopf. Lagerichtig positioniert, fließt der Beton durch Teil A (Hakenschaft), sammelt sich in Teil B (Hakenkopf) und formt das Hakenelement.

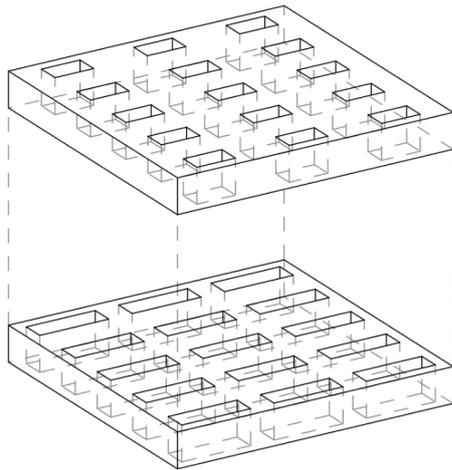


Abb. 87: Wachskörper bestehend aus Teil A (Haken-Schaft, o) und Teil B (Haken-Kopf, u)

3.2.1.2 Betonkörper

Der Betonkörper stellt ein aus dem Wachskörper resultierendes, quaderförmiges Beton-Bauteil und damit Klettbeton dar. Für die Fertigung wird der Wachskörper in einer Schalung positioniert, mit Beton übergossen, verdichtet, nachbehandelt und ausgeschalt. Eine abschließende Entformung des Wachskörpers erfolgt, der gewählten Methodik entsprechend, mit heißem Wasser.

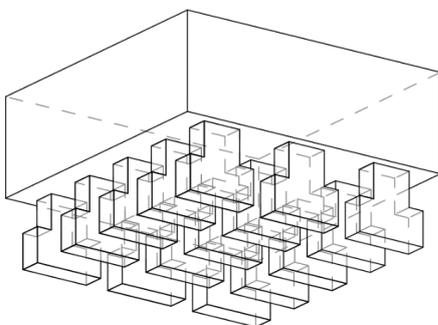


Abb. 88: Betonkörper resultierend aus dem Wachskörper

Nachfolgende Untersicht des Betonkörpers mit Blickrichtung auf die Klettelemente, sowie die Längs- und Querschnitte durch den Mittelpunkt der Klettelemente, dienen der Benennung der geometrischen Zusammenhänge. Die Länge der Haken (a) mit Abzug der Länge des Hakenschaftes (c) beschreiben die Hinterschneidungen und unter Berücksichtigung der Breite der Haken (e) die Fläche zur Aufnahme des Verbindungspartners. Der Abstand zwischen den Haken (b und f) wie auch der Abstand zwischen den Hakenschäften (d) oder das Achsmaß (j und k) beschreiben die Dichte der Klettelemente. Diese Parameter, wie auch die Höhe des Hakenelements (h) und die Höhe des Hakenschaftes (i), sind mit dem Verbindungspartner auf die Montagesituation abzustimmen. Die Parameter c und e (wie auch a und e) bestimmen den Querschnitt des Klettelements und somit die Betonmenge und den Aufbau (Kornverteilung) im Klettelement.

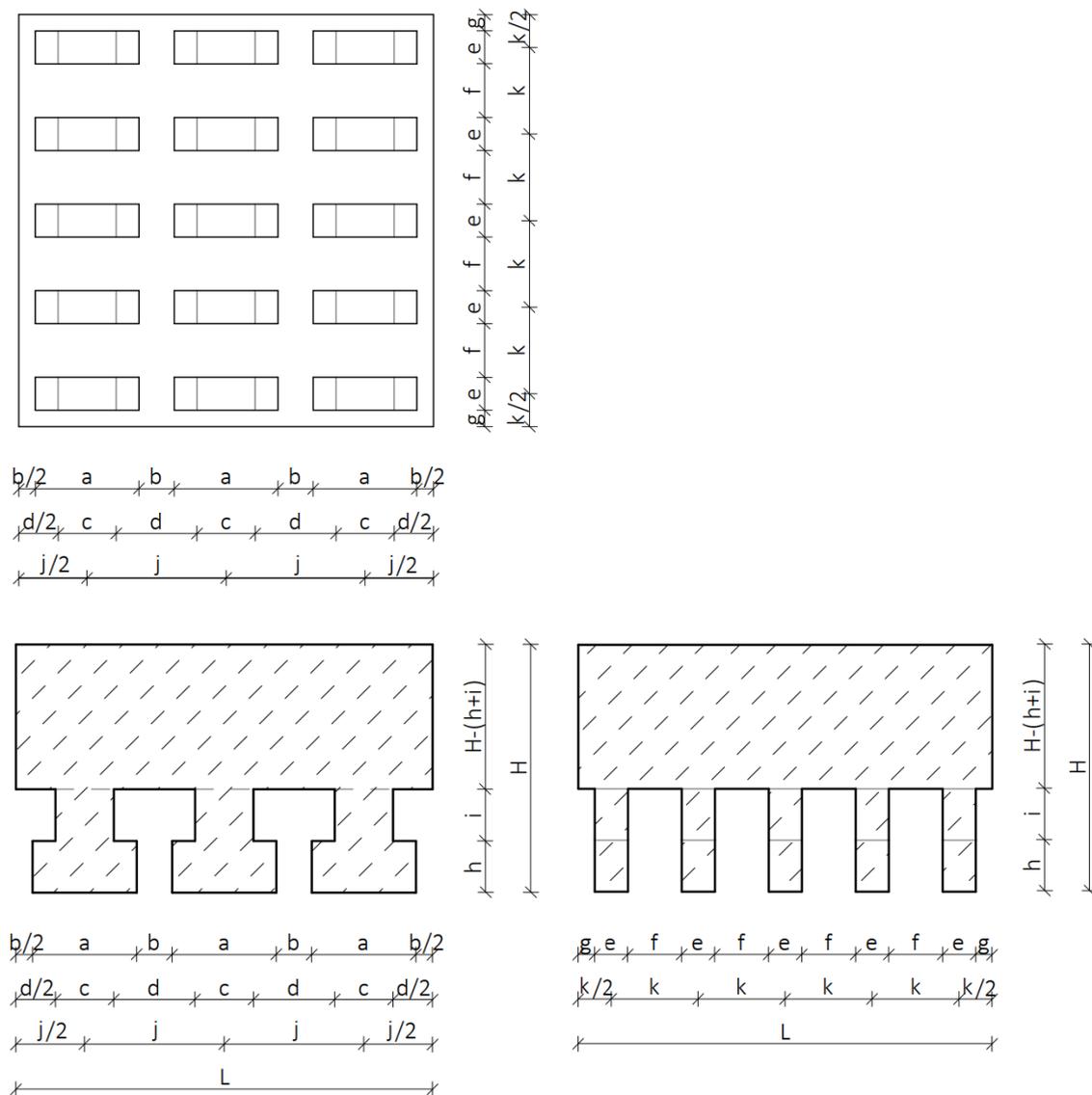


Abb. 89: Betonkörper in Untersicht (o) und Längsschnitt (u, li) wie auch Querschnitt (u, re)

L : Länge Betonkörper

a : Länge Haken

b : Abstand zwischen den Haken in Hakenausrichtung

c : Länge Hakenschaft

d : Abstand zwischen den Hakenschäften

e : Breite Haken

f : Abstand zwischen den Haken quer zur Hakenausrichtung

g : Abstand zum Bauteilrand

h : Höhe Hakenkopf

i : Höhe Hakenschaft

j : Achsmaß in Hakenausrichtung

k : Achsmaß quer zur Hakenausrichtung

3.2.1.3 Tragverhalten

Die Beschreibung des Tragverhaltens der Betonstruktur beruht auf dem Kapitel *Analyse der Befestigungstechnik in Beton* und wird anhand des Verbindungspartners Schlaufenelement und Verbindungspunkten bestehend aus einem Haken mit beidseitig verbundenen Schlaufen untersucht (siehe orange Strichlierung in nachfolgender Abbildung). Zudem wird das Tragverhalten resultierend aus dem Verbindungspartner Einhängekomponente und Verbindungspunkten bestehend aus Haken mit jeweils zwischen den Haken positionierten, komplementären Einhängeelementen angeführt.

Wirkt auf den Verbindungspartner in Form einer Schlaufen- oder Einhängekomponente eine gleichmäßige Zugbelastung, so resultiert daraus die Kraft F und eine Druckbeanspruchung im Bereich der Hinterschneidungen der Haken, sowie eine Zugbeanspruchung in den Hakenschäften und im Betonkörper (siehe nachfolgende Abbildung).

Aus Verbindungspunkten mit einer unterschiedlichen Anzahl an Schlaufen je Beton-Hakenelement kann eine asymmetrische Belastung einzelner Haken folgen. Beim Verbindungspartner Einhängekomponente wird aufgrund der gleichmäßigen Struktur und Anzahl der Klettelemente des Verbindungspartners eine ungleichmäßige Belastung (mit Ausnahme des Randbereichs der Verbindungsflächen) ausgeschlossen.

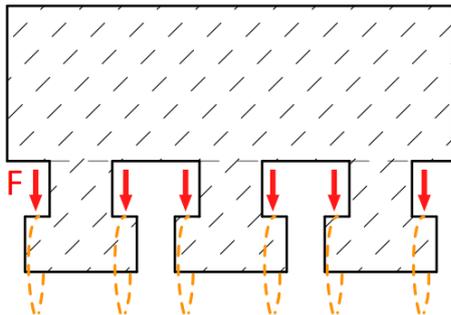


Abb. 90: Längsschnitt der Krafteinwirkung unter Zugbelastung resultierend aus dem Klettelement Schlaufe

3.2.1.3.1 Zuglast

Bei zentrischer Zuglast (siehe nachfolgende Abbildung) wirkend auf einen Verbindungspartner mit biegesteifen (lastverteilenden) Grund und Klettelementen in Form von Schlaufen- oder auch Einhängeelementen wird angenommen, dass es zu einem Versagen durch die Ausbildung eines Betonausbruchkegels je Klettelement, mit einem Winkel von 35° kommen kann (siehe nachfolgende Abbildung, jeweils links). Für eine maximale Bruchlast, eine vollständige Ausbildung der jeweiligen Bruchkegel, ist demnach ein Achsabstand der einzelnen Klettelemente der 3-fachen Verankerungstiefe einzuhalten. Zudem wird angenommen, dass es infolge geometrisch oder materialspezifischer bedingter Schwachstellen zu einem Bruch der Klettelemente an der entsprechenden Position kommen kann (siehe nachfolgende Abbildung, jeweils mi und re). Einflussfaktoren auf das Versagen sind die Bauteilgeometrie, die Abmessungen der Klettelemente in Abhängigkeit zur Betonmischung, die Ausführungsqualität und der Verbindungspartner.

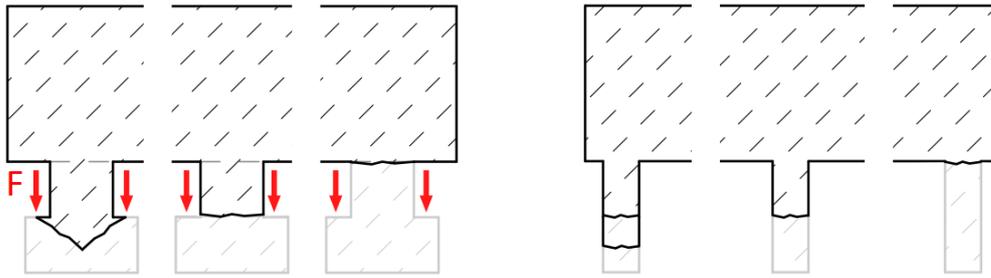


Abb. 91: Längsschnitt (li) und Querschnitt (re) des Versagens unter Zuglast durch den Verbindungspartner Schlaufenkomponente und Betonbruch in Form eines Betonausbruchkegels (jeweils li) oder an einer geometrisch oder materialspezifisch bedingten Schwachstelle (jeweils m und re)

3.2.1.3.2 Querlast

Wirkt auf den Verbindungspartner Schlaufenkomponente (mit einem biegesteifen, lastverteilenden Grund) eine Querlast so wird angenommen, dass es aufgrund der Geometrie wie auch den materialspezifischen Eigenschaften der Klettelemente und einem geringen Spiel an den jeweiligen Verbindungspunkten, zu nachfolgend dargestellten Belastungsangriffspunkten, -richtung sowie Bruchbildern kommt. Aus den Schlaufen resultiert eine Schräglast mit entsprechendem Angriffswinkel und in den Bereichen der Lasteinwirkung eine Druckbeanspruchung und daraus folgend eine Zugbelastung in den Schäften als auch im Betonkörper. Auf die lastabgewandte Hinterschneidung der Klettelemente wirkt keine Kraft infolge unbeanspruchter, loser Schlaufen. Dem vorangehenden Kapitel *Analyse der Befestigungstechnik in Beton* entsprechend wird angenommen, dass diese Schrägzugbelastung, im Vergleich mit einer zentrischen Zugbelastung, zu einer Verringerung der Bruchlast führt.

Wirkt die Querlast quer zur Hakenausrichtung werden dieselben Versagensarten erwartet. Infolge fehlender Hinterschneidungen in Lastangriffsrichtung kann es zudem zu einem Abgleiten der Schlaufen und einem verfrühten Lösen der Verbindung kommen.

Nachfolgende Abbildungen zeigen das Versagen durch einen Betonbruchkegel (jeweils li) und den Bruch des Hakenkopfes oder des gesamten Hakenelementes (jeweils m und re) aufgrund einer an dieser Position verorteten Schwachstelle im Klettelement.

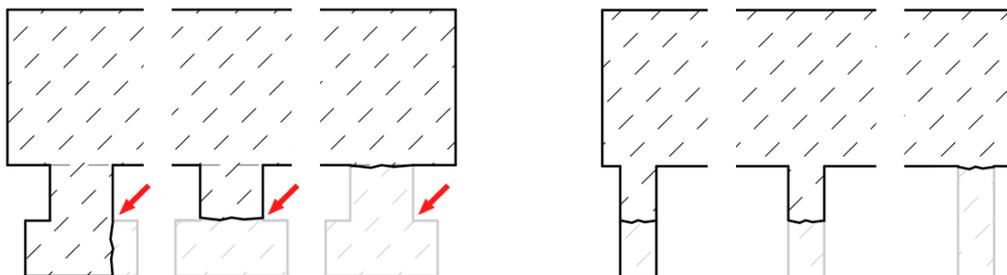


Abb. 92: Längsschnitt (li) und Querschnitt (re) des Versagens unter Querlast durch den Verbindungspartner Schlaufenkomponente und Betonbruch in Form eines Betonausbruchkegels (jeweils li) oder an einer geometrisch oder materialspezifisch bedingten Schwachstelle (jeweils m und re)

Unter Querlast wirkend auf den Verbindungspartner Einhängekomponente mit kraftschlüssig zwischen den Haken eingreifenden Klettelementen wird angenommen, dass in Lastrichtung wie auch an der Hakenkopfoberfläche (über die Verbindungsfläche linear verteilt) eine Druckbeanspruchung wirkt, während es auf der lastabgewandten Seite zu einer Zugbeanspruchung kommt (siehe auch Kapitel *Tragverhalten von Befestigungen, Querlast*). Übersteigt die Zugbeanspruchung die Zugtragfähigkeit der Hakenelemente kommt es zum Versagen der Betonstruktur. Aufgrund der unterschiedlich gerichteten Lasten je Hakenelement wird gegenüber der Zuglast eine reduzierte Bruchlast vermutet.

Nachfolgende Abbildungen zeigen ein Versagen durch einen Buchkegel (jeweils li) und ein Versagen aufgrund geometrisch bedingter Schwachstellen (jeweils m und re) bei einer Beanspruchung längs zur Hakenausrichtung. Quer zur Hakenausrichtung wird aufgrund des Verbindungspartners Einhängekomponente dasselbe Tragverhalten angenommen.

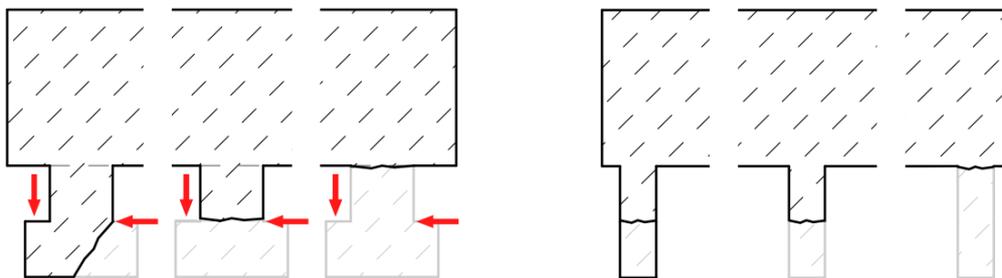


Abb. 93: Längsschnitt (li) und Querschnitt (re) des Versagens unter Querlast durch den Verbindungspartner Einhängekomponente und Betonbruch in Form eines Betonausbruchkegels (jeweils li) oder an einer geometrisch oder materialspezifisch bedingten Schwachstelle (jeweils m und re)

3.2.1.4 Verbindungspartner

Wie im Kapitel *Tragverhalten von Klettelementen* festgestellt, beruht das Lösen einer Klettverbindung auf der Flexibilität der Einhängenelemente,²⁰⁸ woraus zudem eine höhere Klettfähigkeit, infolge der Fähigkeit der Aufnahme von Lasten aus unterschiedlichen Lastrichtungen, resultieren kann.²⁰⁹

Die Klettbeton-Komponente Hakenstruktur entspricht einem biegesteifen Einhängenelement. Somit muss angenommen werden, dass es aufgrund der materialspezifischen Eigenschaften der Komponente zu einer Verringerung der Klettfähigkeit kommen kann, als auch das Herstellen oder Lösen der Klettverbindung mittels herkömmlicher, direkter Lösemethode zu Beschädigungen der Betonstruktur und den Hinterschneidungen der Klettelemente führt.

Zur Lösung dieser Problematik ist der Verbindungspartner entsprechend anzupassen. Wie im Kapitel *Stand der Technik* anhand der Patentrecherche sowie einer Darstellung aktueller Forschungsprojekte festgestellt werden konnte, sind Klettkomponenten mit aktivierbaren und deaktivierbaren Klettelementen Gegenstand aktueller Untersuchungen. Dieser Methodik folgend können herkömmliche Klettelemente in Haken-, Pilzkopf- oder Schlaufenform bei entsprechender

²⁰⁸ Vgl. Williams/Davies/Frazer 2007, 219.

²⁰⁹ Vgl. Gorb/Popov/Gorb 2002, 157

Abstimmung und Steuerung der Elemente, wie auch durch Anwendung spezieller Trennwerkzeuge oder auch Trennmethoden, als Verbindungspartner geeignet sein. Ob der zur Anwendung kommende Herstellungs- und Lösemechanismus idealerweise mechanisch, chemisch, elektrochemisch oder elektrisch wirkt, muss in weiterführenden Forschungen untersucht werden. Hinsichtlich der Bruchlast der Betonstruktur kann angenommen werden, dass Einhängekomponenten aufgrund ihrer gleichmäßigen Struktur der Klettelemente gegenüber Schlaufenkomponenten einen Vorteil bieten, da infolge einer unterschiedlichen Anzahl an Schlaufen je Verbindungspunkt eine ungleichmäßige Last je Klettelement resultieren kann.

Des Weiteren ist anzunehmen, dass hinsichtlich einer dauerhaften Befestigung im Bauwesen die Verbindung auch bei inaktiven Klettelementen bestehen muss und die Steuerung der Elemente vor allem den Vorgang der Herstellung und des Lösens der Verbindung betrifft.

3.2.1.5 Versuchsergebnis

Das Konzept Hakenstruktur wurde anhand von drei Herstellungsversuchen in unterschiedlichen Skalierungsgraden der Wachskörper und Dichtegraden der Klettelemente überprüft. Die Dimensionierung der Klettelemente orientiert sich, dem Prinzip der Klettverbindung entsprechend, an möglichst feinteiligen Strukturen bei gleichzeitiger Annahme der Möglichkeit der Herstellung aus Beton. Auf die Kornverteilung im Klettelement wurde aufgrund der im Kapitel *Oberflächenzugfestigkeit* gewonnen Erkenntnisse (die im Vergleich mit den Festigkeiten herkömmlicher Klettverbindungen hohe Zugfestigkeit) vorerst keine Rücksicht genommen. Der jeweilige Abstand zwischen den Klettelementen, im Verhältnis zur Länge der Hakenelemente, orientiert sich am Vorbild industrieller Produkte. Eine Feststellung der Klettfähigkeit der jeweiligen Versuchskörper erfolgte mittels händischer Tastversuche mit einer Versuchsschlaufenkomponente mit nicht steuerbaren Klettelementen.

3.2.1.5.1 Wachskörper

Im Unterschied zur Darstellung im Kapitel *Wachskörper* wurde die Wachsschalung nicht aus zwei Teilen gefertigt, sondern durch das abwechselnde händische Aufbringen von Wachsstreifen auf eine Grundfläche von 5 x 5 cm gebildet. Diese Vorgehensweise ermöglicht bei einer Herstellung von Hand auch bei kleinen Skalierungsgraden eine gute Steuerung der Größe der Klettelemente und der Achsabstände.

Die Versuche überprüfen das Konzept in unterschiedlichen Skalierungsgraden der Wachskörper sowie variierenden Achsabständen hinsichtlich einer Feststellung der Herstellbarkeit aus Beton und der resultierenden Klettfähigkeit. Der Skalierungsgrad der Klettelemente wird beginnend mit Hakenkopfquerschnitten (a/e) von $4/3$ mm wie auch einem Achsmaß in Hakenausrichtung (j) von 6 mm und quer zur Hakenausrichtung (k) von 5 mm schrittweise erhöht. Die resultierenden Abmessungen werden nachfolgend anhand der Versuchskörper dargestellt.

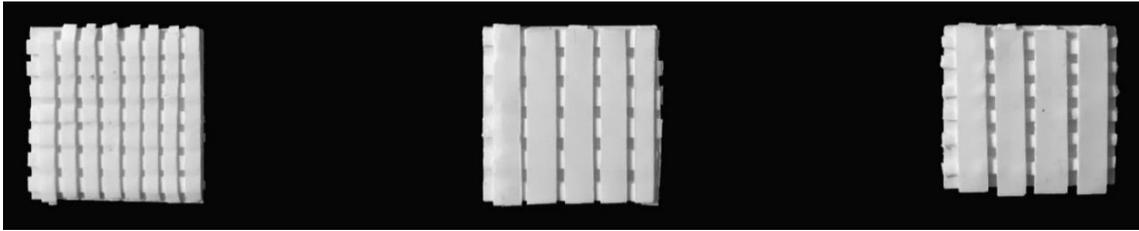


Abb. 94: Wachskörper der Versuche 1 (li), 2 (m) und 3 (re)

3.2.1.5.2 Versuchskörper

Die Herstellung der Versuchskörper mit den Abmessungen 5 x 5 x 3 cm erfolgte anhand der im Anhang in Kapitel *Herstellungsversuche* beschriebenen Versuchsdurchführung. Wie nachfolgende Übersicht zeigt, führten grundsätzlich alle Versuche zu einem positiven Ergebnis. Im Weiteren werden die einzelnen Versuchskörper anhand der Klettelemente sowie einer Feststellung der Klettfähigkeit im Detail beschrieben.

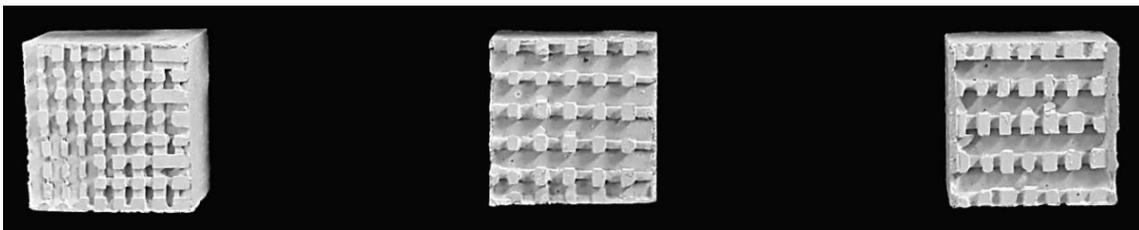


Abb. 95: Versuchskörper nach Entformung der Wachskörper 1 (li), 2 (m) und 3 (re)

Versuchskörper 1

Der Versuch bildet den kleinsten Skalierungsgrad des Konzeptes und zeigt eine Reihung einzelner Klettelemente in Hakenform mit scharfkantigen und zur Versuchskörper-Oberfläche parallelen Hinterschneidungen, wie auch vereinzelt unvollständige, fragmentarische Hakenköpfe mit abgeflachten oder fehlenden Hinterschneidungen. Zudem kommt es zu gänzlich fehlenden Hakenelementen infolge einer Beschädigung während der Entformung des Wachskörpers (siehe nachfolgende Abbildung). Diese Beschädigung wird nicht auf eine Dehnung des Wachskörpers, sondern einen Bruch infolge geometrisch bedingter Schwachstellen zurückgeführt. Diese Schwachstellen wie auch die unvollständigen Klettelemente resultieren aus den materialspezifischen Eigenschaften des Frischbetons, die geringe Fließfähigkeit in Abhängigkeit zur Dimensionierung der Querschnitte der Ausnehmungen der Wachskörper. Zudem können Ungenauigkeiten im Wachskörper, als auch Unterschiede in der Betonmischung infolge lokal auftretender, zu großer Gesteinskörnung zu diesem Resultat führen.

Die geometrischen Abmessungen der vollständigen Klettelemente (siehe nachfolgende Abbildung) stellen Durchschnittswerte dar und konnten wie folgt gemessen werden (die Bezeichnungen in den Klammern entsprechen den geometrischen Zusammenhängen aus dem Kapitel *Betonkörper*): Länge der Haken (a) 4 mm, Länge des Hakenschaftes (c) 2 mm, Breite der Haken (e) 3 mm, Abstand zwischen den Haken in Hakenausrichtung (b) 2 mm, seitlicher Abstand zwischen den Haken 2 mm (f), Abstand zwischen den Hakenschäften (d) 4 mm, Höhe des Hakenkopfes (h) 1 mm, Höhe des Hakenschaftes (i) 0,5 mm und Achsmaß in Hakenausrichtung (j) 6 mm wie auch Achsmaß quer zur Hakenausrichtung (k) 5 mm.

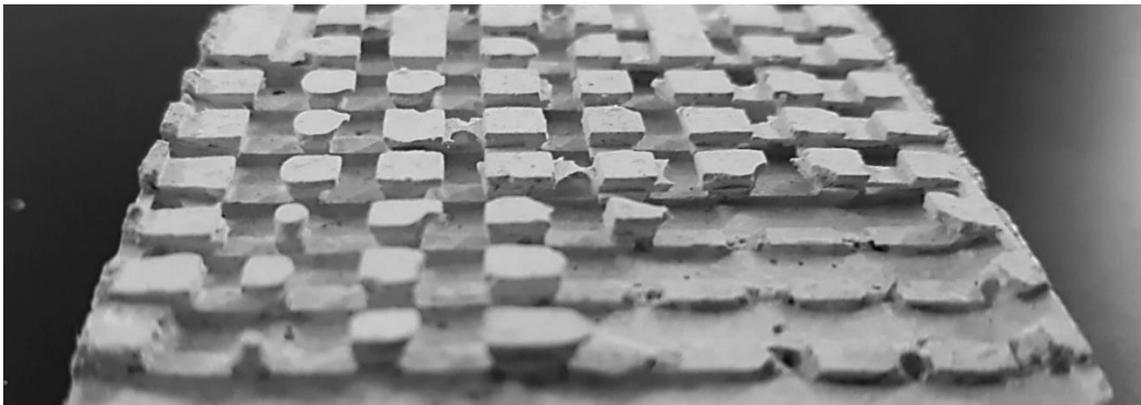


Abb. 96: Versuchskörper 1

Eine Feststellung der Klettfähigkeit, der Fähigkeit eine Verbindung mit einer, mit herkömmlichen Klettkomponenten vergleichbaren Klettkomponente einzugehen, erfolgte anhand der im Anhang in Kapitel *Klettversuche* beschriebenen qualitativen Versuchsdurchführung durch eine Versuchsschlaufenkomponente mit einer Schlaufenhöhe von 5 mm und einer Bewertung des Ergebnisses anhand der Klettfähigkeits-Bezeichnungen *negativ*, *gering*, *mittel* oder *hoch*.

Unter Zuglast, einer horizontalen Ausrichtung des Versuchskörpers, konnte bei Versuchskörper 1 eine hohe Klettfähigkeit festgestellt werden. Dazu wurde der Versuchskörper mehrmals auf die horizontal positionierte Schlaufenkomponente gepresst und anschließend angehoben. Unter Querlast, einer vertikalen Ausrichtung der Betonstruktur, konnte durch mehrfaches Anpressen und Lösen der Schlaufenkomponente ebenfalls eine hohe Klettfähigkeit festgestellt werden.

In diesem Ergebnis besteht die beste Bewertung der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Versuchskörper. Das Resultat wird auf die aus der Hakengeometrie folgenden, scharfkantigen und spitz zulaufenden Hinterschneidungen als auch auf die hohe Dichte an Klettelementen (in einem entsprechenden Verhältnis zum Verbindungspartner) zurückgeführt. Dennoch ist zu betonen, dass dieses qualitative Versuchsergebnis nur auf eine Fähigkeit der Herstellung einer Klettverbindung schließen lässt und verglichen mit herkömmlichen Klettprodukten nur eine geringe Klettfähigkeit festgestellt werden konnte.



Abb. 97: Versuchskörper 1 unter Querlast resultierend aus der Versuchs-Schlaufenkomponente mit einer Schlaufenhöhe von 5 mm

Versuchskörper 2

Der Versuch bildet den mittleren Skalierungsgrad und zeigt das positive Ergebnis einer Reihung einzelner Hakenelemente, bei vereinzelt unvollständigen Klettelementen. Teilweise fehlende oder abgeflachte Hinterschneidungen werden, wie bei dem vorangehenden Versuch, auf die materialspezifischen Eigenschaften des Frischbetons und eine unvollständige Füllung der Hohlräume der Wachsschalung zurückgeführt. Verglichen mit Versuchskörper 1 zeigt sich, dass die variierenden Achsabstände keinen feststellbaren Einfluss auf die geometrische Vollständigkeit und Ausbildung der Klettelemente nehmen.

Die geometrischen Abmessungen der Klettelemente (siehe nachfolgende Abbildung) stellen Durchschnittswerte dar und konnten wie folgt festgestellt werden: Länge der Haken (a) 5 mm, Länge des Hakenschaftes (c) 2 mm, Breite der Haken (e) 3 mm, Abstand zwischen den Haken in Hakenausrichtung (b) 5 mm, seitlicher Abstand zwischen den Haken 5 mm (f), Abstand zwischen den Hakenschäften (d) 6,5 mm, Höhe des Hakenkopfes (h) 1 mm, Höhe des Hakenschaftes (i) 1,5 mm und Achsmaß in Hakenausrichtung (j) 10 mm wie auch quer zur Hakenausrichtung (k) 8 mm.

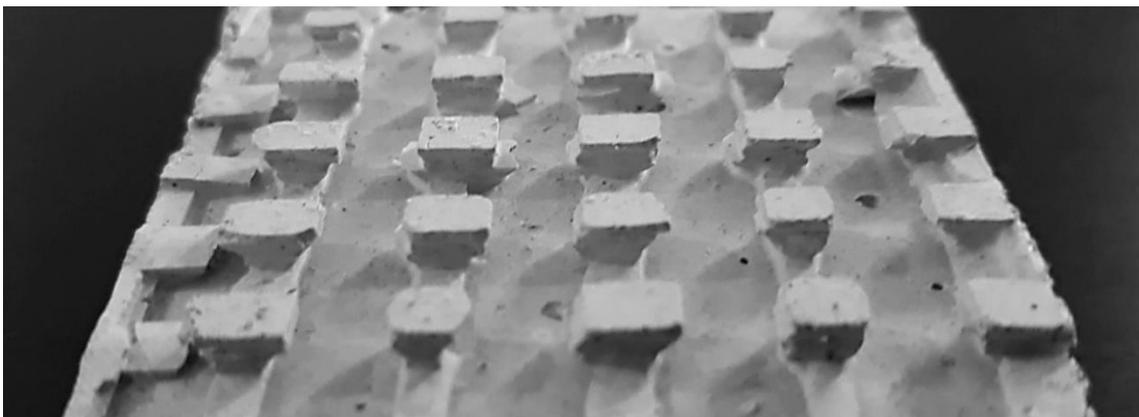


Abb. 98: Versuchskörper 2

Eine Feststellung der Klettfähigkeit erfolgte anhand der für Versuchszwecke hergestellten Schlaufenkomponente mit einer Schlaufenhöhe von 5 mm. Das Ergebnis zeigt eine geringe Klettfähigkeit unter Zuglast und eine hohe Klettfähigkeit unter Querlast. Der Unterschied zu dem Ergebnis von Versuchskörper 1 wird auf die im Verhältnis geringere Dichte an Klettelementen infolge des Abstandes zwischen den Elementen wie auch die gesteigerte Höhe der Hakenköpfe (h) zurückgeführt.

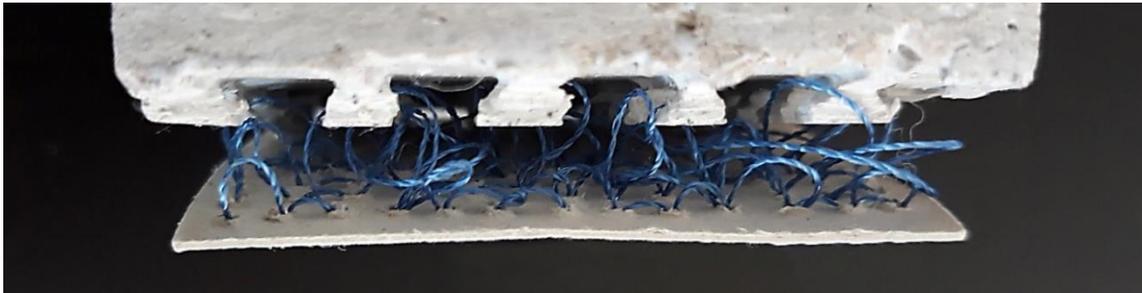


Abb. 99: Versuchskörper 2 unter Querlast resultierend aus der Versuchs-Schlaufenkomponente mit einer Schlaufenhöhe von 5 mm

Versuchskörper 3

Der Versuch bildet den größten Skalierungsgrad der Herstellungsversuche des Konzeptes Hakenstruktur. Das Ergebnis zeigt hinsichtlich einer geometrischen Nachbildung des industriellen Vorbildes, des T-förmigen Hakenklettelements, das beste Ergebnis bei nur vereinzelt unvollständigen oder abgeflachten Hinterschneidungen.

Die geometrischen Abmessungen der Klettelemente (siehe nachfolgende Abbildung) stellen Durchschnittswerte dar und konnten wie folgt festgestellt werden: Länge der Haken (a) 6 mm, Länge des Hakenschaftes (c) 3 mm, Breite der Haken (e) 4 mm, Abstand zwischen den Haken in Hakenausrichtung (b) 5 mm, seitlicher Abstand zwischen den Haken 3 mm (f), Abstand zwischen den Hakenschaften (d) 8 mm, Höhe des Hakenkopfes (h) 1,5 mm, Höhe des Hakenschaftes (i) 2 mm und Achsmaß in Hakenausrichtung (j) 11 mm wie auch Achsmaß quer zur Hakenausrichtung (k) 7 mm.

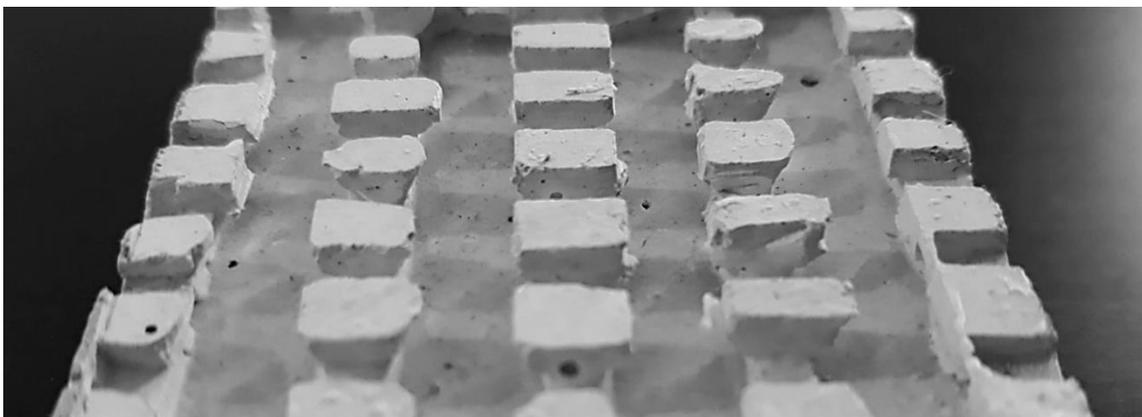


Abb. 100: Versuchskörper 3

Eine Feststellung der Klettfähigkeit erfolgte aufgrund des größeren Skalierungsgrades der Hakenelemente anhand der Versuchs-Schlaufenkomponente mit der Schlaufenhöhe 10 mm. Wie bei Versuchskörper 2 konnte trotz einer hohen Anzahl an vollständigen Hinterschneidungen nur eine geringe Klettfähigkeit unter Zuglast und eine hohe Klettfähigkeit unter Querlast festgestellt werden. Das Ergebnis unter Zuglast wird auf die im Vergleich mit Versuchskörper 1 im Verhältnis geringere Dichte an Klettelementen, die gesteigerte Höhe der Hakenköpfe und die Schlaufenhöhe zurückgeführt. Aus längeren Schlaufen des Verbindungspartners resultiert eine geringere Biegefestigkeit wodurch ein Einbringen in die Hinterschneidungen der Haken und eine Herstellung der Verbindung erschwert wird. Diese Eigenschaft macht sich vor allem bei einer Herstellung der Verbindung unter Zuglast (einer horizontalen Ausrichtung der Schlaufenkomponente) bemerkbar.



Abb. 101: Versuchskörper 3 unter Querlast resultierend aus der Versuchs-Schlaufenkomponente mit einer Schlaufenhöhe von 10 mm

3.2.2 Pilzkopfstruktur

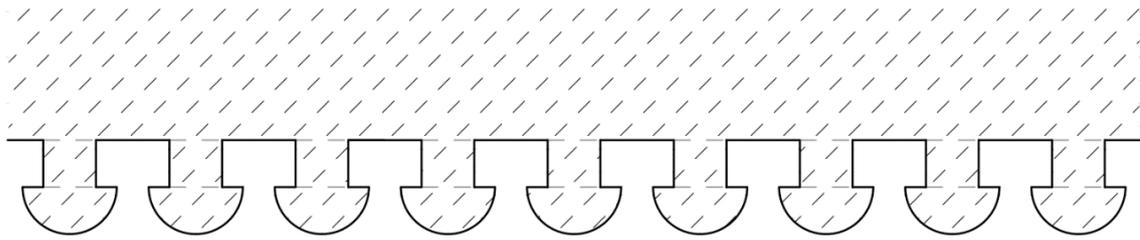


Abb. 102: Konzeptprinzip Pilzkopfstruktur

Das Konzept Pilzkopfstruktur entspricht der Herstellung einer biegesteifen Einhängekomponente aus Beton durch die Nachbildung herkömmlicher, industrieller Pilzkopf-Klettelemente bestehend aus Pilzkopf-Schaft und Pilzkopf-Kopf. Die Klettelemente wie auch die jeweiligen, umlaufenden Hinterschneidungen sind gleichmäßig und ungerichtet. Das Konzept wird in weiterer Folge auf einen quaderförmigen Körper begrenzt dargestellt, kann aber der Herstellungsmethode entsprechend, in Größe der Klettelemente und Anwendungsfläche skaliert werden.

3.2.2.1 Wachskörper

Der Wachskörper, die Wachsschalung, bildet die Negativform des Konzeptes. Wie in nachfolgender Abbildung dargestellt, besteht er aus zwei Komponenten. Teil A (o) ist durch Ausnehmungen in Form eines Zylinders gekennzeichnet und bildet den Schaft des Pilzkopfelementes. Die Ausnehmungen in Teil B (u) entsprechen einer Halbkugel und bilden, lagerichtig positioniert, den Kopf des Pilzkopf-Klettelementes. Der eingebrachte Beton fließt durch Teil A (Pilzkopf-Schäfte), sammelt sich in Teil B (Pilzkopf-Köpfe) und formt das Pilzkopfelement.

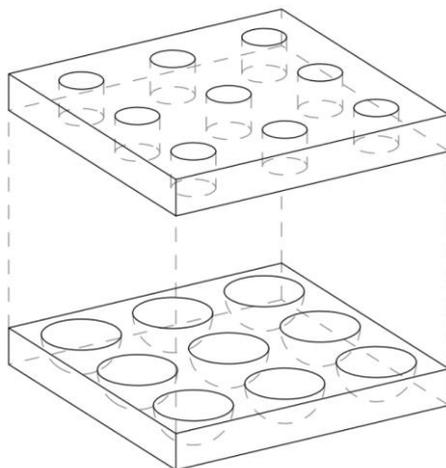


Abb. 103: Wachskörper bestehend aus Teil A (Pilzkopf-Schaft, o) und Teil B (Pilzkopf-Kopf, u)

3.2.2.2 Betonkörper

Der Betonkörper resultiert aus dem Wachskörper. Seine Herstellung umschließt die Positionierung des Wachskörpers am Grund einer entsprechend dimensionierten Schalung, das Einbringen des Betons, das Verdichten und Nachbehandeln, das Ausschalen sowie das abschließende Entformen des Wachskörpers mit heißem Wasser.

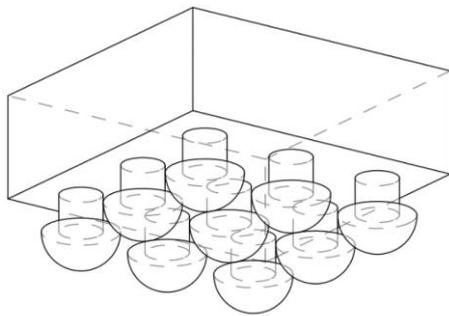


Abb. 104: Betonkörper resultierend aus dem Wachskörper

Nachfolgende Untersicht mit Blickrichtung auf die Klettelemente sowie der Längsschnitt durch den Mittelpunkt der Klettelemente dienen der Benennung der geometrischen Zusammenhänge der Betonstruktur. Die Außenmaße des Betonkörpers sind mit L und H definiert. Der Durchmesser der Pilzköpfe (a) im Verhältnis zum Durchmesser des Pilzkopfschaftes (c) bestimmt den Bereich der Hinterschneidung sowie die Verbindungsfläche bei Herstellung der Verbindung mit einem Verbindungspartner. In Abhängigkeit dazu beschreiben der Abstand zwischen den Pilzköpfen (b) wie auch der Abstand zwischen den Pilzkopfschaften (d) und das Achsmaß (j) die Dichte der Klettelemente. Diese Parameter, wie auch die Länge des Pilzkopfschaftes (e), sind mit dem Verbindungspartner auf die jeweilige Verbindungssituation abzustimmen. Die Parameter c und a bestimmen den Querschnitt des Klettelements und somit die Betonmenge wie auch den Aufbau (Kornverteilung) im Klettelement und können in weiterführenden Untersuchungen entsprechend behandelt werden.

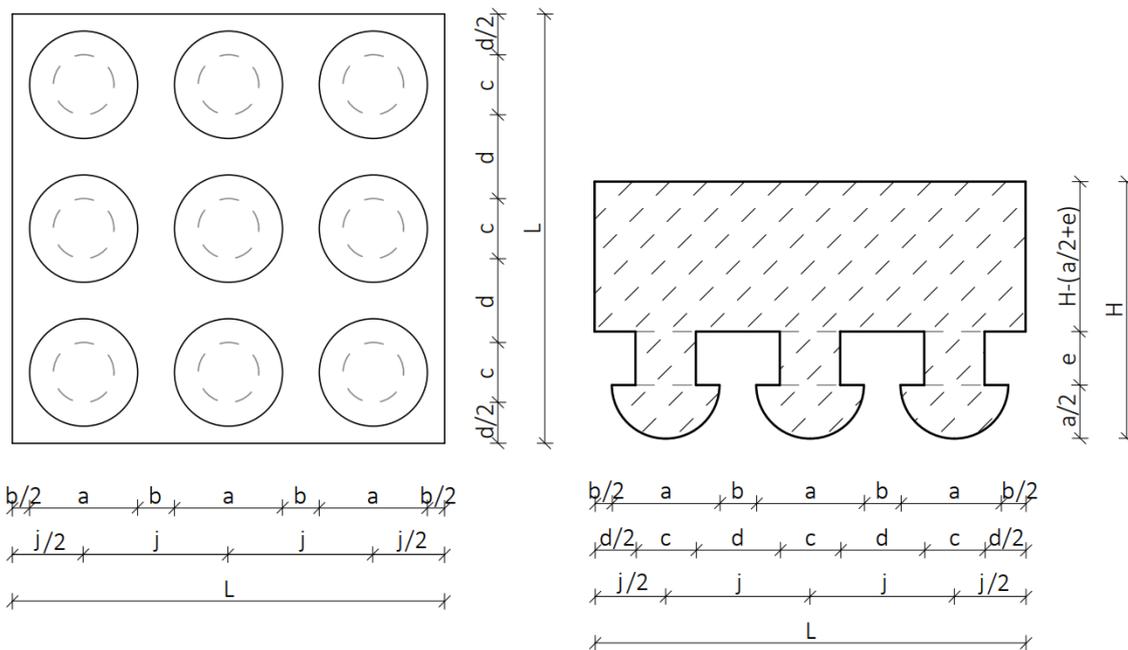


Abb. 105: Betonkörper in Untersicht (li) und Schnitt (re)

L : Länge Betonkörper

H : Höhe Betonkörper

a : Durchmesser Pilzkopf

b : Abstand zwischen den Pilzköpfen

c : Durchmesser Pilzkopfschaft

d : Abstand zwischen den Pilzkopfschäften

e : Länge Pilzkopfschaft

j : Achsmaß der Pilzkopfelemente

3.2.2.3 Tragverhalten

Die Beschreibung des Tragverhaltens der Betonstruktur beruht auf der vorangehenden *Analyse der Befestigungstechnik in Beton* und wird vordergründig anhand des Verbindungspartners Schlaufenelement und Verbindungspunkten bestehend aus einem Pilzkopf mit zwei gegenüberliegenden, verbundenen Schlaufen untersucht (siehe orange Strichlierung in nachfolgender Abbildung). Zudem wird das Tragverhalten resultierend aus dem Verbindungspartner Einhängekomponente und Verbindungspunkten bestehend aus einem Beton-Pilzkopf im Verbund mit jeweils vier komplementären Pilzkopfelementen angeführt.

Erfolgt eine Zugbelastung des Verbindungspartners (Schlaufen- oder Einhängekomponente) wird der Beton im Bereich der Hinterschneidungen durch die Kraft F beansprucht. In den Bereichen der Lasteinwirkung herrscht eine Druckbelastung, in den Pilzkopfschäften und an der Verbindung zum wie auch im Betonkörper eine Zugbelastung.

Kommt es zu von dieser Darstellung abweichenden Verbindungspunkten, beispielsweise im Falle einer geringeren oder erhöhten Anzahl an Schlaufen je Beton-Pilzkopf, kann eine ungleichmäßige Belastung einzelner Pilzköpfe resultieren. Für den Verbindungspartner Einhängekomponente wird aufgrund der gleichmäßigen Struktur und Anzahl der Klettelemente eine ungleichmäßige Belastung ausgeschlossen.

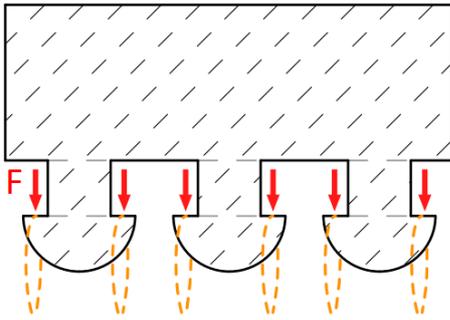


Abb. 106: Schnittdarstellung der Krafteinwirkung unter Zugbelastung resultierend aus dem Klettelement Schlaufe

3.2.2.3.1 Zuglast

Wirkt auf den Verbindungspartner mit einem biegesteifen, lastverteilenden Grund eine zentrische Zuglast wird angenommen, dass es je Pilzkopfelement zu einem Betonversagen durch Ausbildung eines Betonausbruchkegels unter einem Winkel von 35° kommen kann (nachfolgende Abbildung, li). Für eine maximale Bruchlast, eine vollständige Ausbildung dieser Kegel, ist ein Achsabstand der einzelnen Klettelemente der 3-fachen Verankerungstiefe einzuhalten. Zudem kann es aufgrund von geometrisch oder materialspezifisch bedingten Schwachstellen zu einem Bruch im Bereich des Klettelements, in der Regel des Pilzkopfschaftes kommen (nachfolgende Abbildung, m und re). Einflussfaktoren auf das Versagen sind die Bauteilgeometrie, die Abmessungen der Klettelemente in Abhängigkeit zur Betonmischung, die Ausführungsqualität während der Herstellung und der Verbindungspartner.

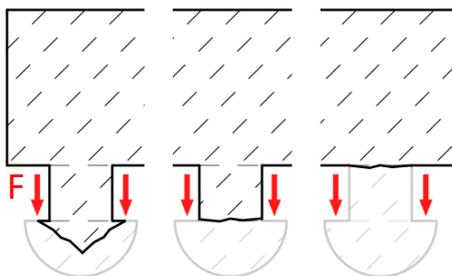


Abb. 107: Schnittdarstellung des Versagens unter Zuglast durch den Verbindungspartner Schlaufenkomponente und Betonbruch in Form eines Betonausbruchkegels (li) oder an einer geometrisch oder materialspezifisch bedingten Schwachstelle (m, re)

3.2.2.3.2 Querlast

Unter Querlast, wirkend auf den Verbindungspartner Schlaufenkomponente, wird ähnlich dem Konzept Hakenstruktur angenommen, dass es zu nachfolgend dargestellten Belastungsangriffspunkten, -richtungen sowie Bruchbildern kommt. Aus den materialspezifischen und geometrischen Eigenschaften der Schlaufenkomponente und der Klettelemente resultierend, wirkt eine Schrägzugbelastung welche sich in den Bereichen der Lasteinwirkung als eine Druckbeanspruchung sowie auf der entgegengesetzten Seite der Klettelemente durch lose Schlaufen kennzeichnet (siehe nachfolgende Abbildung, li) .

Das Versagen durch die Ausbildung eines Bruchkegels oder infolge eines vollständigen Bruchs des Klettelements wird durch geometrische sowie materialspezifische Bedingungen und Schwachstellen bestimmt. Aufgrund der ungleichmäßigen sowie schräg gerichteten Belastung der Klettelemente wird angenommen, dass es gegenüber der Zugbelastung zu einer Verringerung der Bruchlast kommt.

Wird der Verbindungspartner durch eine Einhängekomponente mit lastverteilendem Grund und beispielsweise Pilzkopf-Klettelementen gebildet, resultiert aus der Position der Klettelemente des Verbindungspartners zwischen den Klettelementen der Beton-Pilzkopfstruktur eine Druckbelastung in Lastrichtung wie auch an den Beton-Pilzkopfoberflächen und eine Zugbelastung auf der jeweiligen lastabgewandten Seite (siehe nachfolgende Abbildung, re).

Übersteigt die Zugbelastung die Zugtragfähigkeit der Klettelemente aus Beton, kommt es zum Versagen der Befestigung durch Betonbruch. Aufgrund der unterschiedlichen Angriffsrichtungen je Klettelement wird eine Verringerung der Bruchlast gegenüber der Zuglast angenommen.

Nachfolgende Abbildungen zeigen jeweils die Ausbildung eines Bruchkegels (li) und einen Bruch des Klettelements (m und re).

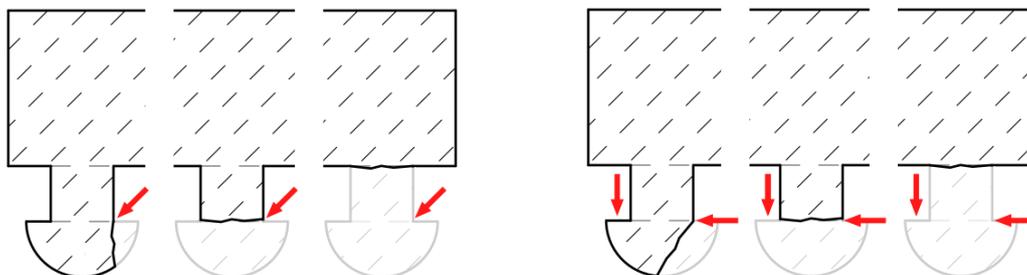


Abb. 108: Schnittdarstellung des Versagens unter Querlast durch die Verbindungspartner Schlaufenkomponente (li) und Einhängekomponente (re) in Form eines Betonausbruchkegels (jeweils li) oder an einer geometrisch oder materialspezifisch bedingten Schwachstelle (jeweils m und re)

3.2.2.4 Verbindungspartner

Der Analyse im Kapitel *Tragverhalten von Klettelementen* folgend, beruht das Lösen einer Klettverbindung auf der Flexibilität der Einhängeelemente,²¹⁰ woraus zudem eine höhere Klettfähigkeit, infolge der Fähigkeit der Aufnahme von Lasten aus unterschiedlichen Lastrichtungen, resultieren kann.²¹¹

Das Konzept Pilzkopfstruktur entspricht einer biegesteifen Einhängekomponente aus Beton. Wie beim vorangehenden Konzept *Hakenstruktur* können somit eine verringerte Klettfähigkeit wie auch Beschädigungen der Betonstruktur beim Herstellen und Lösen der Klettverbindung folgen. Bei weiterführenden Untersuchungen ist ein Verbindungspartner mit mechanisch, chemisch, elektro-chemisch oder elektrisch aktivierbaren und deaktivierbaren Klettelementen oder auch entsprechende Trennwerkzeuge und Trennmethoden anzudenken. Es ist erneut anzunehmen, dass Einhängekomponenten gegenüber Schlaufenkomponenten bezüglich der Bruchlast einen Vorteil bieten, wie auch hinsichtlich einer dauerhaften Befestigung im Bauwesen die Verbindung auch bei inaktiven Klettelementen bestehen muss und die Steuerung der Elemente vor allem den Vorgang der Herstellung und des Lösens der Verbindung betrifft.

3.2.2.5 Versuchsergebnis

Das Konzept Pilzkopfstruktur wurde anhand von drei Herstellungsversuchen in unterschiedlichen Skalierungsgraden der Wachskörper sowie Dichtegraden der Klettelemente überprüft. Die Dimensionierung der Klettelemente orientiert sich, wie beim vorangehenden Konzept, an möglichst feinteiligen Strukturen bei gleichzeitiger Annahme der Möglichkeit der Herstellung aus Beton. Auf die Kornverteilung im Klettelement wurde vorerst keine Rücksicht genommen. Der jeweilige Abstand zwischen den Klettelementen, im Verhältnis zum Durchmesser der Klettelemente, orientiert sich am Vorbild industrieller Produkte. Eine Feststellung der Klettfähigkeit der jeweiligen Versuchskörper erfolgte mittels händischer Tastversuche mit einer Versuchs-Schlaufenkomponente.

3.2.2.5.1 Wachskörper

Der Wachskörper wurde je Versuch aus zwei Teilen mit den äußeren Abmessungen 5 x 5 cm gebildet und besitzt an einem Raster ausgerichtete Ausnehmungen in Zylinder- und Halbkugelform. Aufgrund der Herstellung von Hand erfolgte eine Segmentierung (geradlinige Unterteilung) der Halbkugelform (der Pilzkopf-Köpfe).

Die nachfolgend abgebildeten Wachskörper dienen der Überprüfung des Konzeptes in unterschiedlichen Skalierungsgraden und Achsabständen der jeweiligen Klettelemente hinsichtlich einer Herstellbarkeit aus Beton und der resultierenden Klettfähigkeit.

²¹⁰ Vgl. Williams/Davies/Frazer 2007, 219.

²¹¹ Vgl. Gorb/Popov/Gorb 2002, 157

Der Skalierungsgrad der Klettelemente wird beginnend mit einem Pilzkopfdurchmesser (a) von 4 mm wie auch einem Achsmaß (j) von 7 mm schrittweise erhöht. Die resultierenden Abmessungen werden beim jeweiligen Versuchskörper angeführt.

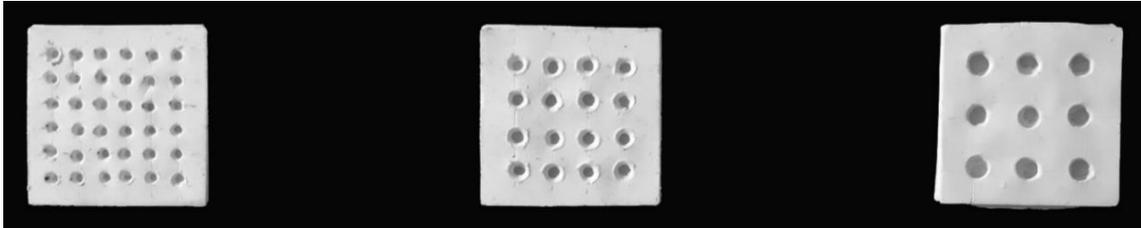


Abb. 109: Wachskörper der Versuche 1 (li), 2 (m) und 3 (re)

3.2.2.5.2 Versuchskörper

Die Herstellung der Versuchskörper erfolgte anhand einer Schalung mit den Abmessungen 5 x 5 x 3 cm entsprechend der im Anhang in Kapitel *Herstellungsversuche* beschriebenen Versuchsdurchführung. Wie nachfolgende Übersicht zeigt, führten grundsätzlich alle Versuche zu einem positiven Ergebnis. Im Weiteren werden die einzelnen Versuchskörper anhand der Klettelemente sowie einer Feststellung der Klettfähigkeit im Detail beschrieben.

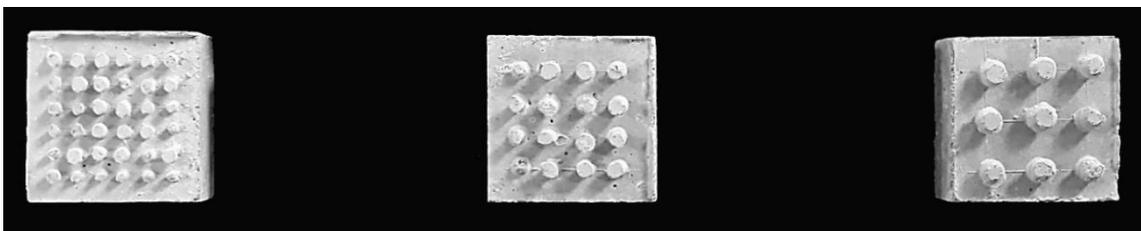


Abb. 110: Versuchskörper nach Entformung der Wachskörper 1 (li), 2 (m) und 3 (re)

Versuchskörper 1

Der Versuch bildet den kleinsten Skalierungsgrad der Ausnehmungen im Wachskörper und der Klettelemente und zeigt das grundsätzlich positive Ergebnis einer Reihung einzelner Klettelemente in Pilzkopfform mit vereinzelt unvollständigen, fragmentarischen aber auch gänzlich fehlenden Pilzkopfköpfen. Zu unvollständigen Klettelementen kommt es aufgrund der materialspezifischen Eigenschaften des Frischbetons infolge einer geringen Fließfähigkeit in Abhängigkeit zur Dimensionierung der Ausnehmungen im Wachskörper.

Die geometrischen Abmessungen der vollständigen Klettelemente (siehe nachfolgende Abbildung) stellen Durchschnittswerte dar und konnten wie folgt gemessen werden (die Bezeichnungen in den Klammern entsprechen den geometrischen Zusammenhängen aus dem Kapitel *Betonkörper*): Durchmesser der Pilzköpfe (a) 4 mm, Durchmesser des Pilzkopfschaftes (c) 2 mm, Abstand zwischen den Pilzköpfen (b) 3 mm, Abstand zwischen den Pilzkopfschaften (d) 4 mm, Länge oder Höhe des Pilzkopfschaftes (e) 2 mm und Achsmaß (j) 7 mm.

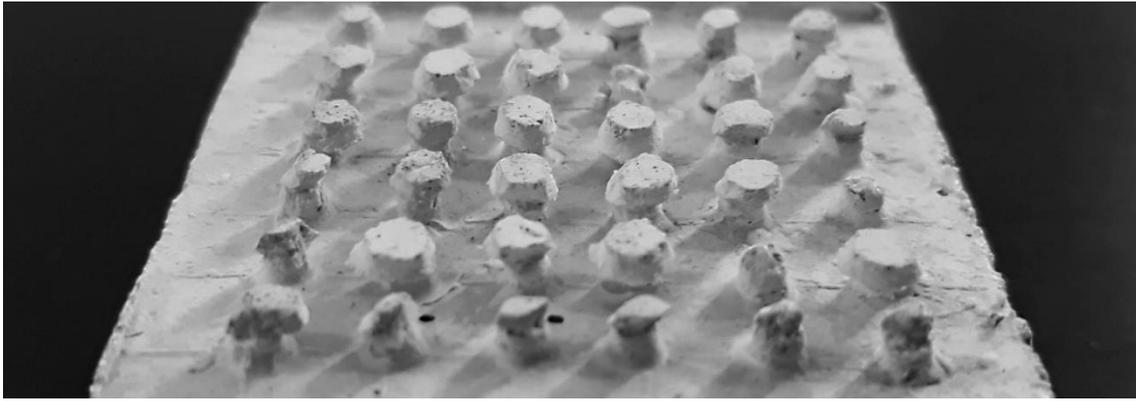


Abb. 111: Versuchskörper 1

Eine qualitative Feststellung der Klettfähigkeit, der Fähigkeit eine Verbindung mit einer, mit herkömmlichen Klettkomponenten vergleichbaren Klettkomponente einzugehen, wurde anhand von Tastversuchen durch die Versuchs-Schlaufenkomponente mit einer Schlaufenhöhe von 5 mm durchgeführt. Eine Bewertung des Ergebnisses erfolgt wie beim vorangehenden Konzept durch eine Einteilung anhand der Klettfähigkeits-Bezeichnungen *negativ*, *gering*, *mittel* oder *hoch*.

Unter Zuglast, einer horizontalen Ausrichtung des Versuchskörpers, konnte eine geringe Klettfähigkeit festgestellt werden. Dieses Ergebnis kann auf die teilweise unvollständige Ausbildung der Pilzkopfköpfe wie auch der Hinterschneidungen zurückgeführt werden. Verglichen mit dem Ergebnis von Versuchskörper 1 der Hakenstruktur wird jedoch angenommen, dass vor allem der größere Abstand zwischen den einzelnen Klettelementen, wie auch die runde Form der Hinterschneidungen einen Verbund erschwert und es durch diese Geometrie unter Zuglast eher zu einem Abgleiten der Schlaufen kommt. Unter Querlast, einer vertikalen Ausrichtung der Betonstruktur, konnte hingegen eine vergleichsweise hohe Klettfähigkeit festgestellt werden.



Abb. 112: Versuchskörper 1 unter Querlast resultierend aus der Versuchs-Schlaufenkomponente mit einer Schlaufenhöhe von 5 mm

Versuchskörper 2

Der Versuch bildet den mittleren Skalierungsgrad und zeigt eine Reihung einzelner Pilzkopfelemente bei vereinzelt unvollständigen, wie auch gänzlich fehlenden Klettelementen. Das Ergebnis wird auf die materialspezifischen Eigenschaften des Frischbetons in Abhängigkeit zur Dimensionierung der Ausnehmungen der Waskörper zurückgeführt. Die fehlenden Klettelemente resultieren aus einer Beschädigung infolge einer geometrisch bedingten Schwachstelle im Rahmen der Entformung, nicht aus einer Sprengwirkung des Waxes. Im Vergleich mit Versuchskörper 1 wird hinsichtlich der Achsabstände kein Einfluss auf die vollständige Ausbildung der Klettelemente festgestellt.

Die geometrischen Abmessungen der vollständigen Klettelemente (siehe nachfolgende Abbildung) stellen Durchschnittswerte dar und konnten wie folgt festgestellt werden: Durchmesser der Pilzköpfe (a) 5 mm, Durchmesser des Pilzkopfschaftes (c) 3 mm, Abstand zwischen den Pilzköpfen (b) 5 mm, Abstand zwischen den Pilzkopfschäften (d) 6 mm, Länge oder Höhe des Pilzkopfschaftes (e) 3 mm und Achsmaß (j) 10 mm.

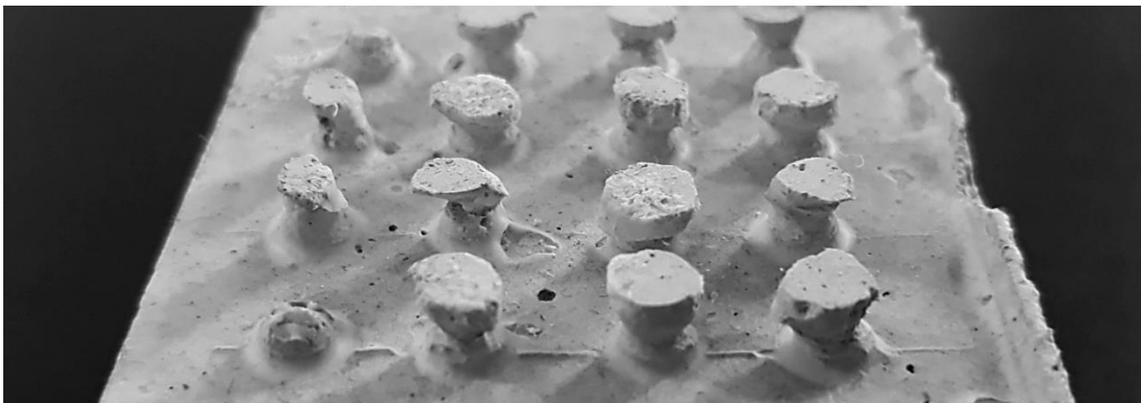


Abb. 113: Versuchskörper 2

Eine Feststellung der Klettfähigkeit wurde anhand der Versuchs-Schlaufenkomponente mit einer Schlaufenhöhe von 5 mm durchgeführt. Es konnte ein dem Versuchskörper 1 entsprechendes Ergebnis festgestellt werden, eine geringe Klettfähigkeit unter Zuglast sowie eine (im Verhältnis) hohe Klettfähigkeit unter Querlast. Wie in nachfolgender Abbildung ersichtlich, sind die Hinterschneidungen in Richtung des Verbindungspartners geneigt und nicht wie angestrebt, parallel zur Versuchskörper-Oberfläche. Daraus folgt ein Abgleiten der Schlaufen beim Versuch der Herstellung der Verbindung unter Zuglast und eine geringe Klettfähigkeit.



Abb. 114: Versuchskörper 2 unter Querlast resultierend aus der Versuchs-Schlaufenkomponente mit einer Schlaufenhöhe von 5 mm

Versuchskörper 3

Der Versuch bildet den größten Skalierungsgrad der Herstellungsversuche des Konzeptes Pilzkopfstruktur und zeigt eine annähernd vollständige Ausbildung der Klettelemente wie auch zur Bauteiloberfläche parallele Hinterschneidungen. Das positive geometrische Resultat wird auf die größeren Ausnehmungen der Wachskörper zurückgeführt.

Die geometrischen Abmessungen der Klettelemente (siehe nachfolgende Abbildung) stellen Durchschnittswerte dar und konnten wie folgt gemessen werden: Durchmesser der Pilzköpfe (a) 8 mm, Durchmesser des Pilzkopfschaftes (c) 6 mm, Abstand zwischen den Pilzköpfen (b) 8 mm, Abstand zwischen den Pilzkopfschäften (d) 10 mm, Länge oder Höhe des Pilzkopfschaftes (e) 3 mm und Achsmaß (j) 15 mm.



Abb. 115: Versuchskörper 3

Eine Feststellung der Klettfähigkeit erfolgte mit der Versuchs-Schlaufenkomponente und einer Schlaufenhöhe von 10 mm. Den vorangehenden Versuchskörpern entsprechend, konnte eine geringe Klettfähigkeit unter Zuglast und eine hohe Klettfähigkeit unter Querlast festgestellt werden. Trotz der vollständigen Ausbildung von zur Bauteiloberfläche parallelen Hinterschneidungen (siehe nachfolgende Abbildung) kommt es verglichen mit Versuchskörper 1 und Versuchskörper 2 des Konzeptes Pilzkopfstruktur, jedoch im Besonderen im Vergleich mit Versuchskörper 1 des Konzeptes Hakenstruktur, zu einer geringen Klettfähigkeit unter Zuglast. Das Ergebnis wird auf die im Verhältnis geringere Dichte der Klettelemente infolge des Abstandes

zwischen den Pilzköpfen, die runde Form der Hinterschneidungen wie auch die gesteigerte Schlaufenlänge der Versuchs-Schlaufenkomponente und die daraus folgende, geringere Biegesteifigkeit zurückgeführt. Aufgrund der nahezu vollständig ausgebildeten Beton-Klettelemente wird angenommen, dass bei entsprechender Abstimmung und Ausbildung des Verbindungspartners, eine hohe Klettfähigkeit unter Zuglast erreicht werden kann.

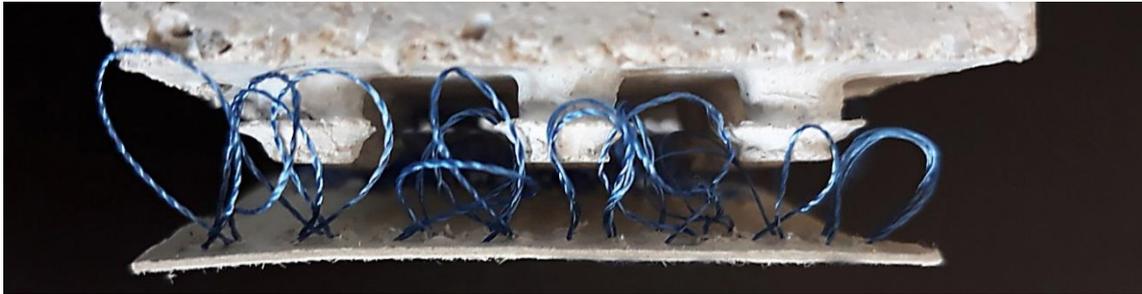


Abb. 116: Versuchskörper 3 unter Querlast resultierend aus der Versuchs-Schlaufenkomponente mit einer Schlaufenhöhe von 10 mm

Die Untersuchung der Herstellung von Einhängekomponenten aus Beton abschließend, konnten Versuchskörper hergestellt werden, die eine Klettfähigkeit mit einer nicht aktivier- und deaktivierbaren Versuchs-Schlaufenkomponente aufweisen.

Als wesentlichen Faktoren für die Klettfähigkeit konnten die hohe Dichte an Klettelementen und ein geringer Abstand zwischen diesen Elementen, wie auch verbindungsfähige (scharfkantige und zur Bauteiloberfläche parallele) Hinterschneidungen festgestellt werden. Grundsätzlich kam es bei Einhängekomponenten unter Zuglast zu einer eher geringen Klettfähigkeit und unter Querlast zu einer eher hohen Klettfähigkeit.

Die Ergebnisse weiterführend, stellt eine Kombination der Konzepte Hakenstruktur und Pilzkopfstruktur mit quadratischen „Pilzkopfelementen“, hinsichtlich einer hohen Klettfähigkeit wie auch der Aufnahme unterschiedlich gerichteter Lasten, einen vielversprechenden Untersuchungsgegenstand dar.

3.2.3 Lochstruktur

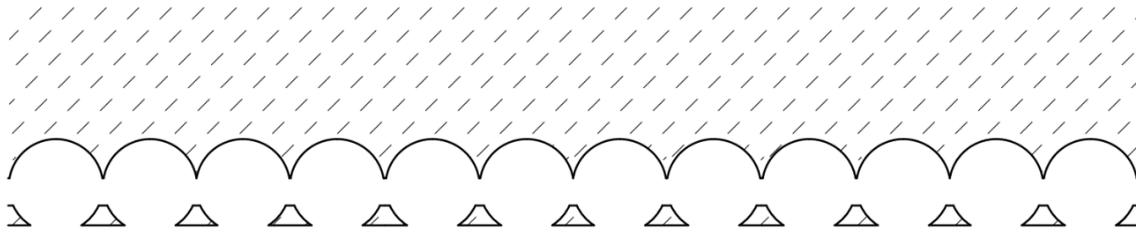


Abb. 117: Konzeptprinzip Lochstruktur

Das Konzept Lochstruktur entspricht der Herstellung einer biegesteifen Schlaufenkomponente aus Beton. Aufgrund der materialspezifischen Eigenschaften dieses Werkstoffes können keine dem Produkt *Flausch* oder *Velour* entsprechende Fasern oder flexible Schlaufen geformt werden. Das Produkt *Metaklett* und die Komponentenkombination *Flamingo mit Lochblech* als Vorbild nehmend, wird die Schlaufenkomponente daher als kugelförmige Lochstruktur abstrahiert. Das Konzept wird in weiterer Folge auf einen quaderförmigen Körper begrenzt dargestellt, kann aber der Herstellungsmethode entsprechend, in Größe der Klettelemente und Anwendungsfläche skaliert werden.

3.2.3.1 Wachskörper

Der Wachskörper besteht aus einer Aneinanderreihung von Wachskugeln des gleichen Durchmessers mit einer Abflachung in Schalungsrichtung. Diese Abflachung dient als Auflagefläche und bestimmt die Öffnung der Hohlräume sowie im Verhältnis zum Durchmesser der Kugeln die Hinterschneidung des Klettelements. Um eine möglichst hohe Anzahl an Hohlräumen (Klettelementen) pro Fläche bei gleichzeitig möglichst großer Hinterschneidung zu gewährleisten, wurde die Kugeln aneinandergereiht. Der eingebrachte Beton sammelt sich diagonal zwischen den Kugeln, bildet sich bis zur Schalung fort, umhüllt die Wachskugeln und formt das Lochelement.

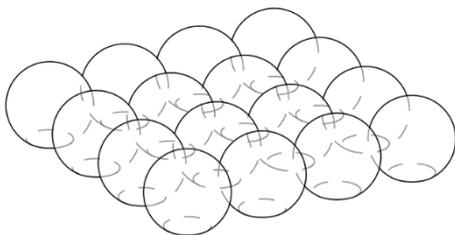


Abb. 118: Wachskörper in Form aneinandergereihter Wachskugeln

3.2.3.2 Betonkörper

Der Betonkörper zeigt das angestrebte Resultat der Herstellung der Schlaufenstruktur mit dem Wachskörper. Der monolithische Betonkörper bildet an der Schalseite, der Betonoberfläche, Öffnungen mit dahinterliegenden Hohlräumen zur Aufnahme komplementärer Klettelemente.

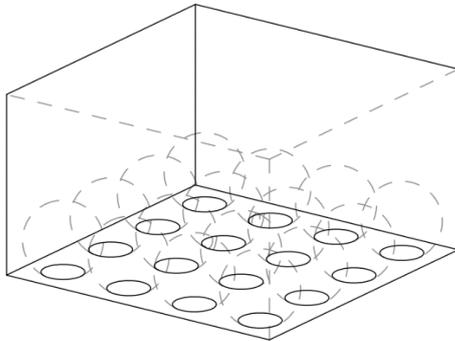


Abb. 119: Betonkörper resultierend aus dem Wachskörper

Nachfolgende Abbildungen zeigen den Betonkörper in Untersicht, mit Blickrichtung auf die Öffnungen der Klettelemente, sowie einen Längsschnitt durch den Mittelpunkt der Hohlräume zur Beschreibung der geometrischen Zusammenhänge. Die Außenmaße des Körpers sind mit L und H definiert. Die Öffnungen zur Betonoberfläche (a) bilden im Verhältnis zum Durchmesser der Hohlräume (c) die in Richtung des Verbindungspartners abfallenden Hinterschneidungen. Der Abstand zwischen den Öffnungen (b) bestimmt unter Berücksichtigung des Kugeldurchmesser (c) und dem Achsmaß (j) die Dichte sowie der Anteil an Beton zwischen den Hohlräumen in Reihungsrichtung. Die Höhe der Hohlräume wird durch den Kugeldurchmesser (c) abzüglich der Abflachung zur Bildung der Öffnungen (x) bestimmt. Die einzelnen Parameter sind mit dem Verbindungspartner bezüglich der jeweiligen Anwendungssituation und hinsichtlich der Betonmenge wie auch des Aufbaus (Kornverteilung) abzustimmen und können in weiterführenden Untersuchungen entsprechend behandelt werden.

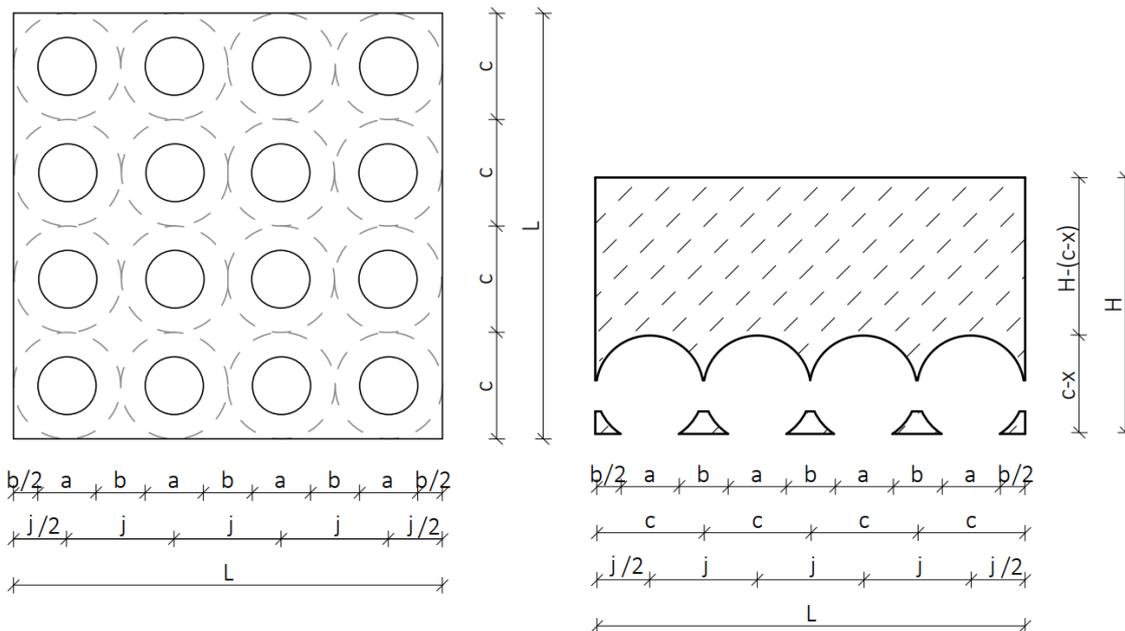


Abb. 120: Betonkörper in Untersicht (li) und Schnitt (re)

- L*: Länge Betonkörper
- a*: Durchmesser der Öffnung
- b*: Abstand zwischen den Öffnungen
- c*: Durchmesser der Hohlräume
- x*: Höhe der Abflachung der Wackskugeln
- j*: Achsmaß der Klettelemente

Nachfolgende Abbildungen zeigen den Betonkörper in verschiedenen Schnittebenen. Aufgrund der geometrischen Bedingungen der Kugelform sowie den materialspezifischen Eigenschaften von Beton wird angenommen, dass infolge der Anordnung der Wackskugeln ohne Abstand in Reihungsrichtung, zwischen den Hohlräumen Öffnungen entstehen (siehe nachfolgende Abbildung, re).

Der Schnitt in der Mitte (nachfolgende Abbildung, m) zeigt eine mögliche alternative Ausführungsform des Konzeptes mit einem Abstand der Wackskugeln in Reihungsrichtung. Es wird angenommen, dass diese Variante hinsichtlich der Verarbeitung von Frischbeton einfacher herzustellen ist und ein besseres Tragverhalten bieten kann, während bei gleicher Größe die Dichte an Klettelementen abnimmt. Diese Ausführungsvariante wurde im Rahmen der Herstellungsversuche zusätzlich getestet und findet sich ergänzend in nachfolgender Beschreibung des Tragverhaltens.

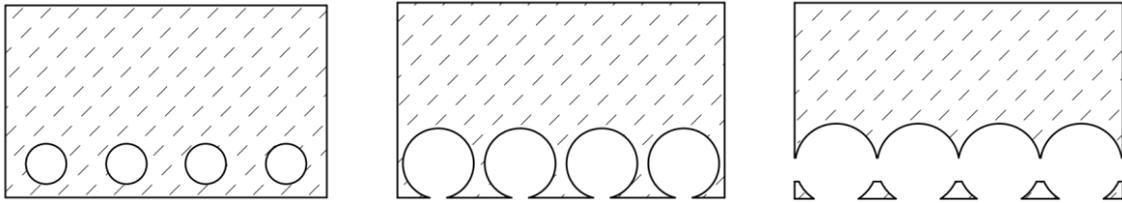


Abb. 121: Betonkörper in unterschiedlichen Schnittebenen

3.2.3.3 Tragverhalten

Die Beschreibung des Tragverhaltens der Lochstruktur wird anhand des Verbindungspartners Pilzkopfkomponente mit Verbindungspunkten, bestehend aus je einem Hohlraum und einem sich verhakenden Pilzkopfelement (siehe orange Strichlierung in nachfolgender Abbildung) beschrieben und beruht auf dem vorangehenden Kapitel *Analyse der Befestigungstechnik in Beton*.

Wird ein einzelnes Klettelement des Verbindungspartners zentrisch auf Zug belastet, wirkt auf den Beton im Lasteinleitungsbereich eine kreisförmige Kraft F . Die Kraft wird in Reihungsrichtung über zur Bauteiloberfläche parallele, sich verjüngende Träger und diagonal zwischen den Hohlräumen über vertikale Betonstäbe in den Betonkörper abgeleitet. Im Bereich der Lasteinwirkung entsteht eine Druckbelastung, die in einer Zugbeanspruchung in den Trägern wie auch in den Betonstäben sowie im Betonkörper resultiert. Mehrere aneinandergereihte Verbindungspunkte haben eine umlaufende, jeweils beidseitige Belastung zur Folge.

Die Hohlräume der alternativen Ausführungsform mit einem Abstand zwischen den Hohlräumen in Richtung der Kugelreihung sind vollständig umhüllt. Lasten werden demnach über umlaufende, vertikale Scheiben in den Betonkörper abgeleitet.

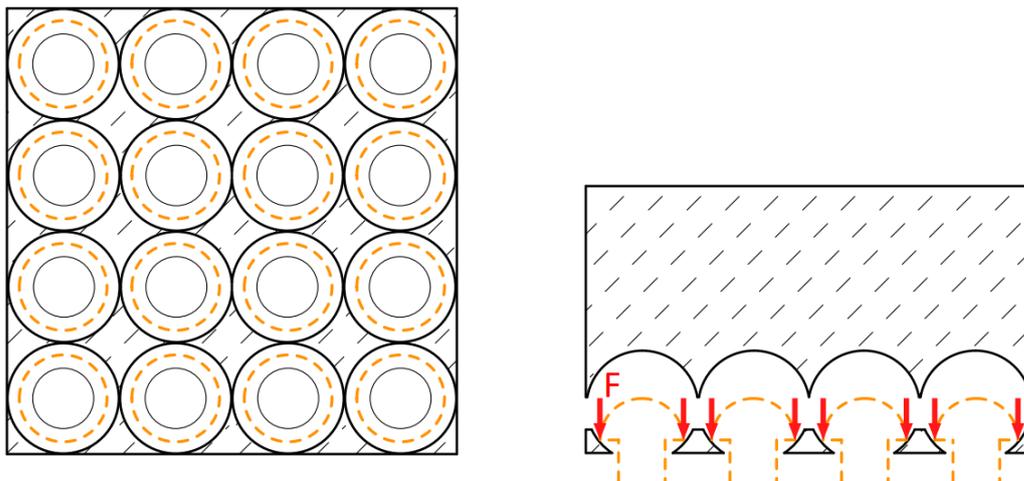


Abb. 122: Grundrisschnitt (li) und Längsschnitt (re) der Krafteinwirkung unter Zugbelastung resultierend aus dem Verbindungspartner Pilzkopf-Klettelemente

3.2.3.3.1 Zuglast

Wird der Verbindungspartner mit einem biegesteifem (lastverteilenden) Grund zentrisch auf Zug belastet, kann es, ausgehend von den Köpfen der Pilzkopfelemente, je Lochelement zu einem Betonversagen in Form von einem Betonausbruchkegel kommen (siehe nachfolgende Abbildung). Die Betonausbruchkörper beginnen am Lastangriffspunkt des jeweiligen Pilzkopfes und bilden sich kreisförmig fort. Wie bei den vorangehenden Konzepten beschrieben, ist für eine maximale Bruchlast ein Achsabstand der Klettelemente der 3-fachen Verankerungstiefe einzuhalten.

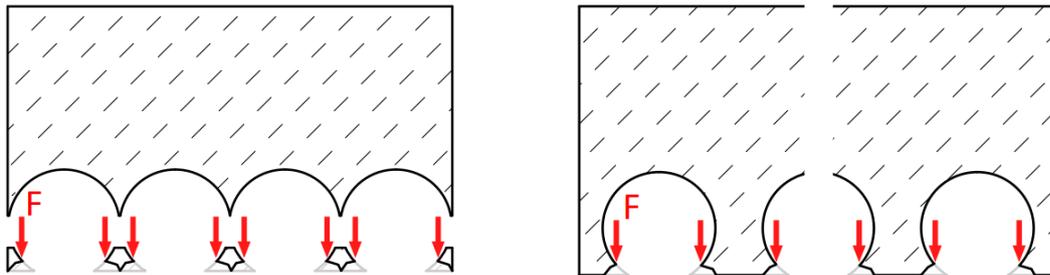


Abb. 123: Längsschnitt (li) und Diagonalschnitt (re) des Versagens unter Zuglast durch den Verbindungspartner Einhängekomponente und Betonbruch in Form eines Betonausbruchkegels

Zudem ist aufgrund geometrisch oder materialspezifisch bedingter Schwachstellen ein Versagen durch einen Bruch an der entsprechenden Position der Klettelemente möglich (siehe nachfolgende Abbildung). Einflussfaktoren auf das Versagen sind die Bauteilgeometrie, die Abmessungen der Klettelemente in Abhängigkeit zur Betonmischung, die Ausführungsqualität während der Herstellung und der Verbindungspartner.

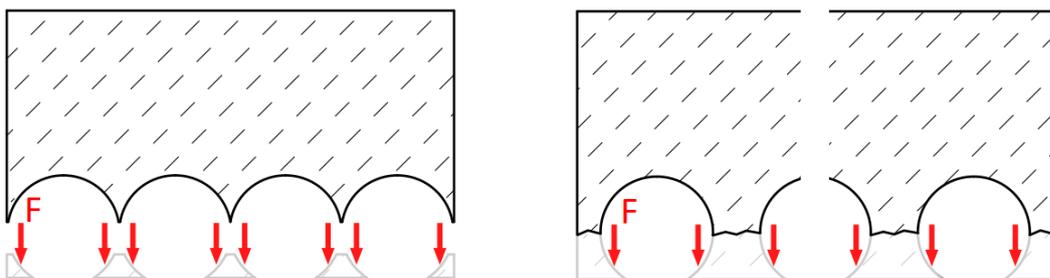


Abb. 124: Längsschnitt (li) und Diagonalschnitt (re) des Versagens unter Zuglast durch den Verbindungspartner Einhängekomponente und Betonbruch an einer geometrisch oder materialspezifisch bedingten Schwachstelle

3.2.3.3.2 Querlast

Unter Querlast wird angenommen, dass es aufgrund der materialspezifischen Eigenschaften des Verbindungspartners mit einem biegesteifen, lastverteilenden Grund zu nachfolgend dargestellten Belastungspunkten, -richtungen sowie Bruchbildern kommt. In Belastungsrichtung wie auch über die Bauteiloberfläche der Verbindungsfläche verlaufend wirkt eine Druckbeanspruchung, während auf der jeweiligen lastabgewandten Seite eine Zuglast entsteht. Auf die Betonstruktur zwischen den Verbindungspunkten wirken somit Lasten mit unterschiedlichen Angriffspunkten und -richtungen (siehe nachfolgende Abbildung). Daraus folgt eine Verringerung der Bruchlast gegenüber der Zuglast. Als Bruchbild wird ein vollständiger Betonbruch, resultierend aus einer Überschreitung der Zugtragfähigkeit der Struktur angenommen.

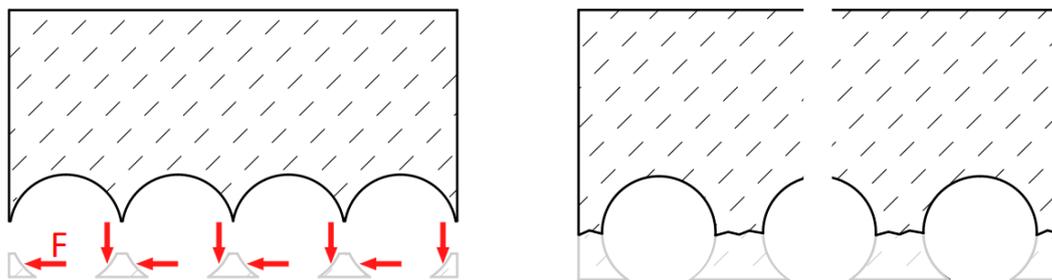


Abb. 125: Längsschnitt (li) und Diagonalschnitt (re) des Versagens unter Querlast durch den Verbindungspartner Einhängekomponente und Betonbruch an einer geometrisch oder materialspezifisch bedingten Schwachstelle

Bei der Ausführungsvariante des Konzeptes mit einem Abstand zwischen den Hohlräumen in Richtung der Kugelreihung wird bei einer Beanspruchung des Verbindungspartners durch Querlast angenommen, dass es, bei entsprechend großem Achsabstand, zu einem Versagen infolge einzelner Betonausbruchkegel auf der lastabgewandten Seite kommt.

3.2.3.4 Verbindungspartner

Herkömmliche Schlaufenkomponenten besitzen in der Regel Klettelemente mit entsprechender Flexibilität,²¹² während das Lösen einer Klettverbindung auf einer Verformung von Einhängerelementen beruht.²¹³

Für das Herstellen und Lösen einer Klettverbindung mit dem Konzept Lochstruktur muss zur Vermeidung von Beschädigungen der Betonstruktur, wie auch bei den vorangehenden Konzepten, ein von der herkömmlichen Methode abweichender Mechanismus angedacht werden. Wie das Kapitel *Stand der Technik* zeigt, erwähnen Patentschriften sowie aktuelle Forschungsprojekte mit dem Untersuchungsgegenstand aktivierbarer und deaktivierbarer Klettelemente, eine

²¹² Vgl. Krüger 2013, 9–10.

²¹³ Vgl. Williams/Davies/Frazer 2007, 219.

Funktionalität mit biegefesten Hohlräumen oder Schlaufenkomponenten und können, bei entsprechender Weiterentwicklung und Abstimmung, als Verbindungspartner geeignet sein.²¹⁴

Ob die Methodik der Steuerung der Klettelemente idealerweise mechanisch, chemisch, elektrochemisch oder elektrisch erfolgt, kann in weiterführenden Forschungen untersucht werden. Es ist zudem erneut anzunehmen, dass hinsichtlich einer dauerhaften Befestigung im Bauwesen die Verbindung auch bei inaktiven Klettelementen bestehen muss und die Steuerung der Elemente vor allem den Vorgang der Herstellung und des Lösens der Verbindung betrifft. Nachfolgende Abbildung resultiert aus der Betreuung einer Lehrveranstaltung mit der Thematik rückbaubarer Befestigungen und dient dahingehend als exemplarische Darstellung eines mechanisch aktivier- und deaktivierbaren, passiv wirksamen Verbundes.

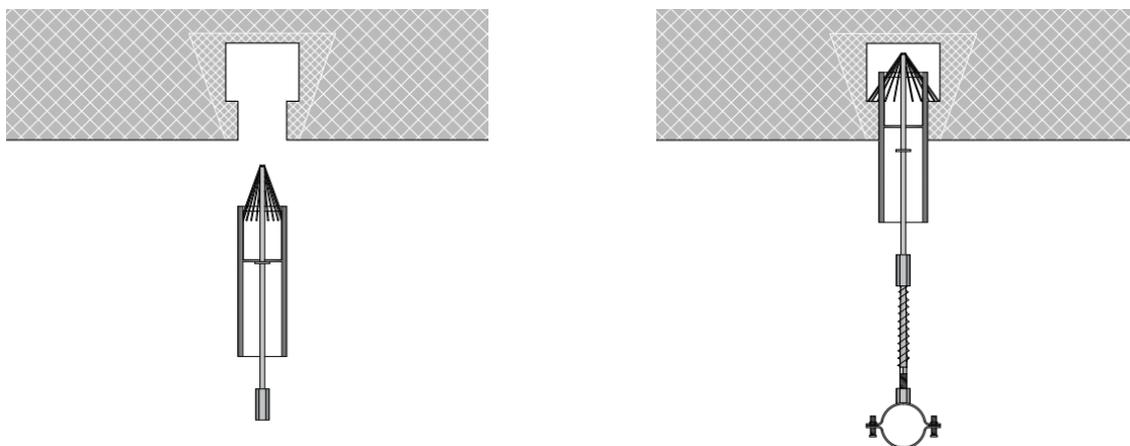


Abb. 126: Schnittdarstellung eines mechanisch deaktivierten (li) und aktivierten (re) Befestigungsmittels, Barrionuevo, Belén/Chacón, Celia/Maletin, Milan/Sandalj, Ivana, im Zuge der Lehrveranstaltung Workshop 3 am Institut für Architekturtechnologie, TU Graz, Betreuung und Leitung: Matthias Raudaschl

3.2.3.5 Versuchsergebnis

Das Konzept Lochstruktur wurde anhand von fünf Versuchen in unterschiedlichen Skalierungsgraden der Wachskörper und Dichtegraden der Klettelemente sowie vier Mal ohne und einmal mit Abstand der Wachskugeln in Reihungsrichtung überprüft. Die Dimensionierung der Klettelemente orientiert sich, dem Prinzip der Klettverbindung entsprechend, an möglichst feinteiligen Strukturen bei gleichzeitiger Annahme der Möglichkeit der Herstellung aus Beton. Auf die Kornverteilung im Klettelement wurde wie bei den vorangehenden Konzepten, aufgrund der im Vergleich mit den Festigkeiten herkömmlicher Klettverbindungen hohe Oberflächenzugfestigkeit von Beton, vorerst keine Rücksicht genommen.

Da es bei den Versuchen ohne Abstand zu einem negativen Ergebnis, dafür aber einer Ausbildung von pilzkopfähnlichen Strukturen kam, wurden diese hinsichtlich einer Feststellung der Klettfähigkeit mit der Versuchs-Schlaufenkomponente getestet. Eine Untersuchung des positiven Ergebnisses der Herstellung einer Schlaufenkomponente aus Beton, der alternativen Ausführung

²¹⁴ Vgl. Momoda u.a. 2002.

des Konzeptes, konnte im Rahmen dieser Arbeit aufgrund des hohen Aufwandes der Konstruktion eines Verbindungspartners mit entsprechend dimensionierten sowie aktivier- und deaktivierbaren Klettelementen nicht durchgeführt werden.

3.2.3.5.1 Wachskörper

Der Wachskörper besteht je Versuch aus einer Aneinanderreihung von Wachskugeln unterschiedlicher Radien auf einer Grundplatte mit den Abmessungen 5 x 5 cm. Die Wachskugeln wurden per Hand geformt, auf der Grundplatte positioniert und angepresst.

Die Wachskörper 1-4 überprüfen das Konzept in unterschiedlichen Skalierungsgraden. Versuch 5 bildet die alternative Ausführung des Konzeptes mit einem Abstand zwischen den Wachskugeln in Reihungsrichtung. Die Durchmesser der Wachskugeln (c) werden beginnend mit 6 mm schrittweise erhöht. Der variierende Skalierungsgrad der Klettelemente wie auch der Abstand zwischen den Elementen dient einer Feststellung der Herstellbarkeit aus Beton. Die resultierenden Abmessungen werden nachfolgend anhand der Versuchskörper angeführt.



Abb. 127: Wachskörper v. l. n. r. 1, 2, 3, 4, 5

3.2.3.5.2 Versuchskörper

Für die Herstellung der Versuchskörper wurden die Wachskörper in eine Schalung mit den Abmessungen 5 x 5 x 3 cm eingelegt und entsprechend der im Anhang in Kapitel *Herstellungsversuche* beschriebenen Versuchsdurchführung gefertigt. Wie nachfolgende Übersicht zeigt, führten die Versuche 1-4 zu einem negativen Ergebnis. Versuch 5 zeigt ein positives Ergebnis und bildet eine Lochstruktur mit Hinterschneidungen und dahinterliegenden Hohlräumen. In weiterer Folge werden die Versuchskörper sowie je nach Versuchsergebnis, eine Feststellung der Klettfähigkeit im Detail beschrieben.



Abb. 128: Versuchskörper nach Entformung der Wachskörper v. l. n. r. 1, 2, 3, 4, 5

Versuchskörper 1

Der Versuch bildet den kleinsten Skalierungsgrad der Wachskugeln und zeigt das negative Ergebnis einer Ausbildung von pilzkopffähnlichen Strukturen. Der Beton sammelt sich diagonal zwischen den Wachskugeln und formt sich vereinzelt bis zur Schalung fort. Bis auf eine Ausnahme kommt es zu keinen Verbindungen oder Übergängen zwischen diesen Betonstäben. Das Ergebnis wird auf den geringen Skalierungsgrad der Klettelemente in Abhängigkeit zu den materialspezifischen Eigenschaften des Frischbetons zurückgeführt.

Die geometrischen Abmessungen der unvollständigen Klettelemente (siehe nachfolgende Abbildung) stellen Durchschnittswerte dar und konnten wie folgt festgestellt werden (die Bezeichnungen in den Klammern entsprechen den geometrischen Zusammenhängen aus dem Kapitel *Betonkörper*): Durchmesser der Öffnung zur Betonoberfläche (a) 6 mm, Abstand zwischen den Öffnungen in Reihungsrichtung (b) 0 mm, Durchmesser der Hohlräume (c) und Achsmaß (j) 6 mm, Höhe der Hohlräume (c-x) 5 mm. Diagonal gemessen beträgt der Durchmesser der Öffnung zur Betonoberfläche 5 mm, der Abstand zwischen den Öffnungen 3,5 mm und der Abstand zwischen den Mittelpunkten der Hohlräume 8,5 mm.

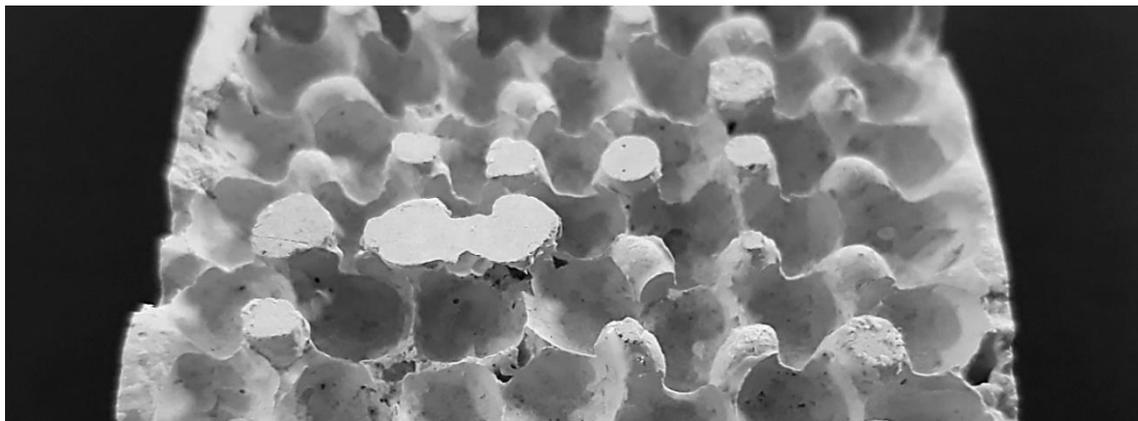


Abb. 129: Versuchskörper 1

Eine qualitative Feststellung der Klettfähigkeit erfolgte mit der Versuchs-Schlaufenkomponente und einer Bewertung des Ergebnisses durch eine Einteilung anhand der Klettfähigkeits-Bezeichnungen *negativ, gering, mittel* oder *hoch*.

Aufgrund des geringen Skalierungsgrades der Klettelemente wurde eine Schlaufenhöhe von 5 mm gewählt. Unter Zuglast, einer horizontalen Ausrichtung des Versuchskörpers, kam es infolge mehrfacher Verbindungsversuche zu keinem Verbund und einer negativen Klettfähigkeit, was auf die kaum vorhandenen Hinterschneidungen zurückgeführt wird. Unter Querlast, einer vertikalen Ausrichtung der Betonstruktur, konnte durch mehrfaches Anpressen und Lösen der Schlaufenkomponente eine geringe Klettfähigkeit festgestellt werden.

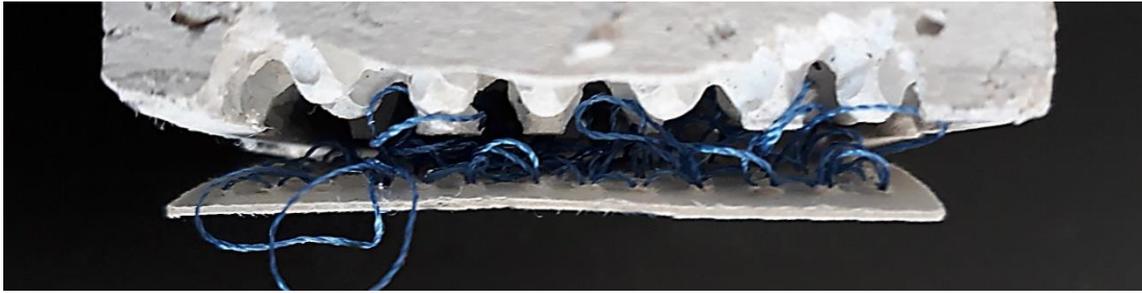


Abb. 130: Versuchskörper 1 unter Querlast resultierend aus der Versuchs-Schlaufenkomponente mit einer Schlaufenhöhe von 5 mm

Versuchskörper 2

Der Versuch bildet den nächstgrößeren Skalierungsgrad des Konzeptes ohne Abstand zwischen den Wachskugeln in Reihungsrichtung. Unterschiede zu Versuchskörper 1 bestehen in einer regelmäßigeren Struktur sowie einer vollständigen Fortbildung der Betonstäbe bis zur Schalung, was sich anhand der abgeflachten Stabenden zeigt. Zudem entstehen sechs Übergänge zwischen Betonstäben im Randbereich der Struktur wie auch ein einzelnes Loch-Klettelement (vollständige Umhüllung der Wachskugel). Es wird angenommen, dass dieses, im Vergleich mit Versuchskörper 1 bessere Ergebnis, auf einen Überschuss an Wasser oder an Luftporen während der Herstellung des Versuchskörpers und eine daraus resultierende höhere Fließfähigkeit zurückgeführt werden kann. Diese Annahme folgt aus den in nachfolgender Abbildung sichtbaren, ausgehärteten Luftporen im Bereich der Hohlräume.

Die geometrischen Abmessungen der unvollständigen Klettelemente (siehe nachfolgende Abbildung) stellen Durchschnittswerte dar und konnten wie folgt festgestellt werden: Durchmesser der Öffnung zur Betonoberfläche (a) 8 mm, Abstand zwischen den Öffnungen in Reihungsrichtung (b) 0 mm, Durchmesser der Hohlräume (c) und Achsmaß (j) 8 mm, Höhe der Hohlräume (c-x) 7 mm. Diagonal gemessen beträgt der Durchmesser der Öffnung zur Betonoberfläche 6-7 mm sowie der Abstand zwischen den Öffnungen 4-5 mm und das Achsmaß 11 mm. Der Durchmesser der Betonstäbe beträgt ungefähr 3,5 mm.

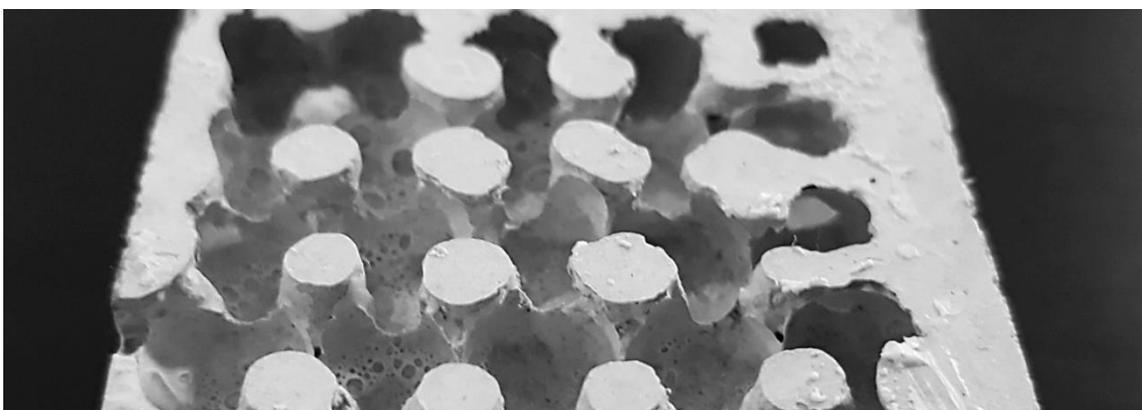


Abb. 131: Versuchskörper 2

Anhand von Tastversuchen mittels Versuchs-Schlaufenkomponente (Schlaufenhöhe 5 mm) konnte für die Klettfähigkeit dasselbe Ergebnis wie bei Versuchskörper 1 festgestellt werden, eine negative Klettfähigkeit unter Zuglast und eine geringe Klettfähigkeit unter Querlast. Infolge regelmäßigerer Hinterschneidungen kommt es unter Querlast, wie in nachfolgender Abbildung ersichtlich, zu einigen langgezogenen und somit kurzfristig verbundenen Schlaufen, jedoch nur vereinzelt zu einem aktiven Verbindungspunkt.

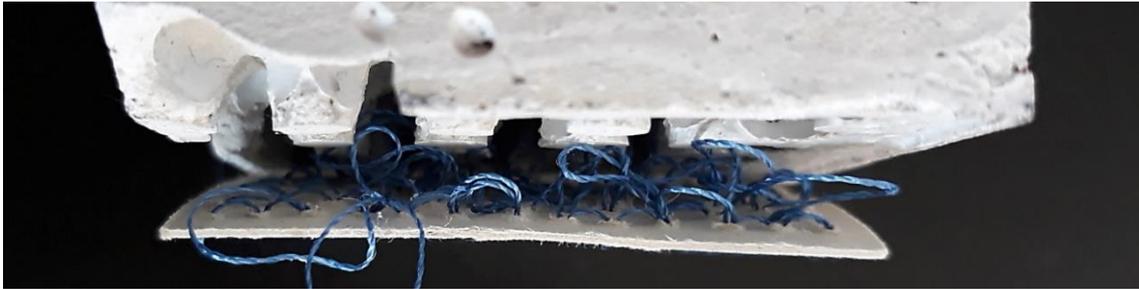


Abb. 132: Versuchskörper 2 unter Querlast resultierend aus der Versuchs-Schlaufenkomponente mit einer Schlaufenhöhe von 5 mm

Versuchskörper 3

Der Versuch bildet den nächstgrößeren Skalierungsgrad der Herstellungsversuche des Konzeptes Lochstruktur ohne Abstand der Wachskugeln in Reihungsrichtung. Das negative Ergebnis zeigt eine Ausbildung pilzkopfähnlicher Strukturen mit, im Unterschied zu Versuchskörper 2, einer unregelmäßigeren Struktur ohne die Ausbildung von Übergängen. Die Klettelemente entsprechen in etwa Versuchskörper 1.

Die geometrischen Abmessungen der unvollständigen Klettelemente (siehe nachfolgende Abbildung) stellen Durchschnittswerte dar und konnten wie folgt festgestellt werden: Durchmesser der Öffnung zur Betonoberfläche (a) 10 mm, Abstand zwischen den Öffnungen (b) 0 mm, Durchmesser der Hohlräume (c) und Achsmaß (j) 10 mm, Höhe der Hohlräume (c-x) 9 mm. Diagonal gemessen beträgt der Durchmesser der Öffnung zur Betonoberfläche 9 mm sowie der Abstand zwischen den Öffnungen 5 mm und das Achsmaß 14,5 mm. Die Betonstäbe besitzen einen Durchmesser von ca. 4 mm.

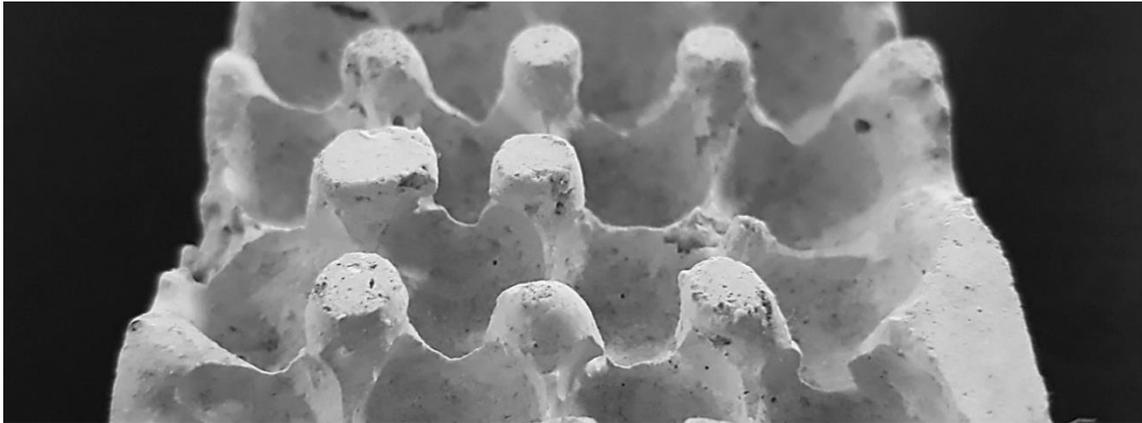


Abb. 133: Versuchskörper 3

Eine Feststellung der Klettfähigkeit erfolgte anhand von Tastversuchen mit der Versuchsschlaufenkomponente. Aufgrund des größeren Skalierungsgrades der Klettelemente wurde eine Schlaufenhöhe von 10 mm gewählt. Den vorangehenden Versuchskörpern entsprechend, konnte kein Verbund und somit eine negative Klettfähigkeit unter Zuglast sowie eine geringe Klettfähigkeit unter Querlast festgestellt werden.

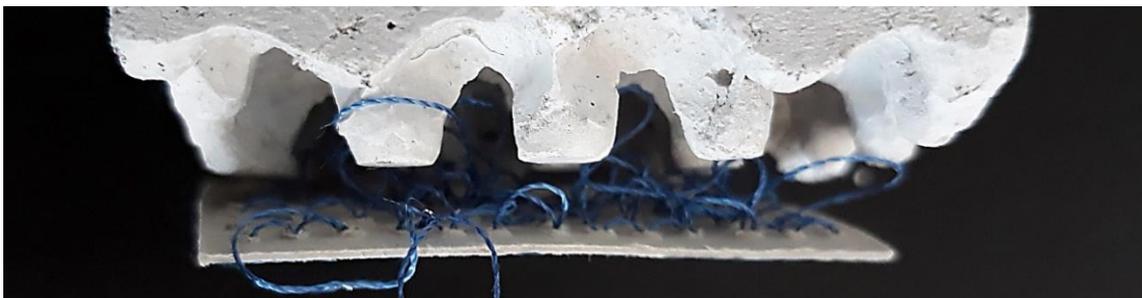


Abb. 134: Versuchskörper 3 unter Querlast resultierend aus der Versuchsschlaufenkomponente mit einer Schlaufenhöhe von 10 mm

Versuchskörper 4

Der Versuch bildet den größten Skalierungsgrad der Herstellungsversuche des Konzeptes Lochstruktur mit aneinandergereihten Wachskugeln. Das Ergebnis des Versuchs entspricht im Wesentlichen Versuchskörper 3. Trotz der größeren, diagonalen Zwischenräume erfolgt keine vollständige Umhüllung des Wachskörpers und es kommt nicht zu dem gewünschten Ergebnis einer Reihung einzelner Öffnungen mit dahinterliegenden Hohlräumen. Zudem zeigen sich erneut unregelmäßige und unvollständige Klettelemente ohne Übergänge oder Verbindungen zwischen diesen Strukturen.

Die geometrischen Abmessungen der unvollständigen Klettelemente (siehe nachfolgende Abbildung) stellen Durchschnittswerte dar und konnten wie folgt festgestellt werden: Durchmesser der Öffnung zur Betonoberfläche (a) 12 mm, Abstand zwischen den Öffnungen (b) 0 mm, Durchmesser der Hohlräume (c) und Achsmaß (j) 12 mm, Höhe der Hohlräume (c-x) 11 mm. Diagonal gemessen beträgt der Durchmesser der Öffnung zur Betonoberfläche 11 mm sowie der

Abstand zwischen den Öffnungen 4-5 mm und das Achsmaß 17 mm. Die Betonstäbe haben ungefähr einen Durchmesser von 4,5 mm. Die Untersuchung der Klettfähigkeit entspricht dem Ergebnis von Versuchskörper 3 und wird nicht näher ausgeführt.

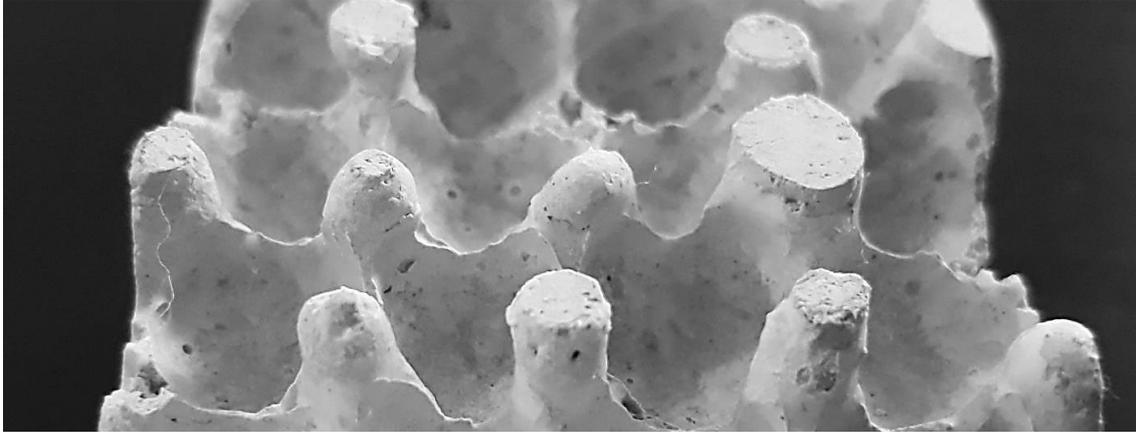


Abb. 135: Versuchskörper 4

Versuchskörper 5

Der Versuch bildet die alternative Ausführung des Konzeptes Lochstruktur und zeigt infolge eines Abstandes zwischen den Wackkugeln in Reihungsrichtung das gewünschte Ergebnis einer Reihung einzelner Öffnungen mit dahinterliegenden Hohlräumen und Hinterschneidungen zur Aufnahme komplementärer Einhängeelemente. Vereinzelt kommt es zu Ausbrüchen an der Oberfläche, siehe nachfolgende Abbildung im Bereich der hinteren Klettelemente. Da im Rahmen der Entformung auf eine langsame Erhitzung des Wachses und einen ausreichenden Abtrag des geschmolzenen Wachses geachtet wurde wird angenommen, dass die Beschädigung an der Bauteiloberfläche auf eine mechanische Einwirkung zurückzuführen ist.

Die geometrischen Abmessungen der vollständigen Klettelemente (siehe nachfolgende Abbildung) stellen Durchschnittswerte dar und konnten wie folgt festgestellt werden: Durchmesser der Öffnung zur Betonoberfläche (a) 10 mm, Abstand zwischen den Öffnungen (b) ca. 11 mm, Durchmesser der Hohlräume (c) 13 mm, Höhe der Hohlräume (c-x) 12 mm und Achsmaß (j) 21 mm. Die Betonmasse zwischen den Hohlräumen besitzt eine Stärke von ca. 8 mm. Diagonal gemessen, beträgt der Durchmesser der Öffnung zur Betonoberfläche (a) 10 mm sowie der Abstand zwischen den Öffnungen 16 mm und das Achsmaß 28 mm.

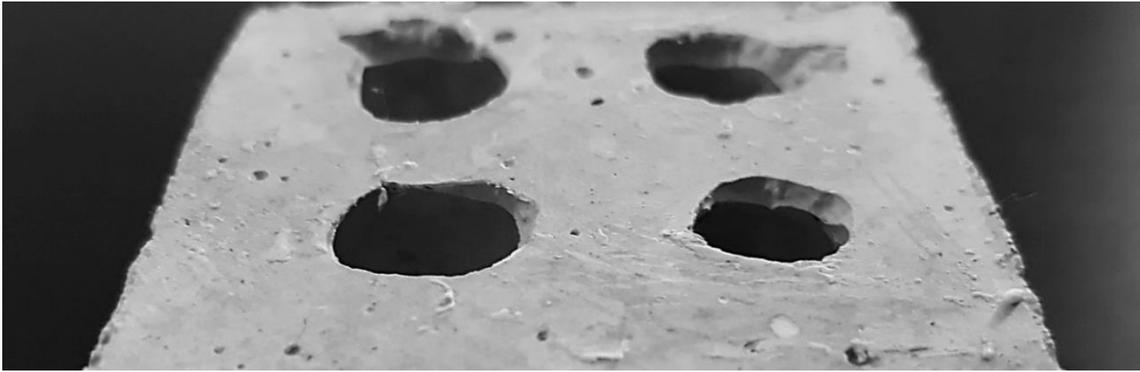


Abb. 136: Versuchskörper 5

Eine Feststellung der Klettfähigkeit anhand von Tastversuchen wurde aufgrund des Aufwandes der Konstruktion eines entsprechend dimensionierten Verbindungspartners mit aktivier- und deaktivierbaren Klettelementen nicht durchgeführt. Aufgrund der im Kapitel *Verbindungspartner* angeführten Erkenntnisse wird jedoch angenommen, dass bei einer entsprechenden Abstimmung des Verbindungspartners, eine hohe Klettfähigkeit gegeben ist.

Die Untersuchung der Herstellung von Schlaufenkomponenten aus Beton abschließend kann festgestellt werden, dass ein positives Ergebnis nur bei einem Wachskörper mit Abstand zwischen den Wachskugeln hergestellt werden konnte. Aufgrund des Ergebnisses von Versuchskörper 2 wird angenommen, dass infolge einer Optimierung des Herstellungsprozesses, wie auch der Betonmischung und des Wachskörpers, das Potential zu Herstellung vollständiger Klettelemente auch ohne Abstand zwischen den Wachskugeln besteht.

4 Zusammenfassung und Ausblick

4.1 Zusammenfassung

Die Anwendung der Klettverbindung an der Schnittstelle Primärstruktur (Rohbau) zu Sekundärstruktur (Ausbau) und Tertiärstruktur (technische Gebäudeausrüstung) ermöglicht, entsprechend ihres Funktionsprinzips, einen einfach zu trennenden und wiederherzustellenden Verbund kurzlebiger und langlebiger Bauteile und damit eine hohe Instandhaltungsfreundlichkeit wie auch Anpassungsfähigkeit an neue Nutzungen und Anforderungen. Daraus erschließt sich ein großes Potential zur Steigerung der Lebensdauer von Gebäuden und einzelner Gebäudekomponenten²¹⁵. Zudem bietet die Klettverbindung beispielsweise die Vorteile einer an derselben Position wiederholbaren,²¹⁶ staubfreien,²¹⁷ einfachen, schnellen und flexiblen Montage unterschiedlicher Bauteilkomponenten aus unterschiedlichen Materialien,²¹⁸ ohne der Notwendigkeit von Stemm-, Schlitz-, oder Bohrarbeiten²¹⁹, eine sofort erfolgende Verbindung²²⁰ ohne Aushärtungszeit und ermöglicht eine einfache und schnelle Demontage einzelner Gebäudekomponenten wie auch eine Rückführung in den Materialkreislauf.²²¹

Dieses Potential erschließt sich mit der Gewährleistung der Funktionalität der Klettkomponente über die gesamte Lebensdauer des jeweiligen Rohbauteiles. Wird ein kurzlebige Bauteil, wie beispielsweise eine nicht tragende Innenwand ausgetauscht, muss dieser Vorgang ohne den zusätzlichen Austausch der rohbauseitig bestehenden Klettkomponente möglich sein.

Untersuchungsgegenstand themenbezogener Forschungen, Patente oder auch Produkte im Bereich des Bauwesens sind vor allem industriell hergestellte Klettverbindungen aus Kunststoffmaterialien, deren Lebensdauer bei einer Anwendung im Bauwesen verglichen mit Rohbauteilen, entsprechend geringer zu beziffern ist²²².

Zur Lösung dieser Problematik und als Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit wird ein Materialwechsel zu Beton sowie eine daraus resultierende Herstellungsmethode von Klettkomponenten vorgeschlagen. Unter dem Aspekt der vielfältigen Formbarkeit dieses Baustoffs besteht das Forschungsziel dieser anwendungsorientierten Grundlagenforschung in der Untersuchung und Herstellung einer monolithischen und somit biegesteifen Beton-Klettkomponente, oder auch „Klettbeton“, infolge einer Formgebung durch die Wachsschalungstechnologie und anhand des Vorbildes industrieller Klettprodukte.

Die Untersuchung umschließt eine Feststellung des Standes der Technik, eine Aufbereitung entsprechender Grundlagen (Analyse der Klettverbindung, der Befestigungstechnik in Beton sowie der Wachsschalungstechnologie) und die Entwicklung von Herstellungskonzepten

²¹⁵ Vgl. Bahr/Lennerts 2010, 27–40.

²¹⁶ Vgl. Krüger 2013, 4.

²¹⁷ Vgl. Riewe u.a. 2019, 16.

²¹⁸ Vgl. Krüger 2013, 4.

²¹⁹ Vgl. Riewe u.a. 2019, 9.

²²⁰ Vgl. Krüger 2013, 4.

²²¹ Vgl. Riewe u.a. 2019, 9.

²²² Vgl. Bahr/Lennerts 2010, 51.

klettfähiger Betonstrukturen als auch deren Verifizierung oder Falsifizierung infolge einer Machbarkeitsstudie anhand von Herstellungs- und Klettversuchen.

Das Ergebnis dieser Arbeit besteht in der Beschreibung geometrischer als auch materialspezifischer Bedingungen zur Nachbildung industrieller Klettelemente in Beton, drei Konzepten zur grundlegenden Herstellung von Klettbeton anhand der Wachsschalungstechnologie, der Überprüfung dieser Konzepte und in exemplarischen Ansätzen zum jeweiligen komplementären Verbindungspartner.

Die wesentlichen Erkenntnisse dieser Untersuchung sind nachfolgend dargestellt.

4.1.1 Grundlagen

Das Funktionsprinzip der Klettverbindung beruht auf der hohen Anzahl komplementärer Verbindungselemente und einer daraus folgenden hohen Anzahl an möglichen Verbindungspunkten.²²³ Das Tragverhalten wird durch geometrische Bedingungen, materialspezifische Eigenschaften,²²⁴ die Lastart sowie die Lastrichtung bestimmt.²²⁵

Der Lösemechanismus einer industriellen Klettverbindung beruht auf der Flexibilität und Verformung der Einhängeelemente,²²⁶ woraus zudem eine höhere Klettfähigkeit resultieren kann.²²⁷

Zur Vermeidung von Beschädigungen wie auch zur Steigerung der Klettfähigkeit sind Verbindungspartner von Klettbeton-Komponenten mit entsprechend aktivierbaren und deaktivierbaren Klettelementen oder auch spezielle Trennwerkzeuge oder Trennmethode anzuwenden. Ob die Steuerung dieser Klettelemente idealerweise mechanisch, chemisch, elektrochemisch oder elektrisch erfolgt muss in weiterführenden Forschungen untersucht werden. Des Weiteren ist anzunehmen, dass hinsichtlich einer dauerhaften Befestigung im Bauwesen die Verbindung auch bei inaktiven Klettelementen bestehen muss und die Steuerung der Elemente vor allem den Vorgang der Herstellung und des Lösens der Verbindung betrifft.

Wie eine geometrische Untersuchung industrieller Einhängeelemente zeigt, besitzen diese vereinzelt zum Komponentengrund parallele (T-förmiges Hakenelement wie beispielsweise das Produkt *Klettoplast*[®] von *Gottlieb Binder GmbH & Co KG*) oder, bei einer Ausbildung von Widerhaken, auch in Richtung der Verbindungspartner geneigte Hinterschneidungen (Y-förmiges Hakenelement und *Metaklett-Entenkopf*). Es wird angenommen, dass bei der Nachbildung in Beton, hinsichtlich der Verarbeitungseigenschaften dieses Baustoffes, diese Geometrien eher herzustellen sind.

Bei der Nachbildung industrieller Schlaufenelemente in Beton wird dem Vorbild *Metaklett – Lochblech* entsprechend, eine Ausbildung als Lochstruktur mit Hohlräumen oder Hinterschneidungen vorgeschlagen.

²²³ Vgl. Krüger 2013, 9–10.

²²⁴ Vgl. Ebda., 95.

²²⁵ Vgl. Ebda., 75.

²²⁶ Vgl. Williams/Davies/Frazer 2007, 219.

²²⁷ Vgl. Gorb/Popov/Gorb 2002, 157

Da Grundlagen des Tragverhaltens von Befestigungen in Beton anhand stark variierender Verankerungstiefen geschaffen wurden wird angenommen, dass das grundsätzliche Tragverhalten auf geringe Verankerungstiefen übertragbar ist.

Wird der Verbindungspartner einer Klettkomponente aus Beton beansprucht, kann es unter Zuglast zu einem Versagen durch die Ausbildung eines Betonausbruchkegels oder an einer materialspezifisch oder geometrisch bedingten Schwachstelle kommen. Unter Querlast wird beim Verbindungspartner Schlaufenkomponente eine Schrägzugbelastung, beim Verbindungspartner Einhängekomponente eine Druckbelastung in Lastrichtung sowie an der Oberfläche der Beton-Klettelemente und eine Zugbelastung auf der lastabgewandten Seite angenommen. Das Versagen des Betons erfolgt durch Ausbildung eines Bruchkegels oder einen Bruch an einer materialspezifisch oder geometrisch bedingten Schwachstelle. Grundsätzlich wird unter Querlast eine geringere Bruchlast angenommen.

Die Oberflächenzugfestigkeit von Beton wird durch die Kornverteilung in der Randzone, die Betonzusammensetzung und die Ausführungsqualität beeinflusst.²²⁸ Sie beträgt bei Beton der Festigkeitsklasse C25/30 ca. $1,0 \text{ N/mm}^2$,²²⁹ was in etwa der dreifachen Zugfestigkeit der Klettkomponentenkombination *Duotec® 50* mit *Duotec® 50* von *Gottlieb Binder GmbH & Co KG* mit $0,35 \text{ N/mm}^2$ ²³⁰ entspricht. Im Vergleich mit der Zugfestigkeit des Klettsystems welches bei der Entwicklung der Klettfassade *StoSystain R* zum Einsatz kam (ca. 16 N/cm^2),²³¹ zeigt Beton eine ca. 6-fache Zugfestigkeit.

Für das Forschungsziel dieser Arbeit, die Herstellung von Klettbeton in Form einer monolithischen, materialreinen, biegesteifen und klettfähigen Betonstruktur, kann die prinzipielle Anwendbarkeit der Wachsschalungstechnologie, bei entsprechender Entformungsmethodik wie beispielsweise durch heißes Wasser, festgestellt werden.

4.1.2 Herstellungskonzepte

4.1.2.1 Hakenstruktur

Das Konzept Hakenstruktur entspricht der Herstellung einer Einhängekomponente aus Beton durch die Nachbildung eines industriellen, T-förmigen Hakenklettelements. Die Herstellungsversuche in unterschiedlichen Skalierungsgraden führten grundsätzlich zum gewünschten Ergebnis einer Reihung einzelner Klettelemente in Hakenform, teilweise jedoch zu unvollständigen und fragmentierten Klettelementen infolge einer zu geringen Fließfähigkeit des Betons, in Abhängigkeit zur Dimensionierung der Wachskörper.

Mit einer Versuchs-Schlaufenkomponente konnte bei dem Versuchskörper mit dem kleinsten Skalierungsgrad der Klettelemente, einer Länge der Haken (a) von 4 mm, einer Länge des Hakenschaftes (c) von 2 mm und einer Breite der Haken (e) von 3 mm sowie einem Achsmaß in Hakenausrichtung (j) von 6 mm und einem seitlichen Achsmaß (k) von 5 mm eine hohe Klettfähigkeit unter Zug- sowie unter Querlast festgestellt werden. Dieses Ergebnis stellt das

²²⁸ Vgl. Raupach/Orlowsky 2008, 21.

²²⁹ Vgl. Mann 2011, 18.

²³⁰ Vgl. Gottlieb Binder GmbH & Co KG 2018a.

²³¹ Vgl. Riewe/Oswald 2014, 121.

positivste Resultat dar und wird auf die hohe Dichte der Klettelemente bei geringem Abstand zwischen den Hakenköpfen sowie die spitz zulaufenden Hinterschneidungen und einen daraus folgenden, erfolgreichen Eingriff der Schlaufenelemente zurückgeführt. Trotz geometrisch vielversprechenderen Ergebnissen hinsichtlich der vollständigen Ausbildung von Klettelementen wie auch der Hinterschneidungen, führten Versuchskörper mit einem größeren Skalierungsgrad, infolge geringerer Dichte der Beton-Klettelemente wie auch der Anwendung der größeren Schlaufenelemente des Verbindungspartners (mit einer daraus folgenden reduzierten Biegefestigkeit), zu einer geringeren Klettfähigkeit mit der Versuchs-Schlaufenkomponente.

4.1.2.2 Pilzkopfstruktur

Das Konzept Pilzkopfstruktur entspricht der Herstellung einer biegesteifen Einhängekomponente aus Beton durch die Nachbildung herkömmlicher, industrieller Pilzkopf-Klettelemente. Der Herstellungsversuch mit dem größten Skalierungsgrad der Klettelemente, einem Durchmesser der Pilzköpfe (a) von 8 mm sowie einem Durchmesser des Pilzkopfschaftes (c) von 6 mm und einem Achsmaß (j) von 15 mm führte zu einer annähernd vollständigen Ausbildung der Klettelemente mit zur Bauteiloberfläche parallelen Hinterschneidungen. Kleinere Skalierungsgrade bilden unvollständige Klettelemente infolge einer zu geringen Fließfähigkeit des Betons in Abhängigkeit zur Dimensionierung der Wachskörper.

Mit einer Versuchs-Schlaufenkomponente konnte bei allen Versuchskörpern eine geringe Klettfähigkeit unter Zuglast sowie eine im Verhältnis hohe Klettfähigkeit unter Querlast festgestellt werden. Die verglichen mit der Hakenstruktur geringere Klettfähigkeit wird auf die reduzierte Dichte der Klettelemente infolge des größeren Abstandes zwischen den Pilzköpfen, aber auch auf die runde Form der Hinterschneidungen mit einem daraus folgenden, erschwerten Verhaken der Schlaufen zurückgeführt.

Die Untersuchung der Herstellung von Einhängekomponenten aus Beton zusammengefasst, konnten anhand der Wachsschalungstechnologie und des Vorbildes industrieller Klettelemente, je nach Lastrichtung, biegesteife Beton-Versuchskörper mit geringer oder hoher Klettfähigkeit hergestellt werden. Diese Klettfähigkeit konnte mit einem nicht steuerbaren (aktivier- und deaktivierbaren) Verbindungspartner in Form einer Versuchs-Schlaufenkomponente festgestellt werden.

Die wesentlichen Faktoren für eine Klettfähigkeit mit der Versuchs-Schlaufenkomponente bestehen in einer hohen Dichte an Klettelementen (infolge eines, mit industriellen Vorbildern vergleichend, geringen Abstandes zwischen diesen Elementen), wie auch in verbindungsfähigen (scharfkantigen und zur Bauteiloberfläche parallelen) Hinterschneidungen. Grundsätzlich wurde bei Einhängekomponenten unter Zuglast eine eher geringe Klettfähigkeit und unter Querlast eine eher hohe Klettfähigkeit festgestellt.

4.1.2.3 Lochstruktur

Das Konzept Lochstruktur entspricht der Herstellung einer biegesteifen Schlaufenkomponente aus Beton. Eine Reihung einzelner Öffnungen mit dahinterliegenden Hohlräumen zur Aufnahme komplementärer Einhängeelemente konnte nur bei einem von fünf Versuchen hergestellt werden. Dieser Versuch stellt eine Variation des Konzeptes mit einem Abstand zwischen den Hohlräumen von 8 mm bei einem Durchmesser (c) von 13 mm dar. Das positive Ergebnis wird auf die Fließfähigkeit des Betons in Abhängigkeit zur Dimensionierung und Positionierung der Wachskörper zurückgeführt.

Eine Untersuchung der Klettfähigkeit anhand von Tastversuchen konnte aufgrund des Aufwandes der Konstruktion eines Verbindungspartners mit entsprechend dimensionierten sowie aktivier- und deaktivierbaren Klettelementen nicht durchgeführt werden. Es wird jedoch angenommen, dass bei entsprechender Abstimmung der Verbindungspartner eine Klettfähigkeit gegeben ist.

Die Untersuchung der Herstellung von Schlaufenkomponenten aus Beton zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die grundsätzliche Möglichkeit der Herstellung von klettfähigen Schlaufenkomponenten anhand der alternativen Ausführungsform des Konzeptes Lochstruktur besteht.

4.2 Ausblick

Langfristig kann die Anwendung von Klettbeton als primäres Montagemittel im Hochbau, bei einem entsprechenden Nachweis der Gebrauchstauglichkeit, Dauerhaftigkeit und Tragfähigkeit, in Gebäuden und Gebäudeteilen mit einem hohen Installationsgrad angedacht werden. Das sind beispielsweise Krankenhäuser, Gebäude des Handels, Produktionsstätten, Handwerks-, Industrie- und Bürobauten wie auch in weiterer Folge Gaststätten und Wohnbauten, vor allem im Bereich von Gängen und in Installationsschächten.

Um die vorliegende Arbeit dahingehend weiterzuführen, sind umfassende Entwicklungs- und Optimierungsschritte zu setzen. Das umschließt den Herstellungsprozess, die angewandten Materialien sowie den Verbindungspartner und bedeutet umfassende Testreihen im Hinblick auf die bereits erwähnte Gebrauchstauglichkeit, Dauerhaftigkeit und Tragfähigkeit.

4.2.1 Herstellungsprozess

Kurzfristig gilt es den Herstellungsprozess von Klettbeton zu optimieren. Das umschließt die Schalform, das Einbringen des Betons, das Verdichten, das Nachbehandeln und das abschließende Entformen. Die Form der Wachsschalung bestimmt die Klettstruktur und muss anhand von Versuchsreihen hinsichtlich einer entsprechenden Tragfähigkeit, infolge der Anzahl an Klettelementen im Verhältnis zur Gesteinskörnung (Betonaufbau) und im Besonderen mit dem Verbindungspartner abgestimmt werden. Die Formgebung der Wachskörper kann, wie im Kapitel *Wachsschalungstechnologie* dargestellt, beispielsweise mittels CNC-gesteuerter Fräswerkzeuge oder auch durch Stanzwerkzeuge (Hakenelemente) erfolgen. Zudem sind für die Herstellung der Wachskörper für Schlaufenkomponenten Formgebungsmethoden wie beispielsweise das Gießen oder das Rotationsformen von Interesse.

Hinsichtlich der Geometrie der Klettelemente stellt eine Kombination der Konzepte Hakenstruktur und Pilzkopfstruktur mit quadratischen „Pilzkopfelementen“, hinsichtlich einer hohen Klettfähigkeit wie auch der Aufnahme unterschiedlich gerichteter Lasten, einen vielversprechenden Untersuchungsgegenstand dar.

Langfristig kann Klettbeton als vorgefertigtes Bauteil für eine Anwendung als Fertigteil oder als verlorene Schalung entwickelt werden. Die für die Herstellung wesentlichen Vorteile in einer Fertigungshalle bestehen in kontrollierbaren Umgebungsbedingungen, einer witterungsunabhängigen Produktion und einer hohen Maßgenauigkeit. Es wird angenommen, dass die Herstellung und Entformung der Wachsschalung in einer entsprechenden Qualität nur im Rahmen einer Vorfertigung durchgeführt werden kann. Weiterführend kann eine Automatisierung des Herstellungsprozesses die direkte Wiederverwendung des geschmolzenen und entformten Wachses als Schalmaterial ermöglichen.

Werden Klettbeton-Bauteile vorgefertigt, müssen die klettfähigen Strukturen beim Transport zur Baustelle geschützt werden. Dabei bietet eine Klettbeton-Schlaufenkomponente den Vorteil einer ebenen Bauteiloberfläche mit einem geringeren Risiko der Beschädigung. Bei der Fertigung von Klettbeton-Einhängekomponenten wird angenommen, dass an der Bauteiloberfläche Bereiche von Klettelementen auszusparen sind und diese Flächen als Auflager wie auch zur Manipulation des Bauteiles dienen.

Weiterführend können Herstellungsmethoden wie beispielsweise 3D-Betondruck, das Einlegen einzelner Klettelemente in eine Schalung oder auch die Bearbeitung von Bestandsbauten, beispielsweise durch Bohren oder Fräsen der Bestandsstruktur untersucht werden. Ein zusätzlich zu vorliegender Untersuchung durchgeführter Erstversuch der Herstellung von Öffnungen mit dahinterliegenden Hohlräumen (Schlaufen) in Betonflächen anhand von 3D-Betondruck ist nachfolgend abgebildet.



Abb. 137: Herstellung einer Lochstruktur durch 3D-Betondruck

4.2.2 Materialien

Kurzfristig wie auch langfristig ist eine Optimierung der Betonzusammensetzung im Hinblick auf das Herstellungsverfahren, die herzustellende Betonstruktur wie auch auf die Anwendungssituation durchzuführen. Die Beimengung spezieller Zusatzstoffe, -mittel oder Verbundmaterialien zur Betonmischung ermöglicht eine Optimierung der Verarbeitungseigenschaften sowie der späteren Gebrauchstauglichkeit, Dauerhaftigkeit und Tragfähigkeit.

4.2.3 Verbindungspartner

Der jeweilige Verbindungspartner (Schlaufen- oder Einhängekomponente) wie auch die entsprechende Klettbeton-Komponente sind kurz- und langfristig aufeinander abzustimmen, Entwicklungs- und Optimierungsschritte somit parallel zu setzen.

Grundsätzlich können den im Kapitel *Stand der Technik* angeführten Patenten und Forschungsergebnissen entsprechend, herkömmliche Klettelemente oder Klett Komponenten in Haken-, Pilzkopf- oder Schlaufenform mit einer Steuerung (Aktivierung und Deaktivierung) der Verbindungselemente als Verbindungspartner angedacht und entwickelt, oder auch spezielle Trennwerkzeuge oder Trennmethode angewandt werden. In diesem Rahmen ist zu untersuchen, ob der zur Anwendung kommende Mechanismus des Herstellens und Lösens der Verbindung idealerweise mechanisch, chemisch, elektro-chemisch oder elektrisch erfolgt. Zudem wird angenommen, dass hinsichtlich einer dauerhaften Befestigung im Bauwesen die Verbindung auch

bei inaktiven Klettelementen bestehen muss und die Steuerung der Elemente vor allem den Vorgang der Herstellung und des LöSENS der Verbindung betrifft.

Für die Anwendung im Hochbau und die Montage unterschiedlicher Komponenten wird angenommen, dass die Kraftübertragung der Verbindung idealerweise über die Größe der Verbindungsfläche gesteuert wird und das Montageelement entsprechend auszuwählen ist. Von zusätzlicher Bedeutung für Befestigungen im Hochbau ist die Brandbeständigkeit. Während für eine Klett Komponente aus Beton aufgrund der materialspezifischen Eigenschaften eine gute Brandbeständigkeit angenommen werden kann, muss der Verbindungspartner entsprechend konstruiert werden. Unbrennbare aromatische Polyamide (Kevlar, Nomex, Twaron), Polyphenylsulfid oder auch Glasfasern finden als Klettverbindung bereits Anwendung und werden bei Kleidungsstücken in der Raumfahrt oder in der Brandbekämpfung eingesetzt.²³² Sie können, wie auch metallische Schlaufenkomponenten (siehe Kapitel *Patente*), bei der Entwicklung und Herstellung eines entsprechenden Klettbeton-Verbindungspartners Anwendung finden.

²³² Vgl. Krüger 2013, 3.

5 Quellenverzeichnis

5.1 Literaturverzeichnis

Afrisal, Hadha/Sadati, S. HadiM./Nanayakkara, Thrishantha: A Bio-Inspired Electro-Active Velcro Mechanism Using Shape Memory, 2016 IEEE International Conference on Information and Automation for Sustainability (ICIAfS), Galle 2016

Ahn, Youngjoo/Jang, Yoonjung/Selvapalam, Narayanan/Yun, Gyeongwon/Kim, Kimoon: Supramolecular Velcro for Reversible Underwater Adhesion, in: *Angew. Chem.* 125, 11 (2013), 3222–3226

Alhussainy, Faez/Hasan, Hayder Alaa/Sheikh, M. Neaz/Hadi, Muhammad N. S.: A New Method for Direct Tensile Testing of Concrete, University of Wollongong 2018, Online unter: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-New-Method-for-Direct-Tensile-Testing-of-Concrete-Alhussainy-Hasan/66756527af3ee996fabe0c42e5bcfb3adf4cfe92> [04.06.2020]

Bahr, Carolin/Lennerts, Kunibert: Lebens- und Nutzungsdauer von Bauteilen, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) und Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) 2010

Barvosa-Carter, William Ventura/Browne, Alan L. Grosse Ponte/Johnson, Nancy L. Northville/Keefe, Andrew C. Encino (2007): Reversible Befestigungsmechanismen, Nr: DE112007002135T5

ÖNORM B 4710-1:2018 01 01: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität

BETONWERK SCHUSTER GmbH (2016): Innovatives System zur Befestigung von Anbauten an Betonteilen, Nr: DE202016005858U1

Brei, Diann/Lindner, Douglas/Frecker, Mary/LaVigna, Chris/Clement, Joe: Electronically Integrated Active Compliant Transmission (ACT) Actuation Technologies. Proof-of-Concept Investigation of Active Velcro for Smart Attachment Mechanisms, University of Michigan 2003

Bringezu, Stefan/Ramaswami, Anu/Schandl, Heinz/O'Brien, Meghan/Pelton, Rylie/Acquatella, Jean/Ayuk, Elias T./Shun Fung Chiu, Anthony/Flanegin, Robert/Fry, Jacob/Giljum, Stefan/Hashimoto, Seiji/Hellweg, Stefanie/Hosking, Karin/Hu, Yuanchao/Lenzen, Manfred/Lieber, Mirko/Lutter, Stephan/Miatto, Alessio/Nagpure, Ajay Singh/Obersteiner, Michael/van Oers, Lauran/Pfister, Stephan/Pichler, Peter-Paul/Russell, Armistead/Spini, Lucilla/Tanikawa, Hiroki/van der Voet, Ester/Weisz, Helga/West, James/Wiijkman, Anders/Zhu, Bing/Zivy, Romain/Razian, Hala: Assessing Global Resource Use. A systems approach to resource efficiency and pollution reduction, International Resource Panel 2017

Browne, Alan/Barvosa-Carter, William/Johnson, Nancy/Momoda, Leslie/Stanford, Thomas (2004): Electroactive polymer releasable fastening system and method of use, Nr: US20040074069A1

Caprini, Joseph A.: Velcro compression devices, in: *Veins and Lymphatics* 6, 1 (2017)

Chen, Qiang/Gorb, Stanislav N./Gorb, Elena/Pugno, Nicola: Mechanics of plant fruit hooks, in: *Journal of the Royal Society. Interface* 10, 81 (2013)

- Dankert, Jürgen/Dankert, Helga: Technische Mechanik. Statik, Festigkeitslehre, Kinematik/Kinetik, Wiesbaden ⁷ 2013
- Dejean, Alain/Leroy, Céline/Corbara, Bruno/Roux, Olivier/Céréghino, Régis/Orivel, Jérôme/Boulay, Raphaël: Arboreal ants use the "Velcro(R) principle" to capture very large prey, in: PloS one 5 (2010)
- Dinkler, Dieter: Einführung in die Strukturodynamik. Modelle und Anwendungen, Wiesbaden ² 2017
- Eligehausen, R./Fuchs, W.: Befestigungstechnik, in: Zilch, K. u. a. (Hg.): Handbuch für Bauingenieure, Wiesbaden 2019 (2019)
- Eligehausen, R./Lehr, B.: Quersugtragfähigkeit von Dübeln mit großem Randabstand (Shear capacity of anchors with large edge distance). Report No. 10/20-93/11, Universität Stuttgart (nicht veröffentlicht) 1993
- Eligehausen, Rolf/Mallée, Rainer: Befestigungstechnik im Beton- und Mauerwerksbau, Berlin 2000
- FDT FlachdachTechnologie GmbH & Co. KG: Rhepanol hfk, die Dachbahn für jede Verlegeart, Online unter: <https://www.fdt.de/produkte/rhepanol-dachbahnsystem/rhepanol-hfk-dachbahnen> [09.10.2019]
- Fontana, Patrick: Bewährter Baustoff mit neuen Eigenschaften. Beton mit funktionalen Oberflächen, in: GIT-Labor – Portal für Anwender in Wissenschaft und Industrie 8 (2016), 36–38
- Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg: Untersuchungsbericht Nr. II.4-14488 vom 18.4.1985 Untersuchungsbericht Nr. II.4-14488 vom 18.4.1985 über Versuche an axialzugbeanspruchten Kopfbolzen (Serie 7), Stuttgart (nicht veröffentlicht) 1985
- Freytag, Bernhard/Harden, David/Koitz, Hannes/Fülöp, Uwe: Klett TGA - FFG-Sondierungsprojekt Nr. 861664. Versuche für die Entwicklung von Klett-Befestigungssystemen für die Technische Gebäudeausrüstung., Technische Universität Graz 2018
- Gorb, E. V./Popov, V. L./Gorb, S. N.: Natural hook-and-loop fasteners. anatomy, mechanical properties, and attachment force of the jointed hooks of the Galium aparine fruit, in: Design and nature 3 (2002), 151–160
- Gorb, Elena/Gorb, Stanislav: Contact separation force of the fruit burrs in four plant species adapted to dispersal by mechanical interlocking, in: Plant Physiology and Biochemistry 40, 4 (2002), 373–381
- Gorb, S. N./Popov, V. L.: Probabilistic fasteners with parabolic elements: biological system, artificial model and theoretical considerations, in: Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences 360, 1791 (2002), 211–225
- Gorb, Stanislav N.: Evolution of the dragonfly head-arresting system, in: Proc. R. Soc. Lond. B 266, 1418 (1999), 525–535
- Gottlieb Binder GmbH & Co KG: Produktdatenblatt Duotec® 50. 75763, 2018a
- Gottlieb Binder GmbH & Co KG: Produktdatenblatt Klettostar® – Flausch. 15244, 2018b
- Gottlieb Binder GmbH & Co KG: Produktdatenblatt Klettostar® – Haft. 15147, 2018c

- Gottlieb Binder GmbH & Co KG: Produktdatenblatt Pressotex®-Haft. 75161, 2018d
- Gottlieb Binder GmbH & Co KG: Produktdatenblatt Velour. 88297, 2018e
- Grinfeld, Michael A./Segletes, Steven B.: Towards Mechanochemistry of Fracture and Cohesion. General Introduction and the Simplest Model of Velcro, Aberdeen 2010
- Guo, Jiangna/Yuan, Chao/Guo, Mingyu/Wang, Lei/Yan, Feng: Flexible and voltage-switchable polymer velcro constructed using host–guest recognition between poly(ionic liquid) strips, in: Chem. Sci. 5, 8 (2014), 3261–3266
- Höhe, Kurt/Braun, Klaus/Mair, Josef/Bügel, Andreas/Zahm, Michael: Verbundprojekt "Industrielle metallische Klettverbindung" (METAKLETT). Forschung für die Produktion von morgen, Fügen im Produktlebenszyklus, Neu-Ulm 2009
- International Energy Agency and the United Nations Environment Programme: Global Status Report 2017. Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector, International Energy Agency (IEA) 2017
- International Energy Agency and the United Nations Environment Programme: 2018 Global Status Report. Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector, International Energy Agency (IEA) 2018
- Kampen, Rolf/Richter, Thomas: Zement-Merkblatt Betontechnik. Betonzusätze - Zusatzmittel und Zusatzstoffe, InformationsZentrum Beton GmbH, Erkrath 2014
- Kern GmbH: Polyamid 6 (PA 6), Online unter: https://www.kern.de/de/technisches-datenblatt/polyamid-pa-6?n=1102_1 [14.04.2020]
- Kern GmbH: Polypropylen Homopolymer (PP-H), Online unter: https://www.kern.de/de/technisches-datenblatt/polypropylen-pp-h?n=1502_1 [14.04.2020]
- Kern GmbH: Reibbeiwert, Online unter: <https://www.kern.de/de/kunststofflexikon/reibbeiwert> [14.04.2020]
- Kerz, Nicolas/Asam, Claus/Dorn, Sabine/Hänel, Matthias/Mann, Brigitte: Nutzungsdauerangaben von ausgewählten Bauteilen und Bauteilschichten des Hochbaus für den Leitfaden „Nachhaltiges Bauen“, Technische Universität Berlin 2008
- Keshavarzi, Shervin/Mescheder, Ulrich/Reinecke, Holger: Modeling the adhesion between nanoneedle surfaces bonded based on Velcro or Gecko principle, in: Von Bauelementen zu Systemen (2013), 864–867
- Kind-Barkauskas, Friedbert/Polónyi, Stefan/Kauhsen, Bruno/Brandt, Jörg: Beton Atlas. Entwerfen mit Stahlbeton im Hochbau, München/Düsseldorf 1995
- Krüger, Georg: Klettverschlüsse. Materialien, Herstellung, Prüfung, Anwendungen, München 2013
- Lafarge Zementwerke GmbH: Produktdatenblatt Airium 2018
- Mainka, Jeldrik/Kloft, Harald/Baron, Sarah/Hoffmeister, Hans-Werner/Dröder, Klaus: Non-Waste-Wachsschalungen: Neuartige Präzisionsschalungen aus recycelbaren Industriewachsen, in: Beton- und Stahlbetonbau 111, 12 (2016), 784–793

- Mainka, Jeldrik L.C.: Non-Waste-Wachsschalungen. Entwicklung einer Wachsschalungstechnologie für geometrisch komplexe Betonbauteile, Dissertation, Technische Universität Braunschweig 2019
- Mallée, Rainer/Fuchs, Werner/Eligehausen, Rolf: Design of fastenings for use in concrete - the CEN/TS 1992-4 provisions, Berlin 2013
- Mann, Oliver: Prüfung der Oberflächenzugfestigkeit von Beton. Verschiedene Regelwerke - unterschiedliche Anforderungen, in: beton, 1+2 (2011), 14-18
- Mestral, George de (1961): Separable fastening device, Nr: US3009235A
- Momoda, Leslie/Browne, Alan/Johnson, Nancy/Barvosa-Carter, William/Stanford, Thomas (2002): Releasable fastening system based on ionic polymer metal composites and method of use, Nr: US2004074070A1
- Moro, José Luis/Alhodzic, Bernes/Rottner, Matthias/Weißbach, Matthias: Baukonstruktion - vom Prinzip zum Detail. Band 1 Grundlagen, Berlin/Heidelberg 2009
- o. A. (1978): Separable fastening device, US3009235A, Online unter: <https://patents.google.com/patent/US3009235A/en?q=US3009235A> [10.02.2020]
- Okamoto, Osamu/Nakaya, Teruomi (1995): Mounting object provided with a metallic heat-resistant two-dimensional fastener, Nr: US5429875A
- Ožbolt, Joško: Maßstabeffekt und Duktilität von Beton- und Stahlbetonkonstruktionen, Habilitationsschrift, Universität Stuttgart 1995
- Pallett, Peter/Gorst, Nicholas/Clark, Leslie/Williamson, S.: Friction in temporary works. RESEARCH REPORT 071, University of Birmingham 2003
- Peck, Martin (Hg.)/Dauberschmiedt, Christoph/Wolfrum, Arthur/Engelsmann, Stephan/Peters, Stefan/Spalding, Valerie/Forstlechner, Franz/Förschler, Ulrike/Förster, Torsten/Lieblang, Peter/Wallisser, Tobias: Moderner Betonbau. Atlas. Konstruktion Material Nachhaltigkeit, München 2013
- Raupach, Michael/Orlowsky, Jeanette: Erhaltung von Betonbauwerken. Baustoffe und ihre Eigenschaften, Wiesbaden¹ 2008
- Reinhardt, H.-W.: Werkstoffe des Bauwesens (Building materials), in: Mehlhorn, Gerhard von (Hg.): Der Ingenieurbau, Berlin 1997, 1–163
- Reinz-Dichtungs-GmbH/Hölzel Stanz - und Feinwerktechnik GmbH & Co.KG/Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München: Produktdatenblatt METAKLETT – Entenkopf, 2010
- Riewe, R./Oswald, F./Pavicevic, A./Kreševic, Z./Raudaschl, M.: Entwicklung von Klett-Befestigungssystemen für die Technische Gebäudeausrüstung. Klett-TGA, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien 2019
- Riewe, Roger/Oswald, Ferdinand: facade4zeroWaste, Projektbericht, Technische Universität Graz (nicht veröffentlicht) 2014

- Saint-Gobain ISOVER Austria GmbH: Vario® XtraSafe Klimamembran - Schutz vor Feuchteschäden, Online unter: <https://www.isover.at/products/varior-xtrasafe-klimamembran> [09.10.2019]
- Schaumburg, Andreas (2012): Klettsystem in oder an einem Gebäude, Nr: DE202012003999U1
- Schulz, Rolf-Rainer: Beton als Beschichtungsuntergrund. Über die Prüfung des Festigkeitsverhaltens von Betonoberflächen mit dem Abreissversuch, Dissertation, Technische Hochschule Aachen 1984
- Sievers, Maik: Molekulare Klettverschlüsse zur reversiblen Bindung makroskopischer Oberflächen, Dissertation, Technische Universität Clausthal 2016
- Stafil Austria GmbH: Produktdatenblatt Stafil Wachsplatten 767-02
- Sto Ges.m.b.H (2017): StoSystain R: Kletten statt kleben! Die Fassade der Zukunft, Online unter: https://www.sto.at/media/documents/download_broschuere/kategorie_fassade/sto_systain_folder-Ansicht-Neu.pdf [16.05.2020]
- Tachauer, Ernesto/Provencher, Ronald/Banker, Shawn/Provost, George (2000): Fastening with wide fastening membrane, Nr: US20030070391A1
- Uponor GmbH: Fußbodenheizung und –kühlung. Klett Nassbausystem, Online unter: <https://www.uponor.at/produkte/fussbodenheizung-und-kuehlung/klett-nassbausystem> [09.10.2019]
- Vokoun, D./Sedlák, P./Frost, M./Pilch, J./Majtás, D./Šittner, P.: Velcro-like fasteners based on NiTi micro-hook arrays, in: Smart Mater. Struct. 20, 8 (2011), 1–13
- Werner, Jan (2018): gecco-Wall. Flexible wall solutions, Online unter: <https://vimeo.com/272317398> [27.02.2020]
- Williams, J. A./Davies, S. G./Frazer, S.: The peeling of flexible probabilistic fasteners, in: Tribol Lett 26, 3 (2007), 213–222
- Wirth, Franz/Mainka, Jeldrik/Kloft, Harald: Modulares und vollautomatisiertes Fertigungsverfahren für frei geformte Betonschalungen auf Basis von technischen Wachsen, in: BWI-BetonWerk International, 05 (2018), 150–156
- Wopfinger Baustoffindustrie GmbH: Produktdatenblatt Baunit TrockenBeton 30
- Zement + Beton Handels- und Werbeges.m.b.H.: Zement und Beton. Fachtextbuch, Wien ⁴⁶ 2019
- Zhao, G./Eligehausen, R.: Tragfähigkeit von Befestigungen unter kombinierter Zug- und Querlast. Report No. 10/17-92/2, Universität Stuttgart (nicht veröffentlicht) 1992
- Zhu, Yanchang/Xu, S. L.: Fracture properties of cement paste and mortar: an experimental investigation (2007)

5.2 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Fotografie der Frucht der Klettpflanze <i>Arctium lappa</i> , Pixabay, https://cdn.pixabay.com/photo/2019/05/24/20/31/velcro-czepy-4227128_960_720.jpg , 20.11.2019	10
Abb. 2:	Klettverbindung bestehend aus den Klettelementen Pilzkopf und Schlaufe, Gottlieb Binder GmbH & Co KG, https://www.binder.de/fileadmin/_processed_/csm_8products_d49efe080f.jpg , 17.10.2019	10
Abb. 3:	Bestandteile des Fassadensystems StoSystain R, Sto Ges.m.b.H, https://www.sto.at/media/documents/download_broschuere/kategorie_fassade/sto_systain_folder-Ansicht-Neu.pdf , 25.05.2020	11
Abb. 4:	Putzträgerplatte mit rückseitiger Schlaufenbeschichtung (4, li) und justierbares Befestigungselement mit Pilzkopfkomponente (3, re), Sto Ges.m.b.H, https://www.sto.at/media/documents/download_broschuere/kategorie_fassade/sto_systain_folder-Ansicht-Neu.pdf , 25.05.2020	11
Abb. 5:	Klett Nassbausystem, Uponor GmbH, https://www.uponor.ch/-/media/images-global/products-building/underfloor-heating-and-cooling/klett/klett-silent-advantages-mobile-und-tablet.jpg?w=480&hash=B4B932D334069E6CB700A4325B2495C3F66D3B08 , 09.10.2019	12
Abb. 6:	Aufbau der Gecco-Wall, Video Screenshot, Werner 2018, https://vimeo.com/272316829 , 05.10.2019	13
Abb. 7:	Fastening membrane as a protective exterior structural wrap, Tachauer u.a. 2000, https://patentimages.storage.googleapis.com/US20030070391A1/US20030070391A1-20030417-D00011.png , 01.08.2018	14
Abb. 8:	Klettsystem, Schaumburg 2012, https://patentimages.storage.googleapis.com/f9/8a/c9/5ce64402985085/00040001.png , 01.08.2018	15
Abb. 9:	Befestigungssystem, BETONWERK SCHUSTER GmbH 2016, https://patentimages.storage.googleapis.com/67/94/19/8d85ab066e48f4/DE202016005858U1_0002.png , 09.10.2019	15
Abb. 10:	Heat-resistant mounting object mounted on a structural body (Fig. 1), Heat- resistant mounting object (Fig. 4), Section A-A (Fig.5), Okamoto/Nakaya 1995, https://patentimages.storage.googleapis.com/b5/97/e7/3d027361c93b32/US5429875-drawings-page-3.png , 09.10.2019	16
Abb. 11:	Releasable fastening system enabled (Fig. 4) and disabled (Fig. 5), Momoda u.a. 2002	17
Abb. 12:	Befestigungssystem in Eingriff und außer Eingriff, Barvosa-Carter u.a. 2007, https://worldwide.espacenet.com/patent/drawing?channel=espacenet_channel-c9126ebb-3e68-4673-bff6-1c37c4ad5a4a , 21.04.2020	19
Abb. 13:	Cross-sectional view of an electrolytically activatable releasable fastening system, Browne u.a. 2004, https://patentimages.storage.googleapis.com/a6/9d/22/1b68e25da3ca3a/US20040074069A1-20040422-D00001.png , 21.04.2020)	19

Abb. 14:	Versuchsergebnis der Herstellung einer Schlaufenfläche auf Beton durch Einlegen in die Schalung, Freytag u.a. 2018, 48.....	20
Abb. 15:	Übersicht der Versuchsergebnisse der Haftzugprüfung des Konzeptes „Kleben auf Beton“, Riewe u.a. 2019, 42, basierend auf Freytag u.a. 2018, 10.....	21
Abb. 16:	Konzeptskizze „Bohren“ angewandt auf den Rohbaustoff Holz, Institut für Architekturtechnologie, TU Graz	22
Abb. 17:	Herstellungsverfahren einer NiTi-Hakenfläche (li), finale NiTi-Hakenfläche (re), Vokoun u.a. 2011, 3	24
Abb. 18:	Übersicht des aktivierbaren Klettsystems (li, a) und Detail aktivierbarer Zellen (re, b), Brei u.a. 2003, 39	25
Abb. 19:	Inaktive (li) und aktivierte Zelle (re) des aktivierbaren Klettsystems, Brei u.a. 2003, 44	25
Abb. 20:	Übersicht (li) und Prototyp (re) des Klettsystems "Active Velcro", hergestellt aus Somos 8110-Harz und Flexinol™ Drähten, Brei u.a. 2003, 76	26
Abb. 21:	Elektroaktiver Klettverschluss bestehend aus Schlaufen- und Hakenkomponente (li), mit inaktiven (m) und aktivierten (re) Hakenelementen, Afrisal/Sadati/Nanayakkara 2016, 1.....	27
Abb. 22:	Prinzip des supramolekularen Klettverschlusses, Ahn u.a. 2013, 3222.....	28
Abb. 23:	Produktfoto des mineralischen Wärmedämmstoffs AIRium™, Lafarge Zementwerke GmbH, https://www.mbit.at/media/82098/header_airium_1920x560.jpg?mode=pad&quality=70 , 04.03.2020.....	32
Abb. 24:	Konfokalmikroskopische Aufnahme der Stereorille der UHPC-Schallplatte, Fontana 2016, 38	33
Abb. 25:	Prinzip der Haftzugprüfung einer Pilzkopf-Pilzkopf-Klettverbindung, Krüger 2013, 111.....	37
Abb. 26:	Prinzip der Scherzugprüfung einer Pilzkopf-Pilzkopf-Klettverbindung, Krüger 2013, 105.....	38
Abb. 27:	Prinzip der Schälzugprüfung flexibler Klettbänder oder Haftklebstoffbeschichtungen unter 180°, Krüger 2013, 98	38
Abb. 28:	Verbundprinzip der Nadelflächen, Keshavarzi/Mescheder/Reinecke 2013, 865	40
Abb. 29:	Mikroskopische (SEM) Aufnahmen der hergestellten Nadelflächen mit 750-facher (li) und 1500-facher Vergrößerung (re), Keshavarzi/Mescheder/Reinecke 2013, 866	40
Abb. 30:	Versuchsergebnis der Haftzugversuche verbundener Nadelflächen unter unterschiedlichen Anpresslasten, Keshavarzi/Mescheder/Reinecke 2013, 866.....	40
Abb. 31:	REM-Aufnahme (A), Längsschnitt, (B), Querschnitt unten und oben (C) und 3D-Model (D) des Hakenelements der Frucht der Klettpflanze Galium aparine, Gorb/Popov/Gorb 2002, 154	41
Abb. 32:	Versuchsaufbau und Kraft-Weg-Kurve eines Haftzugversuchs eines Hakenelements der Klettpflanze Galium aparine, Gorb/Popov/Gorb 2002, 155.....	41

Abb. 33:	Morphologische Einflüsse auf die Kontakttrennkraft pflanzlicher Haken, Gorb/Gorb 2002, 379	42
Abb. 34:	Schematische Darstellung morphologischer Hakenvariablen, Gorb/Gorb 2002, 380	42
Abb. 35:	Einfluss der Hakenlänge und der Klettenlänge auf das mechanische Verhalten pflanzlicher Haken, Chen u.a. 2013, 3	43
Abb. 36:	Verbindungselemente unterschiedlicher Libellenarten, Gorb/Popov 2002, 214	43
Abb. 37:	Fotografie der Faserstruktur der Palme <i>Livistona chinensis</i> , Institut für Architekturtechnologie, TU Graz.....	44
Abb. 38:	Fotografie der Faserstruktur der Palme <i>Cocos nucifera</i> , Institut für Architekturtechnologie, TU Graz.....	44
Abb. 39:	Mikroskopische Detailaufnahme der Faserstruktur der Palme <i>Livistona chinensis</i> im Verbund mit dem Klettprodukt Pressotex® 75161, Florian Mittermayr, Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie, TU Graz	44
Abb. 40:	Mikroskopische Detailaufnahme der Faserstruktur der Palme <i>Cocos nucifera</i> im Verbund mit dem Klettprodukt Pressotex® 75161, Florian Mittermayr, Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie, TU Graz.....	44
Abb. 41:	Lösemechanismus eines industriellen Haken-Klettelements im Verbund mit einer Schlaufe unter Schälzugbelastung, Williams/Davies/Frazer 2007, 217	45
Abb. 42:	Haken-Klettkomponente mit parabelförmigen Klettelementen, Krüger 2013, 12	46
Abb. 43:	Produktfoto der Klettprodukte Klettostar® und Klettostar® Flausch, Gottlieb Binder GmbH & Co KG, https://www.binder.de/fileadmin/_processed_/csm_1Klettostar_3a8301d187.jpg , 09.10.2019	46
Abb. 44:	Haken-Klettkomponente mit palmartigen Klettelementen, Krüger 2013, 13	47
Abb. 45:	Haken-Klettkomponente mit Y-förmigen Klettelementen, Krüger 2013, 11	47
Abb. 46:	Produktfoto der Klettprodukte Klettoplast® und Klettoplast® Flausch, Gottlieb Binder GmbH & Co KG, https://www.klettbandtechnik.de/media/images/content/haken_klettoplast.jpg , 09.10.2019	47
Abb. 47:	Metaklett-Klettverbindung bestehend aus den Komponenten Flamingo und Lochblech, Höhe u.a. 2009, 44	48
Abb. 48:	Metaklett-Klettverbindung bestehend aus den Komponenten Entenkopf und Stanzflausch, Höhe u.a. 2009, 44	48
Abb. 49:	Metaklett-Klettverbindung bestehend aus den Komponenten Entenkopf und Textilflausch, Höhe u.a. 2009, 44	49
Abb. 50:	Detailaufnahme des Metaklett-Klettelements Entenkopf, Krüger 2013, 13	49
Abb. 51:	Lösemechanismus eines industriellen Pilzkopf-Klettelements im Verbund mit einem Pilzkopf unter Schälzugbelastung, Williams/Davies/Frazer 2007, 219	50
Abb. 52:	Pilzkopf-Klettelemente auf schwarzer Bindemittelschicht, Krüger 2013, 20.....	51
Abb. 53:	Pilzkopf-Klettkomponente mit dreieckigen Klettelementen, Krüger 2013, 19	51

Abb. 54:	Produktfoto des Klettproduktes Duotec® 50, Gottlieb Binder GmbH & Co KG, https://www.binder.de/fileadmin/_processed_/csm_1duotec_f5e1472e9a.jpg , 08.10.2019.....	51
Abb. 55:	REM-Aufnahme der Schlaufen- Klettkomponente Vliesband mit ungeordneten Fasern, Krüger 2013, 15	53
Abb. 56:	Produktfoto der Klettprodukte Velour und Klettostar® LS, Gottlieb Binder GmbH & Co KG, https://www.binder.de/fileadmin/_processed_/csm_7KlettostarLS_1426d29c19.jpg , 17.10.2019.....	53
Abb. 57:	Schlaufen-Klettkomponente Flauschband mit ungeordneten Schlingen, Krüger 2013, 15.....	53
Abb. 58:	Schlaufen-Klettkomponente Flauschband mit ausgerichteten Schlingen, Krüger 2013, 15.....	53
Abb. 59:	Beanspruchungsrichtungen von Befestigungen, Eligehausen/Mallée 2000, 7	55
Abb. 60:	Verformungslinie von Beton unter Zugbelastung, Reinhardt 1997, 39.....	55
Abb. 61:	Querschnitte durch den Betonausbruchkegel eines Kopfbolzens, Eligehausen/Mallée 2000, 69, zitiert nach Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg 1985 (nicht veröffentlicht)	56
Abb. 62:	Übersicht Kopfbolzen, Mallée/Fuchs/Eligehausen 2013, 5	57
Abb. 63:	Übersicht Hinterschnittdübel, Mallée/Fuchs/Eligehausen 2013, 4.....	57
Abb. 64:	Versagensarten bei zentrischer Zugbeanspruchung, Eligehausen/Fuchs 2019, 15	58
Abb. 65:	Einfluss des Achsabstandes auf die Form des Betonausbruchskörpers bei zugbeanspruchten Zweiergruppen, Mallée/Fuchs/Eligehausen 2013, 49	58
Abb. 66:	Einfluss des Randabstandes auf die Form des Betonausbruchskörpers bei zugbeanspruchten Einzelbefestigungen, Eligehausen/Mallée 2000, 81	59
Abb. 67:	Versagensarten bei Beanspruchung durch Querlast, Eligehausen/Fuchs 2019, 17	60
Abb. 68:	Fotografie des Bruchbildes einer Vierergruppe randfern unter Querlast in Draufsicht (li) und Ausbruchskörper schematisch (re), Eligehausen/Mallée 2000, 107, zitiert nach Eligehausen/Lehr 1993 (nicht veröffentlicht).....	60
Abb. 69:	Vergleich Betonausbruchkörper unter Zuglast und Querlast, Eligehausen/Mallée 2000, 109	61
Abb. 70:	Betonausbruchkörper unter Querlast, Eligehausen/Mallée 2000, 110.....	61
Abb. 71:	Einzelbefestigung in einem schmalen und dünnen Bauteil, Eligehausen/Mallée 2000, 117	62
Abb. 72:	Schematische Darstellung von Bruchrissen bei Befestigungen am Bauteilrand unter Schrägzugbelastung Richtung Bauteilkante, Eligehausen/Mallée 2000, 131, zitiert nach Zhao/Eligehausen 1992 (nicht veröffentlicht)	63
Abb. 73:	Komponenten zur Herstellung der Prüfkörper, Alhussainy u.a. 2018, 23	64
Abb. 74:	Prinzip der Oberflächenzugprüfung, Raupach/Orlowsky 2008, 24	66
Abb. 75:	Fotografie des Schälzugversuchs des Konzeptes „Einlegen in Beton“ bei Versagen des Versuchsmaterials Schlaufenmatte, Freytag u.a. 2018, 68.....	67

Abb. 76: Fotografie des Ergebnisses des Schälzugversuchs des Konzeptes „Einlegen in Beton“ bei Versagen des Versuchsmaterials Pilzkopfmatte, Freytag u.a. 2018, 69	67
Abb. 77: Draufsicht auf die Matrizenschalung RECKLI 1/43 Corse, RECKLI GmbH, https://www.reckli.com/fileadmin/_processed_/c/5/csm_1_43_grey_9060190507.jpg , 24.10.2019.....	68
Abb. 78: Draufsicht auf die Matrizenschalung RECKLI 2/174 Breisgau, RECKLI GmbH, https://www.reckli.com/fileadmin/_processed_/c/7/csm_2_174_grey_de685e860a.jpg , 24.10.2019	68
Abb. 79: Schnitt durch die Matrizenschalung RECKLI 1/43 Corse, RECKLI GmbH, https://www.reckli.com/fileadmin/user_upload/global/products/surface_design/concrete_structures/01_Abstrakt/1_43%20Corse/143%20Korsika-01.svg , 24.10.2019	68
Abb. 80: Schnitt durch die Matrizenschalung RECKLI 2/174 Breisgau, RECKLI GmbH, https://www.reckli.com/fileadmin/user_upload/2174_Breisgau-01BK.svg , 24.10.2019.....	68
Abb. 81: Einachsige Zylinderdruckfestigkeit der Wachse bei 20 °C, Mainka u.a. 2016, 786	69
Abb. 82: Volumenzunahme der Wachse bei einer Bezugstemperatur von 20°C, Mainka u.a. 2016, 786.....	70
Abb. 83: Untersuchung der CNC-gesteuerten Fertigung von Wachsschalungen anhand von Industriewachsblöcken, Mainka u.a. 2016, 790	70
Abb. 84: Wachsschalung nach dem Ablösen des UHPC-Betonkörpers (li) mit UHPC-Abguss (re), Mainka u.a. 2016, 790	71
Abb. 85: Prinzip des vollautomatisierten Fertigungsverfahrens für eine modulare Wachsschalung, Mainka 2019, 149	72
Abb. 86: Konzeptprinzip Hakenstruktur	77
Abb. 87: Wachskörper bestehend aus Teil A (Haken-Schaft, o) und Teil B (Haken-Kopf, u).....	78
Abb. 88: Betonkörper resultierend aus dem Wachskörper	78
Abb. 89: Betonkörper in Untersicht (o) und Längsschnitt (u, li) wie auch Querschnitt (u, re)	79
Abb. 90: Längsschnitt der Krafteinwirkung unter Zugbelastung resultierend aus dem Klettelement Schlaufe	80
Abb. 91: Längsschnitt (li) und Querschnitt (re) des Versagens unter Zuglast durch den Verbindungspartner Schlaufenkomponente und Betonbruch in Form eines Betonausbruchkegels (jeweils li) oder an einer geometrisch oder materialspezifisch bedingten Schwachstelle (jeweils m und re).....	81
Abb. 92: Längsschnitt (li) und Querschnitt (re) des Versagens unter Querlast durch den Verbindungspartner Schlaufenkomponente und Betonbruch in Form eines Betonausbruchkegels (jeweils li) oder an einer geometrisch oder materialspezifisch bedingten Schwachstelle (jeweils m und re).....	81

Abb. 93: Längsschnitt (li) und Querschnitt (re) des Versagens unter Querlast durch den Verbindungspartner Einhängekomponente und Betonbruch in Form eines Betonausbruchkegels (jeweils li) oder an einer geometrisch oder materialspezifisch bedingten Schwachstelle (jeweils m und re)	82
Abb. 94: Wachskörper der Versuche 1 (li), 2 (m) und 3 (re)	84
Abb. 95: Versuchskörper nach Entformung der Wachskörper 1 (li), 2 (m) und 3 (re)	84
Abb. 96: Versuchskörper 1	85
Abb. 97: Versuchskörper 1 unter Querlast resultierend aus der Versuchsschlaufenkomponente mit einer Schlaufenhöhe von 5 mm	86
Abb. 98: Versuchskörper 2	86
Abb. 99: Versuchskörper 2 unter Querlast resultierend aus der Versuchsschlaufenkomponente mit einer Schlaufenhöhe von 5 mm	87
Abb. 100: Versuchskörper 3	87
Abb. 101: Versuchskörper 3 unter Querlast resultierend aus der Versuchsschlaufenkomponente mit einer Schlaufenhöhe von 10 mm	88
Abb. 102: Konzeptprinzip Pilzkopfstruktur	89
Abb. 103: Wachskörper bestehend aus Teil A (Pilzkopf-Schaft, o) und Teil B (Pilzkopf-Kopf, u).....	89
Abb. 104: Betonkörper resultierend aus dem Wachskörper	90
Abb. 105: Betonkörper in Untersicht (li) und Schnitt (re)	91
Abb. 106: Schnittdarstellung der Krafteinwirkung unter Zugbelastung resultierend aus dem Klettelement Schlaufe.....	92
Abb. 107: Schnittdarstellung des Versagens unter Zuglast durch den Verbindungspartner Schlaufenkomponente und Betonbruch in Form eines Betonausbruchkegels (li) oder an einer geometrisch oder materialspezifisch bedingten Schwachstelle (m, re)	92
Abb. 108: Schnittdarstellung des Versagens unter Querlast durch die Verbindungspartner Schlaufenkomponente (li) und Einhängekomponente (re) in Form eines Betonausbruchkegels (jeweils li) oder an einer geometrisch oder materialspezifisch bedingten Schwachstelle (jeweils m und re).....	93
Abb. 109: Wachskörper der Versuche 1 (li), 2 (m) und 3 (re)	95
Abb. 110: Versuchskörper nach Entformung der Wachskörper 1 (li), 2 (m) und 3 (re)	95
Abb. 111: Versuchskörper 1	96
Abb. 112: Versuchskörper 1 unter Querlast resultierend aus der Versuchsschlaufenkomponente mit einer Schlaufenhöhe von 5 mm	96
Abb. 113: Versuchskörper 2	97
Abb. 114: Versuchskörper 2 unter Querlast resultierend aus der Versuchsschlaufenkomponente mit einer Schlaufenhöhe von 5 mm	98
Abb. 115: Versuchskörper 3	98
Abb. 116: Versuchskörper 3 unter Querlast resultierend aus der Versuchsschlaufenkomponente mit einer Schlaufenhöhe von 10 mm	99

Abb. 117: Konzeptprinzip Lochstruktur	100
Abb. 118: Wachskörper in Form aneinandergereihter Wachskugeln	100
Abb. 119: Betonkörper resultierend aus dem Wachskörper.....	101
Abb. 120: Betonkörper in Untersicht (li) und Schnitt (re).....	102
Abb. 121: Betonkörper in unterschiedlichen Schnittebenen	103
Abb. 122: Grundrisschnitt (li) und Längsschnitt (re) der Krafteinwirkung unter Zugbelastung resultierend aus dem Verbindungspartner Pilzkopf- Klettelemente.....	103
Abb. 123: Längsschnitt (li) und Diagonalschnitt (re) des Versagens unter Zuglast durch den Verbindungspartner Einhängekomponente und Betonbruch in Form eines Betonausbruchkegels.....	104
Abb. 124: Längsschnitt (li) und Diagonalschnitt (re) des Versagens unter Zuglast durch den Verbindungspartner Einhängekomponente und Betonbruch an einer geometrisch oder materialspezifisch bedingten Schwachstelle	104
Abb. 125: Längsschnitt (li) und Diagonalschnitt (re) des Versagens unter Querlast durch den Verbindungspartner Einhängekomponente und Betonbruch an einer geometrisch oder materialspezifisch bedingten Schwachstelle	105
Abb. 126: Schnittdarstellung eines mechanisch deaktivierten (li) und aktivierten (re) Befestigungsmittels, Barrionuevo, Belén/Chacón, Celia/Maletin, Milan/Sandalj, Ivana, im Zuge der Lehrveranstaltung Workshop 3 am Institut für Architekturtechnologie, TU Graz, Betreuung und Leitung: Matthias Raudaschl	106
Abb. 127: Wachskörper v. l. n. r. 1, 2, 3, 4, 5.....	107
Abb. 128: Versuchskörper nach Entformung der Wachskörper v. l. n. r. 1, 2, 3, 4, 5	107
Abb. 129: Versuchskörper 1.....	108
Abb. 130: Versuchskörper 1 unter Querlast resultierend aus der Versuchs- Schlaufenkomponente mit einer Schlaufenhöhe von 5 mm.....	109
Abb. 131: Versuchskörper 2.....	109
Abb. 132: Versuchskörper 2 unter Querlast resultierend aus der Versuchs- Schlaufenkomponente mit einer Schlaufenhöhe von 5 mm.....	110
Abb. 133: Versuchskörper 3.....	111
Abb. 134: Versuchskörper 3 unter Querlast resultierend aus der Versuchs- Schlaufenkomponente mit einer Schlaufenhöhe von 10 mm.....	111
Abb. 135: Versuchskörper 4.....	112
Abb. 136: Versuchskörper 5.....	113
Abb. 137: Herstellung einer Lochstruktur durch 3D-Betondruck.....	121
Abb. 138: Wachskörper in unterschiedlichen Skalierungsgraden	138
Abb. 139: Mischkübel und Schalungsstruktur aus extrudiertem Polystyrol (li), Bohrmaschine mit Rührkorb (re).....	139
Abb. 140: Ausgeschaltete Versuchskörper im Verbund mit der Wachsschalung.....	139
Abb. 141: Entformung der Wachskörper durch 90° C heißes Wasser.....	140

Abb. 142: Übersicht der hergestellten Versuchskörper.....	140
Abb. 143: Versuchs-Schlaufenkomponente mit einer Schlaufenhöhe von 5 mm (v) und 10 mm (h).....	145

5.3 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Mischungsverhältnisse des geprüften Betonmaterials, Alhussainy u.a. 2018, 21	64
Tab. 2: Testergebnisse der direkten Zugfestigkeit der Betonmischungen Normalbeton (NSC), hochfester Beton (HSC), selbstverdichtender Beton (SCC) und hochfester Beton mit Stahlfasern (SFHSC), Alhussainy u.a. 2018, 22.....	65
Tab. 3: Produktdaten Baunit TrockenBeton 30, Wopfinger Baustoffindustrie GmbH, 1	137
Tab. 4: Produktdaten Stafil Wachsplatten 767-02, Stafil Austria GmbH, 1–2	138

6 Anhang

A Herstellungsversuche

Die Beschreibung der im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführten Herstellungsversuche umschließt die Zielsetzung, die Versuchskomponenten und -materialien, den Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung.

Zielsetzung

Das Ziel der Herstellungsversuche in Form einer Machbarkeitsstudie besteht in der Überprüfung und Feststellung der Anwendbarkeit der Herstellungskonzepte, wie auch der Eignung der Wachsschalungstechnologie und der Entformungsmethode der Wachskörper durch heißes Wasser zur Herstellung von Klettbeton.

Versuchskomponenten und -materialien

Die Versuchskomponenten bestehen aus einer von Hand gefertigten Schalungsstruktur aus extrudiertem Polystyrol mit 11 Kammern mit den Innenmaßen 5 x 5 x 3 cm, den jeweiligen Wachskörpern mit einer Grundfläche von 5 x 5 cm, der Betonmischung und einer Pfanne mit 90° C heißem Wasser zur Entformung.

Als Versuchsmaterial für die Betonabgüsse wurde herkömmlicher Trockenbeton gewählt. In nachfolgender Tabelle sind die grundlegenden Eigenschaften des Materials angeführt (siehe Datenblatt im Anhang).

Handelsname	Baumit TrockenBeton 30
Betonsortenbezeichnung	DC25/30 / XC4 / XF4 / XW2 / F45 / GK8
Zusammensetzung	Zement, Gesteinskörnungen, Fasern, Zusätze
Gesteinskörnung	0 - 8 mm
Trockenrohichte	ca. 2000 kg/m ³

Tab. 3: Produktdaten Baumit TrockenBeton 30, Wopfinger Baustoffindustrie GmbH, 1

Die Anforderungen an das Wachs zur Anwendung als Wachsschalung im Rahmen der Herstellungsversuche von Klettbeton bestehen in einer einfachen Form- und Bearbeitbarkeit sowie in einem geringen Schmelzpunkt. Anhand von Vorversuchen wurden Wachsplatten der Firma *Stafil Austria GmbH* mit der Produktnummer 767-02 ausgewählt. Die grundlegenden Eigenschaften des Materials sind in nachfolgender Tabelle dargestellt. Einer Beifügung des Datenblattes im Anhang wurde seitens des Herstellers leider nicht zugestimmt.

Handelsname	Stafil Wachsplatten 767-02
Zusammensetzung	Kohlenwasserstoffwachs mit überwiegend mikrokristalliner Struktur, Pigmentfarben
Tropfpunkt	60-100 °C
Flammpunkt	> 150 °C
Viskosität bei 120 °C	< 30 mPas

Tab. 4: Produktdaten Stafil Wachsplatten 767-02, Stafil Austria GmbH, 1–2

Versuchsaufbau und Durchführung

Als Schalung diente die bereits erwähnte Struktur mit 11 Kammern mit den Innenmaßen 5 x 5 x 3 cm und die in diesen Kammern positionierten und dem jeweiligen Konzept entsprechenden Wachskörper in unterschiedlichen Skalierungsgraden, siehe nachfolgende Abbildung.

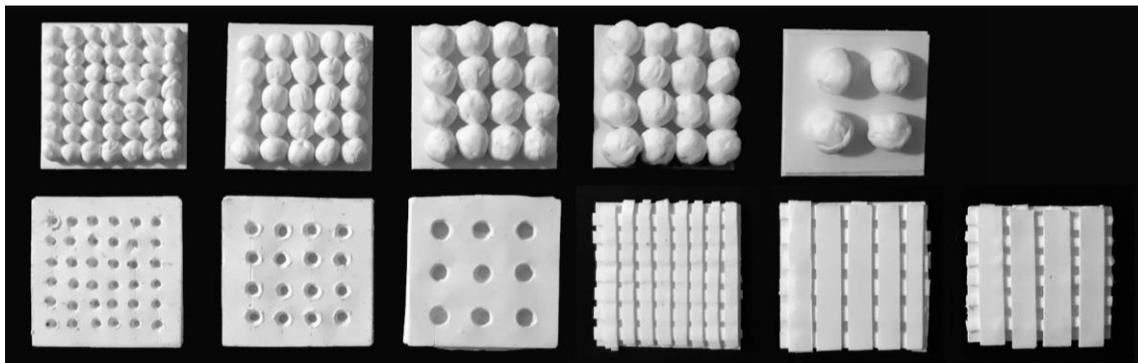


Abb. 138: Wachskörper in unterschiedlichen Skalierungsgraden

Das Mischen des Trockenbetons erfolgte bei einer Temperatur von 13 °C mit Hilfe einer Bohrmaschine mit Rührkorb in einem Mischkübel (siehe nachfolgende Abbildung). Da der exakte Bindemittelanteil des Produktes nicht aus dem Produktdatenblatt eruiert werden konnte, wurde unter Einhaltung der Verarbeitungsangaben eine Menge von 10 % Wasser beigelegt (die max. zulässige Wasserzugabe beträgt 11 %) ²³³.

²³³ Vgl. Wopfinger Baustoffindustrie GmbH, 1.



Abb. 139: Mischkübel und Schalungsstruktur aus extrudiertem Polystyrol (li), Bohrmaschine mit Rührkorb (re)

Anschließend wurde der Frischbeton bei einer Höhe von wenigen Zentimetern und ohne besondere Rücksichtnahme auf die Wachskörper in die Schalkammern eingebracht, mittels Stochern verdichtet und mit Wasser wie auch einer Abdeckung durch Plastikfolien 5 Tage lang nachbehandelt. Das Ausschalen erfolgte nach 30 Tagen. Eine Auswahl der ausgeschalteten Versuchskörper im Verbund mit der Wachsschalung ist nachfolgend abgebildet.



Abb. 140: Ausgeschaltete Versuchskörper im Verbund mit der Wachsschalung

Die Entformung, das Trennen von Beton und Wachskörper, erfolgte 6 Tage nach dem Ausschalen durch die Anwendung von 90° C heißem Wasser. Dazu wurden die Versuchskörper in einer Pfanne umspült, das Wachs zum Schmelzen gebracht und aus der Betonstruktur geschwemmt, siehe nachfolgende Abbildung. Hinsichtlich der Gefahr der Sprengwirkung von Wachs wurde auf eine langsame Erhitzung und einen ausreichenden Abtrag des geschmolzenen Wachses geachtet.



Abb. 141: Entformung der Wackkörper durch 90° C heißes Wasser

Das Ergebnis der Herstellungsversuche besteht in 11 Versuchskörpern und dem positiven Ergebnis der Feststellung der grundsätzlichen Anwendbarkeit der Herstellungskonzepte zur Herstellung von Klettbeton, wie auch der Eignung der Wacksschalungstechnologie und Entformung durch heißes Wasser. Eine detaillierte Beschreibung der nachfolgend dargestellten Versuchskörper ist den jeweiligen vorangehenden Konzepten zugeordnet.

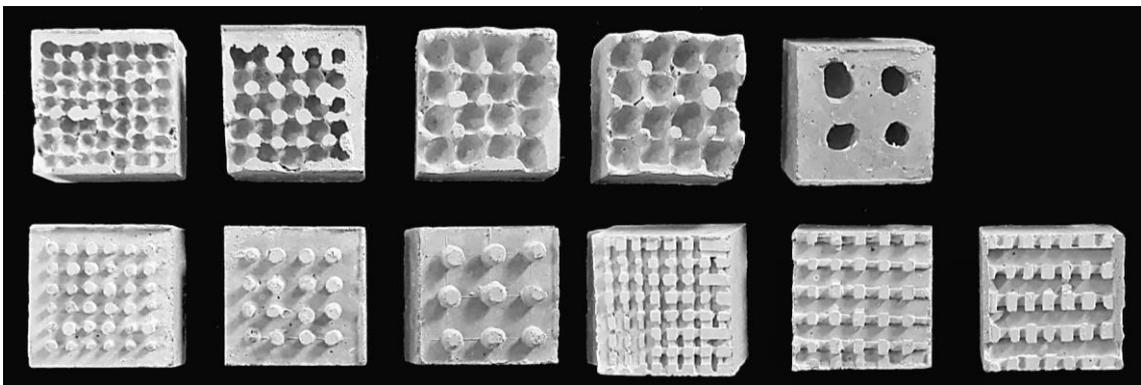


Abb. 142: Übersicht der hergestellten Versuchskörper

Datenblatt Baunit TrockenBeton 30



Baunit TrockenBeton 30



Hersteller	Wopfinger Baustoffindustrie GmbH	
Produkt	Werksgemischter Trockenbeton gemäß ÖBV-Richtlinie Trockenbeton.* Betonsortenbezeichnung: DC 25/30 / XC4 / XF4 / XW2 / F45 / GK8.	
Zusammensetzung	Zement, Gesteinskörnungen, Fasern, Zusätze.	
Eigenschaften	Baunit TrockenBeton 30 ist frost- und tausalzbeständig, hochbeständig gegen Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung sowie wasserundurchlässig und eignet sich sowohl für kleine als auch große Betonierabschnitte.	
Anwendung	<p>Alle Betonarbeiten mit erhöhten Anforderungen an die Festigkeit im Haus- und Gartenbereich, wie Fundamente, zum Verfüllen von Mantel- und Schalungssteinen, Gartenmauern, Stützen und Pfeilern, zum Ausgießen von Aussparungen, Fenster- und Türstürzen, Balken und Überlagern, Geschossdecken, Aufbau auf Fertigteildecken, Deckenroste, Stiegen, Fußböden, Schächte und vieles mehr.</p> <p>Auch für Anwendungen im Verkehrsinfrastrukturbereich geeignet. Zugelassen für Überwachungsklassen ÜK 1, 2 und 3.</p> <p><u>Überwachungsklassen:</u> (Auszug aus der Trockenbetonrichtlinie)</p> <p><i>Überwachungsklasse 1 (ÜK1) - nicht konstruktiv: Bauteile ohne Bewehrung bzw. mit statisch nicht relevanter Bewehrung, z.B. Unterlagsbeton für Pflasterarbeiten, Fundamente.</i></p> <p><i>Überwachungsklasse 2 (ÜK2) – konstruktiv: Bauteile mit statisch relevanter Bewehrung, z.B. Überlager, Bodenplatten.</i></p> <p><i>Überwachungsklasse 3 (ÜK3) – konstruktiv und bestimmte Expositionsklassen: Bauteile mit statisch relevanter Bewehrung und besonderen Expositionsklassen, z.B. Bauten im Verkehrsinfrastrukturbereich.</i></p>	
Technische Daten	Körnung:	0 - 8 mm
	Festigkeitsklasse:	DC25/30
	Max. zulässige Wasserzugabe:	Siloware: 125 l Wasser/to Sackware: 5 l Wasser/Sack
	Materialverbrauch:	ca. 20 kg/m ² /cm Schichtdicke
	Ergiebigkeit:	1 Tonne ergibt ca. 500 l Frischbeton 1 Sack (40 kg) ergibt ca. 20 l Frischbeton
	Verarbeitungskonsistenz:	max. F45
	Max. Verarbeitungszeit:	30 min
	Trockenrohddichte:	ca. 2000 kg/m ³
	Eignung für Expositionsklassen:	
	XC4	Beständig gegen Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung (wechselnd nass und trockene Umgebung)

	XF4	Frost-Tausalzbeständig (hohe Wassersättigung, mit Taumittel/Salzwasser)
	XW2	Wasserundurchlässig (Wasserdruckhöhe über 10m)
Qualitätssicherung	<p>Nach ÖBV-Richtlinie Trockenbeton: Erstprüfung (Typprüfung) durch akkreditierte Prüfanstalt. Konformitätsprüfung (Eigenüberwachung) durch unsere Werklabors. Fremdüberwachung durch akkreditierte Prüfanstalt. Je nach Anwendung bzw. Überwachungsklasse (siehe Punkt Anwendung) sind durch den Verarbeiter auf der Baustelle Dokumentation(en) bzw. Prüfungen durchzuführen.</p>	
Einstufung lt. Chemikaliengesetz	<p>Die detaillierte Einstufung gemäß ChemG entnehmen Sie bitte dem Sicherheitsdatenblatt (gemäß Artikel 31 und Anhang II der Verordnung Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlamentes und Rates vom 18.12.2006) unter www.baumit.com oder fordern das SDBL beim jeweiligen Herstellerwerk an.</p>	
Lieferform	<p>Sack 40 kg, 1 Pal. = 35 Sack = 1.400 kg Lose im Silo</p>	
Lagerung	<p>Siehe Sackaufdruck.</p>	
Verarbeitung	<p>Sämtliche Betonarbeiten sind sach- und fachgerecht entsprechend dem Stand der Technik auszuführen. Baumit TrockenBeton 30 kann als Sackware händisch mit einem Freifall-, Durchlauf- oder Zwangsmischer gemischt werden. Als Siloware kann Baumit TrockenBeton 30 automatisch mit einem angeflanschten Durchlaufmischer gemischt werden. Der Frischbeton ist nach dem Mischen so rasch als möglich einzubauen und ist vom Mischer bis zur Einbaustelle so zu transportieren, dass er sich nicht entmischt (Schiebetruhe, Krankübel, Trichter, Rohre, usw.). Fallhöhen über 1 Meter sollten vermieden werden. Der eingebrachte Beton muss entsprechend seiner Konsistenz verdichtet und geglättet werden. Maximale Verarbeitungszeit beachten.</p> <p>Die Wasserzugabe erfolgt je nach gewünschter Verarbeitungskonsistenz (Konsistenzbereich steif bis plastisch möglich). Für die Siloware benötigt man ca. 80 – 125 l Wasser/to, bei Sackware ca. 3,2 - 5 l Wasser/Sack. Es darf nur reines Wasser (Leitungswasser) verwendet werden.</p>	
Hinweise und Allgemeines	<p>Die Luft-, Material- und Untergrundtemperatur muss während der Verarbeitung und des Abbindevorganges über +5°C liegen. Auf gefrorenem Untergrund und/oder bei Frostgefahr darf Baumit TrockenBeton 30 nicht verarbeitet werden. Ein Beimischen von Fremd- und Zusatzstoffen ist nicht zulässig.</p> <p>Beim Einbau des Betons (Vorbereiten für das Betonieren, Förderung, Einbau mit Verdichtung, Verarbeitungszeit, Arbeitsfugen, Betonieren bei kühler und heißer Witterung, Nachbehandlung und Ausschalen) sind die ÖBV-Richtlinie Trockenbeton bzw. die ÖNORM B 4710-1 zu beachten.</p>	

Für Silobaustellen erforderliche Anschlüsse:

- Strom: 380 Volt, 25 Ampere, träge abgesichert, Baustellenleitung Anschlussquerschnitt 4 mm
- Wasser: mindestens 3 bar, Anschluss ¾ Zoll
- Zufahrt: muss für Schwer-LKW befahrbar und ständig frei sein
- Siloaufstellfläche: mindestens 3 x 3 m, auf tragfähigem Boden

Maße und Gewichtsangaben unserer Silos und Aufstellfahrzeuge sind dem Siloblatt zu entnehmen.

** Österreichische Bautechnik Vereinigung, Richtlinie Trockenbeton, Ausgabe November 2014*

Rechtliche Hinweise

Unsere anwendungstechnischen Empfehlungen in Wort und Schrift, die wir zur Unterstützung des Käufers/Verarbeiters aufgrund unserer Erfahrungen, entsprechend dem derzeitigen Erkenntnisstand in Wissenschaft und Praxis geben, sind unverbindlich und begründen kein vertragliches Rechtsverhältnis und keine Nebenverpflichtungen aus dem Kaufvertrag. Sie entbinden den Käufer nicht davon, unsere Produkte auf ihre Eignung für den vorgesehenen Verwendungszweck selbst zu prüfen.

B Klettversuche

Zielsetzung

Das Ziel der Klettversuche besteht in einer qualitativen Feststellung der Klettfähigkeit der aus den Konzepten und Herstellungsversuchen resultierenden Versuchskörper. Aufgrund des hohen Aufwandes der Konstruktion eines entsprechenden Verbindungspartners für das Konzept Lochstruktur wurden nur Versuchskörper mit Einhänge-Klettelementen getestet. Die Klettfähigkeit von Schlaufenkomponenten wird im Kapitel *Verbindungspartner* in der Theorie behandelt.

Die Klettfähigkeit wurde zu Beginn dieser Arbeit als die Fähigkeit einer Struktur oder einer Bauteilfläche definiert, mit einer, mit herkömmlichen Klettkomponenten vergleichbaren Klettkomponente, einem Verbindungspartner, eine Verbindung einzugehen. Diese Eigenschaft lässt auf das Potential zur Herstellung einer Klettverbindung, nicht jedoch auf die maximal mögliche Kraftübertragung schließen.

Versuchskomponenten und -materialien

Untersuchungsgegenstand sind die aus den Herstellungsversuchen resultierenden Versuchskörper sowie ein Verbindungspartner in Form einer eigens hergestellten Versuchsschlaufenkomponente, bestehend aus einer Grundplatte aus Graukarton mit den Abmessungen 5 x 5 x 0,05 cm mit Klettelementen in Schlaufenform aus Polyester (Fadenstärke: 100). Die Schlaufen wurden an einem Raster mit einem Achsmaß von 3 mm angeordnet, wodurch der Abstand zwischen den Schlaufen wie auch die Schlaufenbreite am Fußpunkt bestimmt wird. Die Schlaufenhöhe wurde einmal mit durchschnittlich 5 mm (siehe nachfolgende Abbildung vorne) und einmal mit durchschnittlich 10 mm (siehe nachfolgende Abbildung hinten) festgelegt.

Für eine Feststellung entstandener Verbindungspunkte während der Versuchsdurchführung wurden die einzelnen Schlaufen seriell gereiht und nicht, wie bei industriellen Schlaufenkomponenten üblich, auf der Grundplatte fixiert. Die Folge ist eine Verlängerung verbundener Schlaufen unter Last, bei gleichzeitiger Verkürzung nicht verbundener Schlaufen und damit eine Abzeichnung aktiver Verbindungspunkte.

Zudem beschränkt sich, wie in der Abbildung ersichtlich, die Ausbildung der Schlaufen auf wenige Reihen, um bei Feststellung der Klettfähigkeit ein zerstörungsfreies mechanisches Lösen der einzelnen Verbindungspunkte (mittels eines in den Zwischenraum eingreifenden Trennwerkzeuges) zu ermöglichen. Die Anzahl der Reihen wurde hinsichtlich der Feststellung der Klettfähigkeit anhand von Vorversuchen festgelegt.

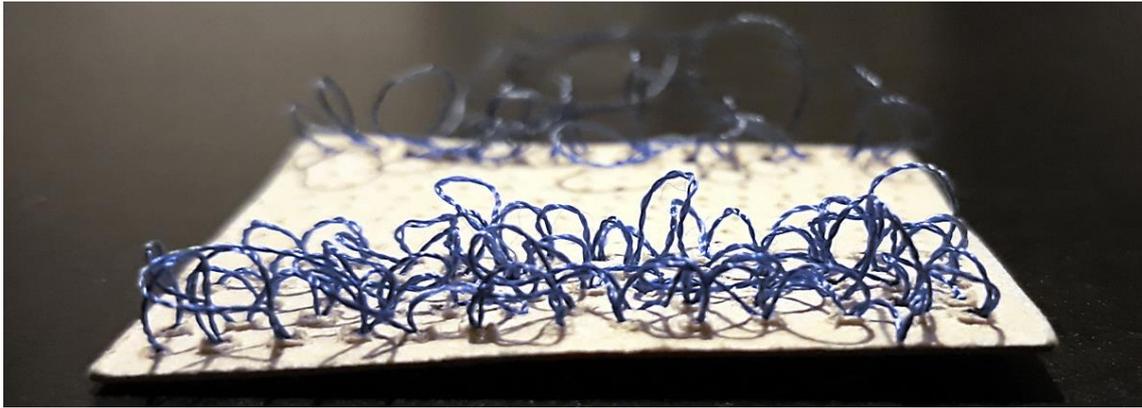


Abb. 143: Versuchs-Schlaufenkomponente mit einer Schlaufenhöhe von 5 mm (v) und 10 mm (h)

Versuchsaufbau und Durchführung

Die Versuchskörper wurden unter Zuglast und unter Querlast getestet. Für eine Feststellung der Klettfähigkeit unter Zuglast wurde der jeweilige Versuchskörper mehrmals auf die horizontal positionierte Schlaufenkomponente gepresst und anschließend angehoben. Kam es zum Verbund einzelner Schlaufen, so wurde dies durch ein Verhaken wie auch verlängerte Schlaufen sichtbar. Für eine Feststellung der Klettfähigkeit unter Querlast wurde die Schlaufenkomponente mehrfach auf eine vertikal ausgerichtete Betonstruktur gepresst und dann freigegeben.

Das Versuchsergebnis besteht in der qualitativen Feststellung der grundsätzlichen Klettfähigkeit je Versuchskörper mit Einhänge-Klettelementen unter Zuglast und unter Querlast. Eine Bewertung dieses Ergebnisses erfolgt durch eine, im Verhältnis zu den Ergebnissen der anderen Versuchskörpern stehende, Einteilung anhand der Klettfähigkeits-Bezeichnungen *negativ*, *gering*, *mittel* oder *hoch*. Eine Beschreibung der Ergebnisse ist den jeweiligen Konzepten und Versuchskörpern zugeordnet.