Bundesministerium
Innovation, Mobilität
und Infrastruktur

Entwicklung eines resilienten Klett-Verbindungs-Systems zur anpassungsfähigen Montage von Bauteilkomponenten im Hochbau (ReCon)

Berichte aus Energie- und Umweltforschung 73/2025

Wien, 2025

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur,
Radetzkystraße 2, 1030 Wien
Verantwortung und Koordination: Abteilung III/3 - Energie und Umwelttechnologien
Leitung: DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM
Autorinnen und Autoren:
Dipl.-Ing. Dr.techn. Matthias Lang-Raudaschl, Dipl.-Ing. Sasa Ritonja, Dipl.-Ing. Clemens Berlach, Dipl.-Ing. Toni Levak, Dr.techn. Arquitecta Vidal Martinez Maria Soledad, Selina Haingartner BSc, Semjon Popek Bsc (Institut für Architekturtechnologie – IAT, Technische Universität Graz)
Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernhard Freytag, Dipl.-Ing. Baumeister David Danner (Labor für Konstruktiven Ingenieurbau – LKI, Technische Universität Graz)
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Ulrich Hirn, Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Harter (Institut für Biobasierte Produkte und Papiertechnik – BPTI, Technische Universität Graz)
Ing. Gernot Theuermann, Dipl.-Ing. Christian Zuber (NET-Automation GmbH)
Simon Klima BSc., Dipl.-Ing. Peter Treitler, Ing. Mag. Angelika Weber, BSc., Leonie Haas, Nikola Oblak, Marcel Andrejak, Mag. Madeleine Hurst (Axtesys GmbH)
Wien, Pinkafeld 2025. Stand: Juli 2025

Ein Projektbericht gefördert im Rahmen von

STADT der Zukunft

Rückmeldungen:
Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an iii3@bmimi.gv.at.

Rechtlicher Hinweis

Dieser Ergebnisbericht wurde von die/der Projektnehmer:in erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit, Aktualität sowie die barrierefreie Gestaltung der Inhalte übernimmt das Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) keine Haftung.

Mit der Übermittlung der Projektbeschreibung bestätigt die/der Projektnehmer:in ausdrücklich, über sämtliche für die Nutzung erforderlichen Rechte – insbesondere Urheberrechte, Leistungsschutzrechte sowie etwaige Persönlichkeitsrechte abgebildeter Personen – am bereitgestellten Bildmaterial zu verfügen.

Die/der Projektnehmer:in räumt dem BMIMI ein unentgeltliches, nicht ausschließliches, zeitlich und örtlich unbeschränktes sowie unwiderrufliches Nutzungsrecht ein, das übermittelte Bildmaterial in allen derzeit bekannten sowie künftig bekannt werdenden Nutzungsarten für Zwecke der Berichterstattung, Dokumentation und Öffentlichkeitsarbeit im Zusammenhang mit der geförderten Maßnahme zu verwenden, insbesondere zur Veröffentlichung in Printmedien, digitalen Medien, Präsentationen und sozialen Netzwerken.

Für den Fall, dass Dritte Ansprüche wegen einer Verletzung von Rechten am übermittelten Bildmaterial gegen das BMIMI geltend machen, verpflichtet sich die/der Projektnehmer:in, das BMIMI vollständig schad- und klaglos zu halten. Dies umfasst insbesondere auch die Kosten einer angemessenen rechtlichen Vertretung sowie etwaige gerichtliche und außergerichtliche Aufwendungen.

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Stadt der Zukunft“ des Bundesministeriums für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm „Haus der Zukunft“ auf und hat die Intention, Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung aller betroffener Bereiche wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen, sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des BMIMI publiziert und elektronisch über die Plattform www.NachhaltigWirtschaften.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und Anwender:innen eine interessante Lektüre.

Inhaltsverzeichnis

1 Kurzfassung 8

2 Abstract 10

3 Ausgangslage 12

3.1. Klettverbindungen im Bauwesen 13

3.2. Daten (-prozesse) für eine Kreislaufwirtschaft im Bauwesen 17

3.2.1. Daten 17

3.2.2. RFID-Technologie 21

3.2.3. QR-Code 22

4 Projektinhalt 24

4.1. Literaturrecherche 25

4.2. Konzeptentwicklung 25

4.2.1. Anwendungssituationen 25

4.2.2. Verbindungssystem I und II 26

4.2.3. Bauteildatensystem I und II 26

4.3. Potentialabschätzung 27

4.4. Versuche 29

4.4.1. Verbindungssystem I 29

4.4.2. Verbindungssystem II 36

4.4.3. Bauteildatensystem I 42

5 Ergebnisse 45

5.1. Anwendungssituationen 46

5.1.1. Bautechnische Anforderungen 47

5.2. Klettverbindungssystem 55

5.2.1. Industrielle Klettkomponenten 55

5.2.2. Bauteile als Klettkomponenten 68

5.3. Bauteildatensystem 88

5.3.1. Digitale Ebene 88

5.3.2. Elektronische Ebene 97

5.3.3. Nutzungsszenarien 101

6 Schlussfolgerungen 108

6.1. Projekterkenntnisse 108

6.1.1. Verbindungssystem I 108

6.1.2. Verbindungssystems II 109

6.1.3. Bauteildatensystemen I und II 110

6.2. Relevante Zielgruppen und Weiterverwendungsmöglichkeiten 111

6.3. Rechtliche Herausforderungen 111

6.4. Verwertung und Verbreitung der Ergebnisse 111
7 Ausblick und Empfehlungen 113
8 Verzeichnisse 115

1 Kurzfassung

Der globale Beitrag des Bauwesens zum Klimawandel wird anhand des Endenergieverbrauchs (ca. 34 %)[1], der energiebedingten CO2-Emissionen (ca. 37 %)[2] und des Ressourcenverbrauchs (ca. 31 %)[3] ersichtlich. Mit konsequenter Kreislaufwirtschaft kann zur Reduktion dieser Kennzahlen, insbesondere des Ressourcenverbrauchs, beigetragen werden. Zwei wesentliche Kernelemente eines kreislauffähigen Bauens sind die „Rückbaubarkeit" sowie wesentliche „Informationen" über verbaute Elemente, ihre Beschaffenheit und Eigenschaften. Die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie aus dem Jahr 2022 stellt dementsprechend die Forderung an Gebäude nach Nutzungsflexibilität, modularer Bauweise, Trennbarkeit und Wiederverwendbarkeit von Bauteilen. Sowie der Erfassung der Materialdaten über den gesamten Lebenszyklus und deren Dokumentation in digitaler Form zur Stärkung der Wiederverwendungs-, Recycling- und Verwertungspraktiken.[4]

Das aktuelle Bauwesen beruht auf den Fügemethoden vergießen, verschweißen, verkleben, ausschäumen und abdichten,[5] während ein Management von Bauteildaten (Einbaudatum, stoffliche Zusammensetzung, Position, Demontagehinweise u.v.m.), mit einer Systematik, welche für die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft notwendig wäre, nicht existent ist.[6] Wodurch gegenwärtig vor allem Gebäude entstehen, welche nicht oder nur teilweise, und wenn dann nur unter hohem Aufwand, in eine Kreislaufwirtschaft eingefügt werden können.

Zur Lösung dieser Probleme schlägt das hier vorliegende Projekt die Etablierung einer „resilienten" Klettverbindung im Hochbau, zwischen kurzlebigen und langlebigen sowie in weiterer Folge materiell heterogenen Bauteilen vor. Diese Verbindung bietet auf physischer Ebene einen beschädigungsfreien Rückbau sowie technische und räumliche Flexibilität,[7] [8] und auf virtueller oder digitaler Ebene, durch die Einbindung gegenwertiger Speichertechnologien, ein fortlaufendes Bauteil-Datenmanagement. Projektziel ist in diesem Kontext ein Konzept des Klettverbindungssystems (in Abhängigkeit der Anwendungssituation) wie auch die Verifikation der Anwendbarkeit auf Komponentenebene. Hierzu erfolgte methodisch eine Literaturrecherche, Konzeptentwicklung und die experimentelle Untersuchung einzelner Systemkomponenten anhand von Laborversuchen. Jeweils auf bautechnischer, papiertechnischer, elektrotechnischer und digitaler Ebene.

Als Ergebnis wurden zwei Anwendungssituationen („Geschossdecke in Betonbauweise" und „Geschossdecke in Holzbauweise") definiert, die Potentiale der Klettverbindung in diesen Situationen erhoben sowie die bautechnischen Anforderungen (Lebensdauer, Lastübertragung) analysiert. Weiters wurden Konzepte eines Klettverbindungssystems entwickelt. Dies umfasst das Aufkleben industrieller Klettkomponenten auf herkömmliche Beton- oder Holzbauteile und die Herstellung von Klettkomponenten aus den Rohbaustoffen Beton und Holz, wie auch aus Papierwerkstoffen.

[1] United Nations Environment Programme 2023, 24.
[2] Ebd., 29.
[3] United Nations Environment Programme 2024, 34.
[4] Vgl. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und technologie 2022, 53–54.
[5] Vgl. Umweltbundesamt 2015, 74.
[6] Vgl. Raudaschl, Dengg, Juhart 2023, 2.
[7] Vgl. Krüger 2013.
[8] Vgl. Riewe et al. 2018.

Im Rahmen der Versuche mit industriellen Klettprodukten konnte ein duktiles Tragverhalten der Klettverbindung festgestellt werden. Die großen Verformungen die der Klett aufnehmen kann sind für bautechnische Anwendungen ideal, da dadurch ein Ankündigen des Versagens gewährleistet ist und in vielen Anwendungsfällen eine Lastumlagerung ermöglicht wird. Weiters konnte festgestellt werden, dass je nach Klettprodukt sowohl die Orientierung der beiden Klettkomponenten zueinander als auch die Temperatur einen Einfluss auf die Haftzugfestigkeit haben (können). Zudem wurde bestätigt, dass (größere) Exzentrizitäten der Lasteinleitung auf Grund der einseitigen Belastung zu einer Reduktion der Haftzugfestigkeit (bezogen auf die gesamte Klettfläche) führen.

Im Rahmen von Herstellungsversuchen konnten Beton- und Holz-Klettkomponenten mit runden und eckigen Pilzkopfelementen wie auch mit T-förmigen oder V-förmigen Nuten hergestellt werden. Wobei Kunststoff-Klettkomponenten, welche mittels 3D-Druck in unterschiedlicher Skalierung und Geometrie (X-Pilzköpfe und O-Pilzköpfe) hergestellt wurden, das Gegenstück bilden. Als Klettpapier konnte ein System entwickelt und hergestellt werden, welches gefaltete bzw. gebogenen Pilzköpfe umfasst, wie auch ein Gegenstück, bestehend aus Schlitzen die schmäler sind als die Dicke der Pilzköpfe. All diese im Projekt entwickelten Klettsysteme weisen Haftzugfestigkeiten auf, die mit handelsüblichen Klettprodukten vergleichbar sind.

Als Bauteildatensystem wurde auf digitaler Ebene eine Gebäudegliederung definiert und mit potentiell erforderlichen Metadaten hinterlegt, sowie in ein digitales Dashboard und eine elektronische Ebene übersetzt. Zudem erfolgte eine Anwendung anhand ausgewählter Nutzer*innen-Szenarien (Planung mit Reuse-Bauteilen, Wartung und Reparatur). Auf elektronischer Ebene wurde ein System entwickelt, bei welchem sich RFID-Chips und QR-Codes auf oder seitens der Architektur, in vordefinierten Elementen bzw. in Räumen befinden.

In Folgeprojekten sind das Verhalten der industriellen Klettverbindung unter klimatischen Wechselbeanspruchungen und die Einflüsse auf die Haftzugfestigkeit weiter zu untersuchen. Die im Projekt angewandten Verfahren zur Herstellung von Klettkomponenten aus Rohbaustoffen dienten der Überprüfung der Machbarkeit und weisen noch keine Optimierungen hinsichtlich Ablauf, Technologien oder ökologischer Aspekte auf. Dies ist in Folgeprojekten zu adressieren. Weiters besteht Forschungsbedarf zur Weiterentwicklung und Konkretisierung des Bauteildatensystems im Kontext unterschiedlicher Nutzer*innen und der Integration digitaler Bauteilinformationen in bestehende Planungsumgebungen. Wie auch zur Integration eindeutiger Identifikatoren (RFID-Chips, QR-Codes) und Basisdaten (langfristige Archivierung) in die Baukonstruktion.

2 Abstract

The global contribution of the construction industry to climate change becomes apparent on the basis of final energy consumption (approx. 34%)[9], energy-related CO2 emissions (approx. 37%)[10] and resource consumption (approx. 31%)[11]. A consistent circular economy can help to reduce these key figures, especially resource consumption. Two essential core elements of circular construction are "deconstructability" and essential "information" about the elements used, their composition and properties. Accordingly, the Austrian circular economy strategy from 2022 requires buildings to be flexible in terms of use, modular construction, separability and reusability of components. As well as the recording of material data over the entire life cycle and its documentation in digital form to strengthen reuse, recycling and recovery practices.[12]

The current construction industry is based on the joining methods of casting, welding, gluing, foaming and sealing,[13] while there is no management of component data (installation date, material composition, position, dismantling instructions, etc.) with a system that would be necessary for the establishment of a circular economy.[14] As a result, buildings are currently being created that cannot be integrated into a circular economy, or only partially, and then only at great expense.

To solve these problems, this project proposes the establishment of a "resilient" hook and loop connection in building construction, between short-lived and long-lived and subsequently materially heterogeneous components. This connection offers damage-free dismantling as well as technical and spatial flexibility on a physical level,[15] [16] and continuous component data management on a virtual or digital level through the integration of current storage technologies. In this context, the aim of the project is to develop a concept for the hook-and-loop connection system (depending on the application situation) and to verify its applicability at component level. For this purpose, literature research, concept development and the experimental investigation of individual system components were carried out methodically. In each case at the construction, paper technology, electrical engineering and digital levels.

As a result, two application situations ("floor slab in concrete construction" and "floor slab in timber construction") were defined, the potential of the hook-and-loop connection in these situations was determined and the constructional requirements (service life, load transfer) were analyzed. Furthermore, concepts for a hook and loop connection system were developed. To this end, literature research, concept development and the experimental investigation of individual system components were carried out using laboratory tests. In each case on a structural, paper technology, electrotechnical and digital level.

During the tests with industrial hook and loop products, a ductile load-bearing behavior of the hook and loop connection was determined. The large deformations that hook and loop can absorb are

[9] United Nations Environment Programme 2023, 24.
[10] Ebd., 29.
[11] United Nations Environment Programme 2024, 34.
[12] Vgl. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und technologie 2022, 53–54.
[13] Vgl. Umweltbundesamt 2015, 74.
[14] Vgl. Raudaschl, Dengg, Juhart 2023, 2.
[15] Vgl. Krüger 2013.
[16] Vgl. Riewe et al. 2018.

ideal for structural applications, as this ensures that failure is announced and load redistribution is possible in many applications. It was also found that, depending on the hook and loop product, both the orientation of the two hook and loop components in relation to each other and the temperature (can) have an influence on the adhesive tensile strength. It was also confirmed that (larger) eccentricities of the load application lead to a reduction in the adhesive tensile strength (in relation to the entire hook and loop surface) due to the one-sided load.

As part of manufacturing tests, concrete and wooden hook and loop components with round and square mushroom head elements as well as with T-shaped or V-shaped grooves were produced. Plastic hook and loop components, which were produced using 3D printing in different scales and geometries (X-mushroom heads and O-mushroom heads), form the counterpart. A hook and loop paper system was developed and produced that includes folded or curved mushroom heads, as well as a counterpart consisting of slots that are narrower than the thickness of the mushroom heads. All of these hook and loop systems developed in the project have adhesive tensile strengths that are comparable with commercially available hook and loop products.

As a building component data system, a building structure was defined on a digital level and provided with potentially required metadata, as well as translated into a digital dashboard and an electronic level. In addition, the system was applied using selected user scenarios (planning with reuse components, maintenance and repair). At the electronic level, a system was developed in which RFID chips and QR codes are located on or on the side of the architecture, in predefined elements or in rooms.

In follow-up projects, the behavior of the industrial hook-and-loop connection under alternating climatic stresses and the influences on the adhesive tensile strength are to be investigated further. The processes used in the project to produce hook and loop components from raw building materials were used to test feasibility and have not yet been optimized in terms of process, technology or ecological aspects. This needs to be addressed in follow-up projects. There is also a need for research into the further development and specification of the component data system in the context of different users and the integration of digital component information into existing planning environments. As well as the integration of unique identifiers (RFID chips, QR codes) and basic data (long-term archiving) into the building construction.

3 Ausgangslage

Der globale Beitrag des Bauwesens zum Klimawandel wird anhand des Endenergieverbrauchs (ca. 34 %)[17], der energiebedingten CO2-Emissionen (ca. 37 %)[18] und des Ressourcenverbrauchs (ca. 31 %)[19] ersichtlich. Mit konsequenter Kreislaufwirtschaft kann zur Reduktion dieser Kennzahlen, insbesondere des Ressourcenverbrauchs, beitragen werden. Zum Beispiel indem Einzelbauteile, Baukomponenten und Einzelteile wiederverwendet, sowie Gebäude an neue klimatische Bedingungen oder Funktions- und Nutzungswechsel angepasst werden. Zwei wesentliche Kernelemente eines kreislauffähigen Bauens sind die „Rückbaubarkeit“ sowie wesentliche „Informationen“ über verbaute Elemente, ihre Beschaffenheit und Eigenschaften. Die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie aus dem Jahr 2022 stellt dementsprechend die Forderung an Gebäude nach Nutzungsflexibilität, modularer Bauweise, Trennbarkeit und Wiederverwendbarkeit von Bauteilen. Sowie der Erfassung der Materialdaten über den gesamten Lebenszyklus und deren Dokumentation in digitaler Form zur Stärkung der Wiederverwendungs-, Recycling- und Verwertungspraktiken.[20]

Das aktuelle Bauwesen beruht auf den Fügemethoden vergießen, verschweißen, verkleben, ausschäumen und abdichten,[21] wie auch auf mechanischen, stiftförmigen Verbindungsmitteln. Auch wenn stiftförmige Verbindungsmittel (Nägel, Schrauben) eine vielseitige Anwendbarkeit und einfache Montage ermöglichen, erfordern sie das Bohren oder „Verletzen“ der Fügeteile. Diese werden dadurch teilweise geschwächt oder zerstört.[22] Auch ermöglicht eine Schraubverbindung nicht automatisch einen Rückbau, da eine zu hohe Eindringtiefe, in Kombination mit klimatischen Wechselzyklen, ein Lösen der Schraube verhindern kann.[23] Kleben hingegen bietet eine Verbindung ohne Einfluss auf die Eigenschaften oder Verletzung der Fügeteile, [24] bedeutet jedoch (bei häufiger Anwendung) einen hohen Aufwand (saubere Fügestellen, Aushärtezeiten) und ist „im Allgemeinen nur durch Schädigung oder Zerstörung der Fügeteile lösbar“.[25] Wodurch gegenwärtig vor allem Gebäude entstehen, welche nicht oder nur teilweise, und wenn dann nur unter hohem Aufwand, komponenten- oder baustoffrein rückgebaut oder angepasst werden können.

Informationen oder Daten mit Bezug zum Bauwesen werden derzeit z.B. in der Planung durch Building Information Modeling (Abbildung von Bauteil- / Gebäudedaten) oder Sensoren (Klima- oder Nutzungsdaten) erhoben und sollen zukünftig, als Erweiterung mittels „Material Pass-Ports“[26] oder Gebäudelogbücher[27] gespeichert werden. Ein Management von „Bauteildaten“ (Einbaudatum,

[17] United Nations Environment Programme 2023, 24.
[18] Ebd., 29.
[19] United Nations Environment Programme 2024, 34.
[20] Vgl. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und technologie 2022, 53–54.
[21] Vgl. Umweltbundesamt 2015, 74.
[22] Vgl. Brune, Kai, Stefan Dieckhoff, Holger Fricke, Andreas Groß, Katharina Haag, Andreas Hartwig, Welchy Leite Cavalcanti, Bernd Mayer, Michael Noeske, and Ralph Wilken 2020, 26–27.
[23] Vgl. Schuster, Geier 2023, 66.
[24] Vgl. Brune, Kai, Stefan Dieckhoff, Holger Fricke, Andreas Groß, Katharina Haag, Andreas Hartwig, Welchy Leite Cavalcanti, Bernd Mayer, Michael Noeske, and Ralph Wilken 2020, 26–27.
[25] Schwede, Störl 2016, 3.
[26] Vgl. Heinrich, Lang 2019.
[27] Vgl. Dourlens-Quaranta et al. 2021.

stoffliche Zusammensetzung, Position, Demontagehinweise u.v.m.), mit einer Systematik, welche für die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft notwendig wäre, ist jedoch noch nicht existent.[28]

Zur Lösung dieser Probleme schlägt das hier vorliegende Projekt die Etablierung einer „resilienten" Klettverbindung im Hochbau, zwischen kurzlebigen und langlebigen sowie in weiterer Folge materiell heterogenen Bauteilen vor. Diese Verbindung bietet auf physischer Ebene einen beschädigungsfreien Rückbau sowie technische und räumliche Flexibilität,[29] [30] und auf virtueller oder digitaler Ebene, durch die Einbindung gegenwertiger Speichertechnologien, ein fortlaufendes Bauteil-Datenmanagement. Projektziel ist in diesem Kontext ein Konzept des Klettverbindungssystems (zwischen Primär- (Tragkonstruktion/Rohbau), Sekundär- (Ausbau) wie auch Tertiärstruktur (Technische Gebäudeausrüstung) in Abhängigkeit der Anwendungssituation) wie auch die Verifikation der Anwendbarkeit auf Komponentenebene.

In diesem Kontext wird nachfolgend der projektrelevante Stand der Technik anhand der Kapitel „Klettverbindungen im Bauwesen" und „Daten- und Ausleseprozesse im Bauwesen" dargestellt.

3.1. Klettverbindungen im Bauwesen

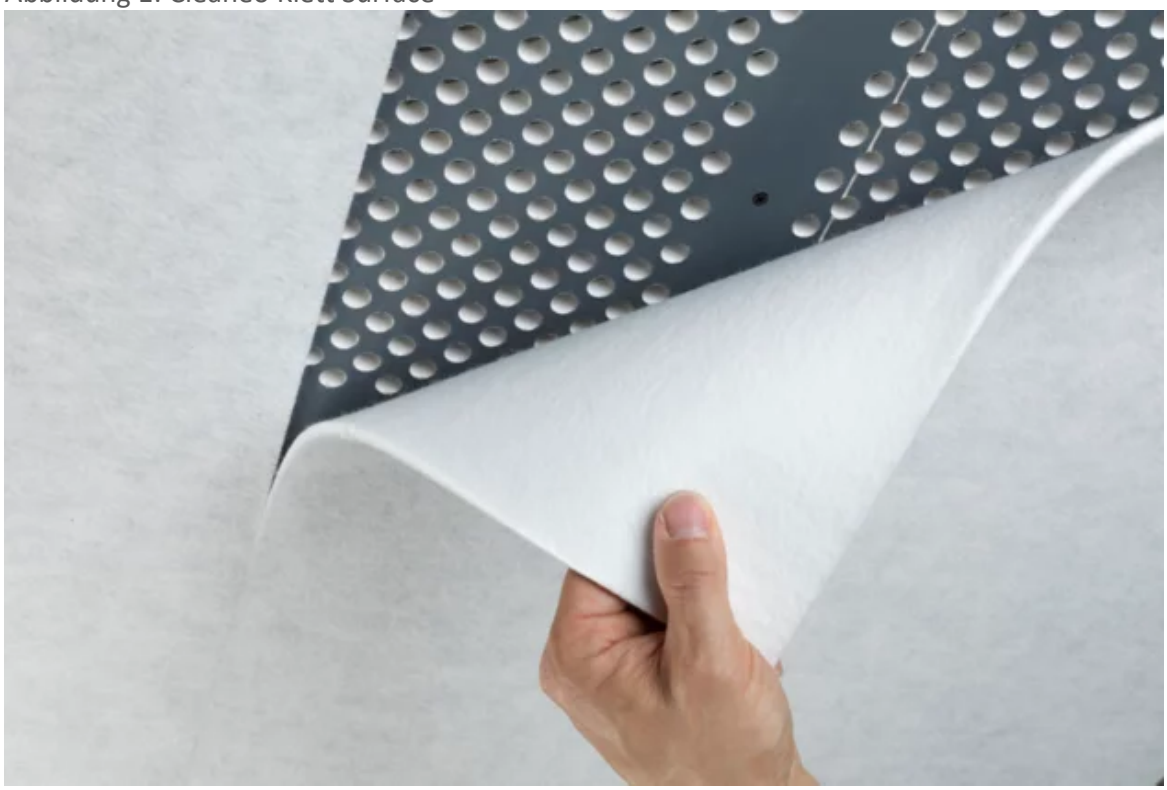
Die Klettverbindung ist aus der Verpackungs-, Textil-, Automobil- und der Flugzeugbranche nicht mehr wegzudenken und kommt zudem in der Raumfahrt und der Formel 1 zum Einsatz. Im Bauwesen besitzt sie gegenüber herkömmlichen Fügemethoden und je nach Bauphase großes Potential für resiliente Sanierungen und Neubauten. Dies umfasst (bei breiter Anwendung) in der Ausführungsphase eine einfache, schnelle und flexible Montage unterschiedlichster Gebäudekomponenten,[31] keine Beschädigung von Bauteilen durch Stemm-, Schlitz- oder Bohrarbeiten, die einfache Durchführung kurzfristiger Änderungen, eine Steigerung der Attraktivität des Lehrberufs (geringere Gesundheitsbelastung durch Schmutz und Staub), [32] eine sofort erfolgende Verbindung ohne z.B. Aushärtungszeit und eine Kostenersparnis durch Zeitgewinn.[33] Während dem Betrieb und der Nutzung eines Gebäudes besteht, durch die wiederholbare Verbindung ohne (wesentliche) Einbußen der Kraftübertragung an derselben Position,[34] die Möglichkeit der (einfachen) Anpassung an funktionale, modische, baurechtliche, ökologische, ökonomische oder technische Änderungen. Beim Rückbau wird eine einfache und beschädigungsfreie Demontage, sortenreine Trennung und damit eine Rückführung in eine Kreislaufwirtschaft ermöglicht.[35]

Als Bauprodukte am Markt welche die Klettverbindung als temporäre Montagehilfe nutzen ist beispielsweise die Dachabdichtungsbahn „Rhepanol HFK" von *FDT FlachdachTechnologie GmbH* & Co. KG[36] und das Fußbodenheizsystem „Klett Nassbausystem" von *Uponor*[37] zu nennen. Darüber hinaus sind mittlerweile Bauprodukte in Entwicklung, bei welchen Klett die primäre Verbindung darstellt. So bietet das Unternehmen *Knauf Gips KG* mit „Cleaneo Klett Surface" ein Akustik-

[28] Vgl. Raudaschl, Dengg, Juhart 2023, 2.
[29] Vgl. Krüger 2013.
[30] Vgl. Riewe et al. 2018.
[31] Vgl. Krüger 2013.
[32] Vgl. Riewe et al. 2018.
[33] Vgl. Krüger 2013.
[34] Vgl. Ebd.
[35] Vgl. Riewe et al. 2018.
[36] Vgl. FDT FlachdachTechnologie GmbH & Co. KG.
[37] Vgl. Uponor.

Deckenelement an, welches nur mittels Klettverbindung befestigt wird (siehe Abbildung 1).[38] Das sich in Entwicklung befindende Produkt „RigiMove“ von *SAINT-GOBAIN RIGIPS GmbH* stellt eine wiederverwendbare Trockenbauwand dar. Hierzu werden die Gipskartonplatten an einem Ende miteinander mittels Nut- und Federsystem (Formschluss) verbunden und am anderen Ende mittels Klettverbindung an den Metallprofilen befestigt (siehe Abbildung 2).[39] Dieses Wandsystem betont das hohe Potential der Klettverbindung für eine rückbaufähige Konstruktion und somit ein kreislauffähiges Bauen.

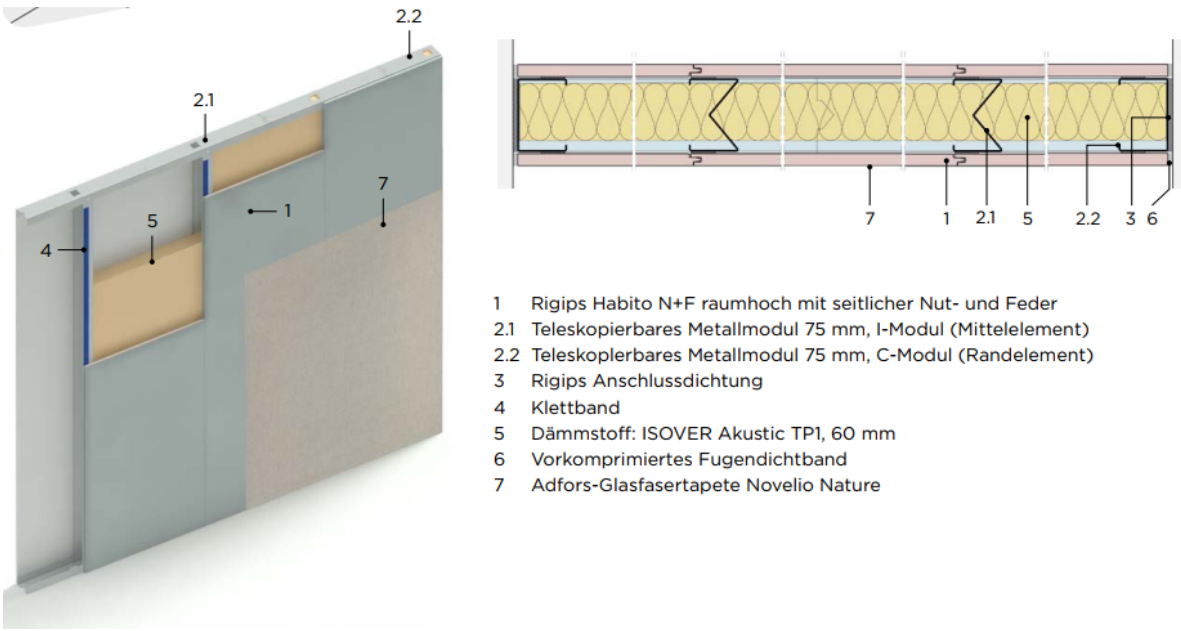
Abbildung 1: Cleaneo Klett Surface[40]



[38] Vgl. Knauf Digital GmbH.
[39] Vgl. SAINT-GOBAIN RIGIPS GmbH 2024.
[40] Knauf Digital GmbH.

Abbildung 2: RigiMove; 1 Rigips Habito N+F raumhoch mit seitlicher Nut- und Feder; 2.1 Teleskopierbares Metallmodul 75 mm, I-Modul (Mittelelement); 2.2 Teleskopierbares Metallmodul 75 mm, C-Modul (Randelement); 3 Rigips Anschlussdichtung; 4 Klettband; 5 Dämmstoff: ISOVER Akustic TP1, 60 mm; 6 Vorkomprimiertes Fugendichtband; 7 Adfors-Glasfasertapete Novelio Nature[41]

<



Neben diesen Produkten bestehen Patente zur Anwendung der Klettverbindung im Bauwesen. Wie beispielsweise eine „Klettmembran“ an Dächern, Wänden und Decken[42], eine Klett-Befestigung von Trennwänden[43] oder ein Wärmedämmverbund-Fassadensystem.[44]

Im Bereich der Forschung behandelte das Vorgängerprojekt „Klett-TGA“ (FFG-PN 861664) die Anwendung der Klettverbindung zwischen Beton-, Holz- oder Ziegelelementen und Elementen des Ausbaus oder der technischen Gebäudeausstattung. Wobei der Fokus auf der Verbindung von Klettkomponenten mit Rohbauteilen lag (siehe Abbildung 3 und Abbildung 4). Als Projektergebnis konnte das Aufkleben industrieller Klettprodukte als zielführend für den Neubau und die Sanierung festgestellt werden, da Kleben eine bekannte Technologie im Bauwesen darstellt und eine Anwendung bei jedem Rohbauuntergrund ermöglicht.[45]

[41] SAINT-GOBAIN RIGIPS GmbH 2024.
[42] Vgl. Tachauer E., Provencher R., Banker S., Provost G.
[43] Vgl. ROEHSE-HOLDING-GMBH.
[44] Vgl. Walter Wiedenbauer, Ewald Rauter, Andreas Weier, Ferdinand Oswald, Tim Lüking, Katharina Maria Hengel, Katharina Volgger, Patrick Colin, Alan Reynolds, Michael Martinelli, Roger Riewe.
[45] Vgl. Riewe et al. 2018, 39.

Abbildung 3: Klett-TGA - Kleben auf Ziegel[46]

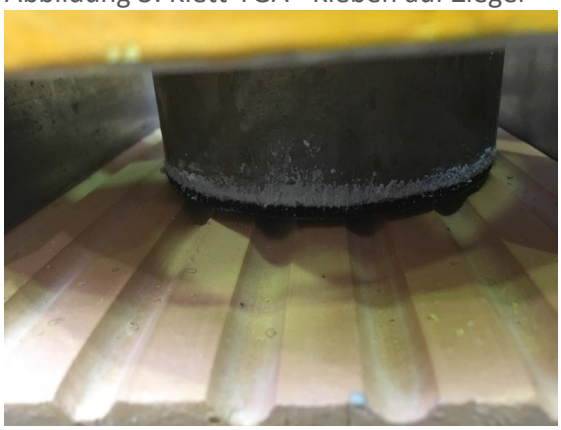
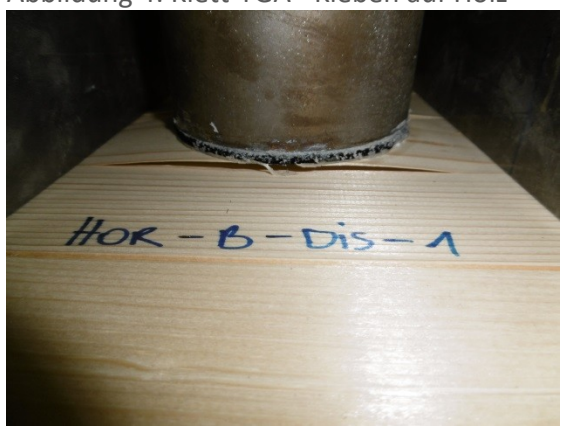
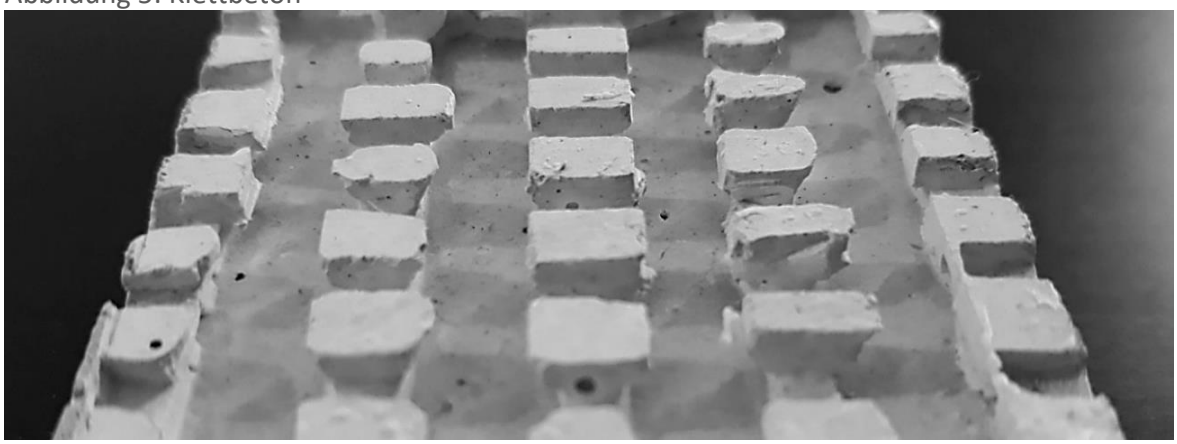


Abbildung 4: Klett-TGA - Kleben auf Holz[47]



Ein weiteres Vorprojekt betrifft die Dissertation des Projektmitglieds Matthias Lang-Raudaschl. In welcher er die grundsätzliche Machbarkeit der Herstellung einer „klettfähigen“ Fläche aus dem Rohbaustoff Beton nachweisen konnte. Materialhomogene Bauteile der Primärstruktur können dadurch dauerhaft als direkt verbindungsfähiger Montageuntergrund dienen. Die Herstellung des „Klettbetons“ (siehe Abbildung 5) erfolgte in der Dissertation mit Wachsschalungen, welche nach der Aushärtung des Betons mit heißem Wasser geschmolzen und von Beton gelöst wurden.[48]

Abbildung 5: Klettbeton[49]



[46] Riewe et al. 2018, 39.
[47] Ebd., 39.
[48] Vgl. Raudaschl 2020.
[49] Ebd., 87.

3.2. Daten (-prozesse) für eine Kreislaufwirtschaft im Bauwesen

Die Europäische Kommission stellt in ihrem Aktionsplan für Kreislaufwirtschaft fest, dass der Bausektor für etwa 50 % der gesamten Rohstoffgewinnung und 35 % des gesamten Abfallaufkommens verantwortlich ist.[50] Trotz der somit hohen Relevanz zirkulärer Konzepte in der Bauwirtschaft besteht eine fehlende Standardisierung und unzureichende Datenverfügbarkeit.[51] Dies ist insofern zu betonen, da eine durchgängige Digitalisierung und Vereinheitlichung der Datenformate entscheidende Faktoren sind, um eine umfassende Nachverfolgbarkeit und effiziente Wiederverwendung zu gewährleisten.[52] Weiters sind Schlüsselindikatoren zur Messung der Umsetzung zirkulärer Ansätze (wie der Anteil wiederverwendeter oder recycelter Materialien) von wesentlicher Bedeutung.[53]

Dies umfasst eine virtuelle Ebene aber auch die physische Verknüpfung mit dem gebauten Objekt, damit auch dessen Anwendungskontext und Nutzungs- bzw. Abnutzungseigenschaften ermittelt werden können. Was im Projekt anhand der Themen „Daten“, „RFID-Technologie“ und „QR-Codes“ behandelt wurde, wozu nachfolgend der Stand der Technik dargestellt ist.

3.2.1. Daten

Es gibt eine Vielzahl an Ansätzen, welche sich mit der Art und dem Austausch von Daten im Kontext einer Kreislaufwirtschaft befassen. Beispielsweise werden durch die europäische Kommission digitale Gebäudelogbücher angestrebt, welche eine zentrale Erfassung aller relevanten Gebäudedaten ermöglichen. Was eine präzise Dokumentation des Bauprozesses sicherstellen kann. Definiert werden diese Gebäudelogbücher über einen gemeinsamen Speicher, der den Austausch zwischen u.a. möglichen Bauausführenden, Gebäudeeigentümer*innen und -nutzer*innen, Finanzinstitutionen und öffentlichen Behörden erleichtert.[54] [55] In Gebäudelogbücher können Materialpässe integriert werden. Diese Pässe ermöglichen es, in Form eines digitalen Datensatzes, Informationen über bestimmte Baustoffe, Bauteile und Produkte zu sichern. Um Informationslücken zu schließen und den Austausch zwischen den oben erwähnten Akteuren der Bauindustrie zu ermöglichen.[56] Inhaltlich können diese Materialpässe oder auch „Digital-Product-Passports“ detaillierte Daten hinsichtlich der verwendeten Materialien, der Lieferketten (Quelle bis zu den Herstellern), der Händler, Verbraucher, wie auch technische Aspekte hinsichtlich der Wiederverwendung oder des Recyclings umfassen.[57]

In diesem Kontext ist auf die Bauprodukteverordnung 2024/3110 „zur Festlegung harmonisierter Vorschriften für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 305/2011“ hinzuweisen. Diese Verordnung umfasst das Kapitel „Digitaler Produktpass“, in welchem darauf verwiesen wird, dass ein Produktpasssystem eingerichtet werden soll, bei dem die Anforderung der Interoperabilität zum Produktpass der „Ökodesign-Verordnung“ (2024/1781) wie auch zu BIM und der Bauwerksmodellierung besteht.[58]

[50] Vgl. Europäische Kommission 2020, 12.
[51] Vgl. Schönfelder et al. 2025 21.
[52] Vgl. Sigalov, König 2017 33.
[53] Vgl. Pomponi, Moncaster 2017 143.
[54] Vgl. Dourlens-Quaranta et al. 2021, 28.
[55] Vgl. BAMB 05-2017, 5–6.
[56] Vgl. Heinrich, Lang 2019, 2–3.
[57] Vgl. Hoosain et al. 2021.
[58] Vgl. Europäisches Parlament, Rat der europäischen Union 2024, 64–65.

Ein solcher digitaler Produktpass beinhaltet z.B. die nachfolgenden Informationen:[59]

- Kenncode des Produkttyps
- Produktkategorie gemäß harmonisierten technischen Spezifikationen oder Europäischen Bewertungsdokumenten
- Verwendungszwecke
- Nennabmessungen
- gegebenenfalls wesentliche Bestandteile des Produkts;
- geschätzte durchschnittliche und minimale Nutzungsdauer
- in Fällen, in denen das Produkt bereits in einem Bauwerk installiert wurde, Datum und Ort der letzten Demontage.
- Hersteller (Name, Postanschrift, Telefon
- ökologische Nachhaltigkeit
- Empfehlungen für die Reparatur, Demontage, Wiederverwendung, Wiederaufbereitung, Recycling und eine sichere Lagerung

Als Materialpassports welche sich bereits in Anwendung befinden ist *Madaster* („Das Kataster für Materialien")[60] hervorzuheben. Durch eine digitale Plattform, welches dieses Unternehmen anbietet, wird eine umfassende Dokumentation der gebauten Umwelt ermöglicht, die für Privatpersonen, Unternehmen, Regierungen und die wissenschaftliche Gemeinschaft zugänglich sein kann.[61] Hierzu werden Materialpässe generiert, die auf einer Quelldatei basieren, welche detaillierte Informationen über das Gebäude oder spezifische Gebäudeteile enthält.[62] Wobei zwei Hauptquellformate zur Datenverarbeitung unterstützt werden. IFC-Dateien, die auf einem BIM-Modell basieren, und eine Excel-Datei anhand einer Vorlage, die genutzt werden kann, wenn kein BIM-Modell verfügbar ist. Während bei einer Verwendung von BIM alle Bezeichnungen der Materialien, geometrischen Daten und Mengen direkt aus dem IFC-Modell importiert werden, müssen in der Excel-Vorlage die Materialien und ihre relevanten Informationen manuell erfasst werden.[63] Als Daten sind u.a. nachfolgende Teil des Materialpasses: [64]

- GTIN (Global Trade Item Number)
- Artikelnummer: optionale Angabe, Artikelnummer des Herstellers, eventuell mit GLN („Global Location Number") verkettet;
- Madaster ID: optionale Angabe
- Externe Datenbank-ID: optionale Angabe, die Kennung des Produkts in einer externen Datenbank, die von Madaster unterstützt wird
- Beschreibung: optionale Angabe, Beschreibung/Typennamen für das Element;
- Material/Produkt: Material- oder Produktname
- Klassifizierungscode: Zahlencode gemäß Klassifizierung (in Österreich ÖNORM B 1801-1, 2022)
- Etage: Die Etage, auf dem sich das Material/Produkt befindet;
- Volumen (m^3)

[59] Europäisches Parlament, Rat der europäischen Union 2024, 82.
[60] Madaster Germany GmbH.
[61] Madaster Germany GmbH 12.01.2024, 4.
[62] Madaster Austria GmbH 04.03.2024, 6.
[63] Madaster Germany GmbH 12.01.2024, 5.
[64] Madaster Austria GmbH.

- Fläche (m^2)
- Länge (m)
- Anzahl: Menge, gilt nur bei Produkten
- Demontierbarkeit nach van Vliet (Art der Verbindung, Zugänglichkeit der Verbindung, Überschneidungen, Produktkante)[65]

Weiters ist der im Jänner 2025 publizierte Gebäuderessourcenpass 1.2.1 der *DGNB GmbH* (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen) hervorzuheben. Dieser Pass, welcher auf einer Excel-Vorlage basiert, stellt eine sehr umfassende Darstellung von kreislaufwirtschaftsrelevanten Daten dar. Die DGNB schreibt hierzu: [66]

> „Der Gebäuderessourcenpass stellt als Transparenz-Instrument alle wesentlichen Informationen über verbaute Materialien und Komponenten sowie ihrer Werte in aggregierter Form zusammen. Damit können verbaute Ressourcen für ein "Urban Mining" nutzbar gemacht werden, ressourcenschonender Umbau und Sanierung unterstützt werden oder für eine Rückführung der Ressourcen in die Kreislaufwirtschaft nach der Nutzung von Gebäuden ermöglicht werden. Er schafft damit die Grundlage für eine konsistente Kreislaufwirtschaft im Bau- und Immobiliensektor, in der frühe und späte Lebenszyklusphasen (Design & Recycling) optimal miteinander koordiniert und verzahnt sind. Zudem kann er als Optimierungstool zur Ressourcenschonung und als Grundlage für Zirkularitätsbewertungen verwendet werden.“

Es werden z.B. folgende Informationen abgefragt und gespeichert:[67]

- 1 - Gebäudeinformationen und Gebäudemassen
  - Standort
  - Baujahr (Fertigstellung)
  - Bauweise
  - Kategorie / Nutzungsart
  - BGF / NRF
  - Gesamtvolumen des Gebäudes
  - Umfang dokumentierter Massen
  - Datenebene / Datenbasis
  - Bauteil-Einbauort zuordenbar
  - Bauteilbezog. Auswertung möglich
- 2 - Materialität, Materialherkunft, Schad- und Risikostoffe sowie Bau- und Abbruchabfälle
  - Holz und Holzwerkstoffe
  - Kunststoffe
  - Gips
  - Glas
  - Mineralische Baustoffe
  - Monetärer Materialwert [€]
  - Schadstoffgutachten Bestand
  - Vermieden

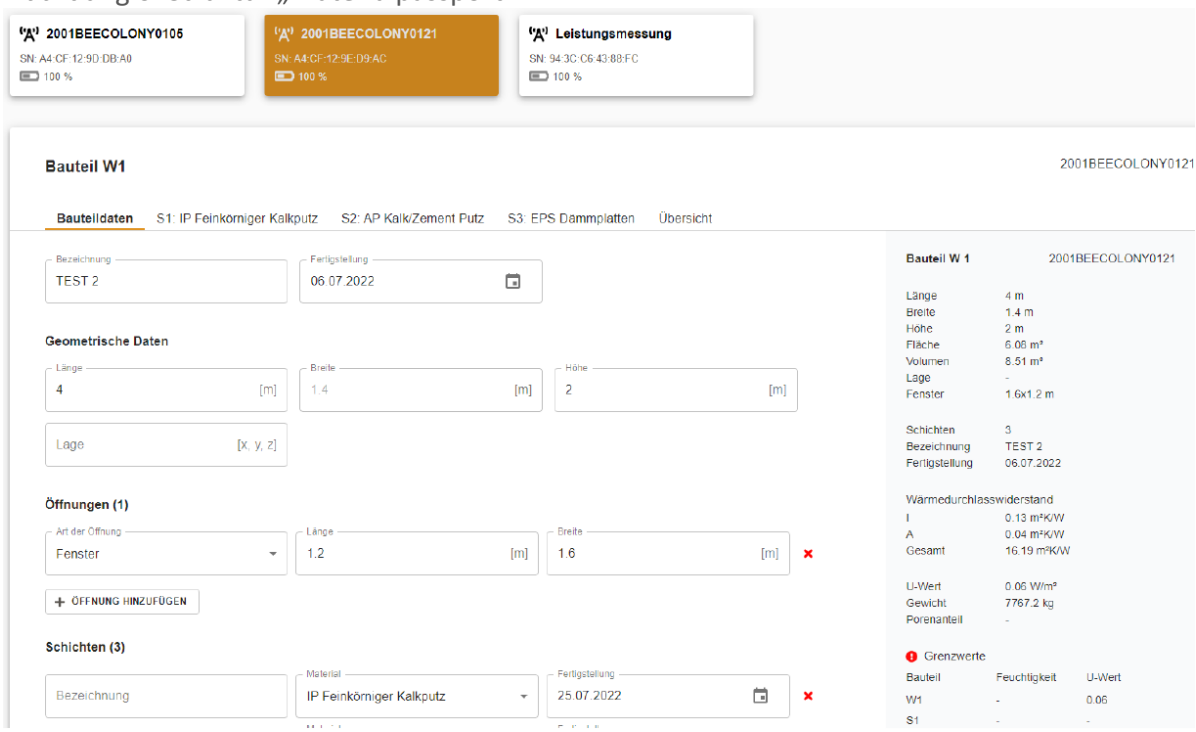
[65] Van Vliet, van Grinsven, Teunizen Mai, 2021.
[66] DGNB GmbH 2025, 1.
[67] Ebd., 5.

    - Wiederverwendet
    - Weiterverwendet
    - Wiederverwertet
    - Weiterverwertet
- 3 - Umweltwirkungen über den Lebenszyklus
    - THG-Emissionen (GWP-total)
    - Primärenergiebedarf (PEne)
- 4 - Flexibilität und Anpassungsfähigkeit der Gebäudestruktur
    - Mehrfachnutzung Flächen
    - Umnutzungsfähigkeit
    - Austauschmasse (Lebenszyklus)
    - Flächennutzungsgrad
- 5 - Demontagefähigkeit, Trennbarkeit, Materialverwertungspotenzial und Zirkularitätsbewertung
    - Qualitative Einstufung Bauwerk
    - Qualitative Einstufung nach Strukturebene / Bauwerkschicht
    - Rückbau-, Demontage-, Trennbarkeitskonzept
    - Zirkularitätsindex
- 6 - Dokumentation

Wie anhand dieser Beispiele (Bauprodukteverordnung 2024, *Madaster*, Gebäuderessourcenpass 1.2.1 der *DGNB GmbH)* sichtbar wird, besteht aktuell kein eindeutiger Standard, welche Informationen in welchem Format ein Gebäude- oder Materialpass enthalten soll oder muss. Auch besteht kein Standard zu einer Gebäudegliederung, somit über welche Bauteile oder Einzelteile Informationen vorhanden sein sollen.

In diesem Kontext ist das Vorgängerprojekt „Piezo-Klett“ (FFG-Nr. 879459) zu nennen, in welchem u.a. eine Grundlage für eine Gliederung von Bauteil-Daten entwickelt wurde (siehe Abbildung 6), auf welcher im Projekt „ReCon“ aufgebaut wurde.

Abbildung 6: Struktur „Materialpassport“[68]



3.2.2. RFID-Technologie

Die RFID-Technologie wurde gewählt, da diese vorerst auch ohne die oben erwähnte Standardisierung eine effiziente Verfolgung und Dokumentation der Materialflüsse ermöglicht.[69] Demnach würde eine Kombination digitaler Archive wie „Digital-Product-Passports“ mit RIFD eine vollständige Lebenszyklustransparenz ermöglichen.[70] Wodurch eine enge Verzahnung beider Bereiche (virtueller und physischer) die Chance bietet, den Prozess von Bauteilen transparent zu gestalten, von der Planung über den Einbau bis hin zur Wiederverwendung. Dies umfasst Lesegeräte wie auch Speichermedien in Form von „Tags“ (RFID-Chips).

Als RFID-Lesegerät ist ein mobiles Gerät vorteilhaft, welches bei der Nutzung im Gebäude mitgeführt wird. Das Gerät erlaubt nicht nur das Auslesen, sondern auch das Beschreiben von RFID-Tags, was eine hohe Flexibilität in der Anwendung bietet. Die Anforderungen an solche Lesegeräte bestehen in folgenden Punkten:

- **Frequenz**: Das Gerät operiert auf einer Frequenz von 13,56 MHz. Diese Frequenz gehört zur HF-Kategorie (High Frequency) und ist weit verbreitet, da sie sich gut für Nahbereichsanwendungen eignet.
- **Spannungsversorgung**: Die im Rahmen von ReCon eingesetzten RFID-Lesegeräte werden primär mobil betrieben und sind akkubetrieben. Sollte jedoch ein stationärer Betrieb einzelner Lesegeräte erforderlich sein (z. B. bei einer späteren Systemerweiterung), wäre eine standardisierte Versorgung mit DC 5 V oder DC 12 V vorgesehen.

[68] Raudaschl et al. 2023, 72.
[69] Vgl. Vahidi et al. 2024 442.
[70] Vgl. Sigalov, König 2017 33.

- **Schutzklasse**: Für stationäre RFID-Lesegeräte wird mindestens Schutzklasse II (Schutzisolierung) empfohlen, um einen erhöhten Schutz gegen elektrische Schläge sicherzustellen – insbesondere, da RFID-Lesegeräte oft in nicht dauerhaft überwachten Bereichen (z. B. Technikräume, Wartungsschächte) installiert werden. Im mobilen Betrieb (z. B. Handscanner) richtet sich die Schutzklasse nach dem verwendeten Ladegerät, welches üblicherweise ebenfalls Schutzklasse II erfüllen muss.
- **EMV-Schutz (Elektromagnetische Verträglichkeit)**: RFID-Lesegeräte, die im Frequenzbereich von 13,56 MHz (HF) arbeiten, müssen grundlegende EMV-Anforderungen erfüllen. Dazu zählen:
    - Störsicherheit: Die Geräte müssen gegenüber externen elektromagnetischen Störquellen (z. B. Motoren, Frequenzumrichter in Gebäuden) resistent sein, um eine stabile Lesefunktion zu gewährleisten.
    - Störaussendung: Die Geräte müssen so konstruiert sein, dass sie selbst nur zulässige elektromagnetische Emissionen verursachen. Die Einhaltung der Normen EN 301 489-3 (EMV-Anforderungen für Funkgeräte) und EN 55032 (Grenzwerte für Störaussendungen von Multimediageräten) ist empfohlen.
    - Leitungsgebundene Störungen: Falls eine stationäre Anbindung an das Stromnetz erfolgt, müssen Netzfilter eingesetzt werden, um Störungen sowohl in das Gerät hinein als auch aus dem Gerät heraus zu reduzieren.

RFID-Lesegeräte kommunizieren mit RFID-Tags welche den gleichen MHz Bereich aufweisen müssen. Die meisten Tags können nur mit 4 – 6 Bytes (IDs) beschrieben werden. Handelsübliche Speichergrößen liegen zwischen 4 und 8 kB. 8 kB Speicher entspricht ca. 4 Schreibmaschinenseiten, bestehenden aus 30 Zeilen à 60 Zeichen. Darüber hinaus bestehen Tags wie die MIFARE® 4K NFC-Karte, welche einen Speicher von 4 Kilobyte (4.096 Bytes) besitzt. Das bedeutet, dass auf dieser Karte theoretisch etwa 4.000 Zeichen gespeichert werden können.

3.2.3. QR-Code

QR-Codes (Quick Response Codes) sind grundsätzlich robust und langlebig und können, in Abhängigkeit der gewünschten Größe, eine hohe Menge, bis zu 3kB,[71] an Informationen speichern. Im Vergleich zu Barcodes weisen sie eine deutlich höhere Speicherkapazität auf. Zudem können QR-Codes neben Zahlen, Buchstaben und Sonderzeichen auch Binärdaten speichern und sind aus verschiedenen Winkeln, größeren Distanzen und bei teilweiser Beschädigung noch lesbar. Diese Eigenschaften machen sie für die langfristige Speicherung von Daten, beispielsweise auf Dokumenten oder Informationstafeln attraktiv.[72] Neben statischen QR-Codes bestehen dynamische QR-Codes welche es ermöglichen, dass die (verlinkten) Daten aktualisiert werden, ohne dabei den QR-Code zu ändern.[73]

Für eine möglichst hohe Lebensdauer können QR-Codes beispielsweise in Metall gestanzt oder in dauerhaftes Material eingefräst werden. Auch wird die Möglichkeiten erforscht, QR-Codes auf Wolframplatten zu ätzen. Diese Platten sind mit Siliciumnitrid beschichtet und überstehen auch

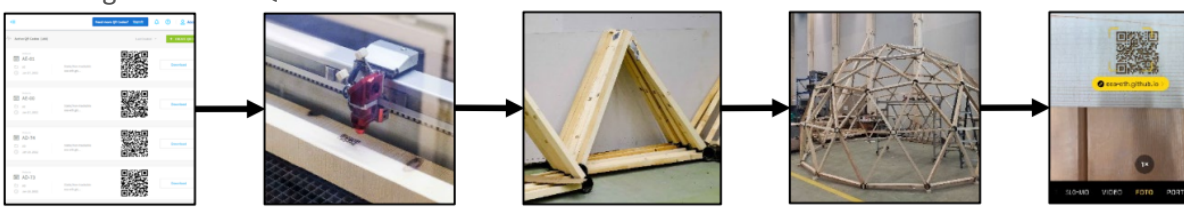
[71] Vgl. DENSO WAVE INCORPORATED.
[72] Vgl. Beckmann 2023.
[73] Vgl. QR Planet GmbH 2022.

Einflüsse wie extreme Hitze.[74] Im Kontext der Langlebigkeit stellt die physische Manipulation eine Herausforderung dar. Durch Überkleben oder z.B. den Austausch von QR-Codes (mit z.B. Weiterleitung auf Phishing-Seiten oder schädliche Inhalte). QR-Codes sind somit an verdeckten oder geschützten Stellen anzubringen oder regelmäßig zu kontrollieren. [75]

Die Anwendung von QR-Codes im Bauwesen betrifft aktuell bspw. Informationen zur Bedienung von Werkzeugen, zu Material und über die Montage. Weiters werden QR-Codes auf Helmen von Arbeitern verwendet, um auf Informationen zur Person zuzugreifen.[76]

Ergänzend diskutiert das Paper „Using engraved QR codes to connect building components to materials passports for circular construction“ den Ansatz, QR-Codes in Holzflächen mittels Laser einzugravieren. Die QR-Codes sollen dazu dienen, Bauteile über ihren Lebenszyklus nachzuverfolgen und einen Link zu Materialpässen herzustellen. Der hierzu entwickelte Prozess, welcher die Erstellung des QR-Codes, die Lasergravur, die Montage und die Nutzung vor Ort (Zugriff auf den Materialpass) zeigt, ist nachfolgend in Abbildung 7 abgebildet.[77]

Abbildung 7: Prozess QR-Code Gravur auf Holz[78]



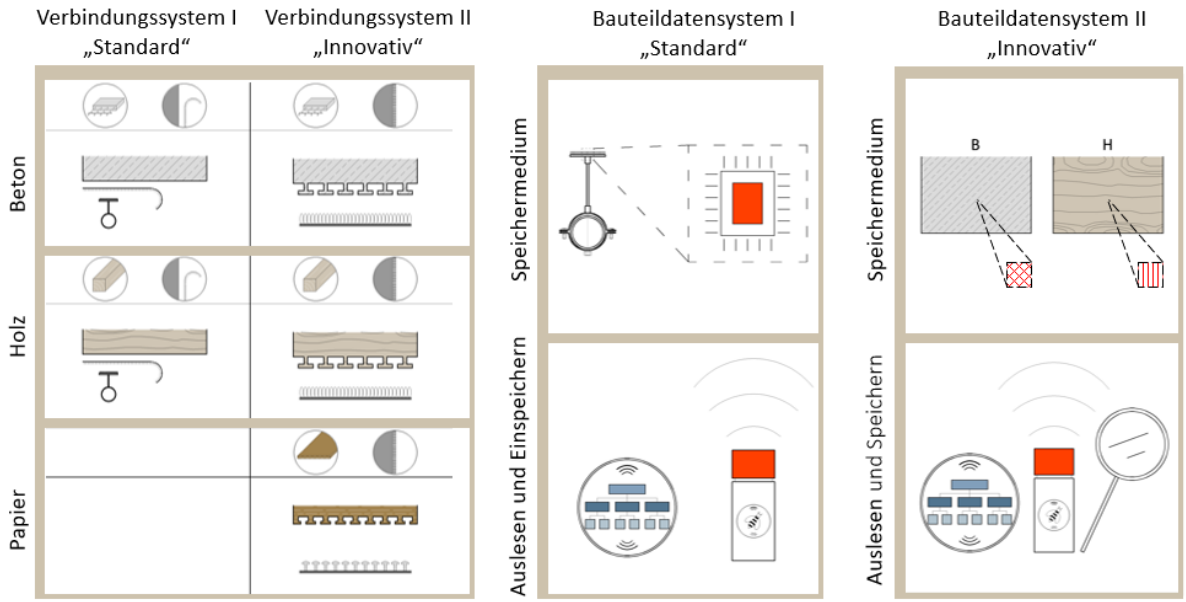
Wie im Paper festgestellt wird, bestehen in der Skalierung und in dem System, welches die QR-Codes herstellt und organisiert, wie auch in der Lesbarkeit der Codes (je nach Tiefe der Gravur und Umgebungslicht) Forschungs- und Entwicklungsbedarf. [79]

[74] Vgl. Vries et al. 2013.
[75] Vgl. QR Planet GmbH 2024.
[76] Vgl. Vasilyev et al. 2019 1425.
[77] Vgl. Byers et al.
[78] Ebd.
[79] Vgl. Ebd.

4 Projektinhalt

In einem ersten Schritt erfolgt die Definition potentieller Anwendungssituationen (z.B. Geschossdecke in Beton- oder Holzbauweise, Fenster, nicht tragende Innenwand). Anschließend wurde eine Untersuchung bautechnischer, digitaler, elektrotechnischer und papiertechnischer Aspekte in den nachfolgend dargestellten Bereiche durchgeführt, siehe Abbildung 8.

Abbildung 8: Forschungsfeld [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]



Der Untersuchungsgegenstand „Verbindungssystem I“ entspricht einer „Standardausführung“ des physischen Verbindungssystems, indem industrielle und am Markt erhältliche Klettkomponenten (Bahnen mit z.B. Schlaufenelementen) eingesetzt und auf Rohbauteile aufgebracht werden. Als Verbindungspartner oder Gegenstück dienen industrielle Klettkomponenten, welche auf Verbindungsmittel oder direkt auf Objekte des Ausbaus oder der technischen Gebäudeausrüstung aufgebracht werden.

Das „Verbindungssystem II“ entspricht einer innovativen Ausführung, indem Klettkomponenten direkt aus Rohbaustoffen oder Papierwerkstoffen hergestellt werden. Es entsteht somit ein monomaterielles Einzelbauteil mit klettfähiger Oberfläche. Als Verbindungspartner dienen Klettkomponenten, welche sich an industriellen Produkten orientieren, jedoch hinsichtlich Skalierung, Geometrie und Materialeigenschaften an die Klettkomponenten aus Rohbaustoffen angepasst sind.

Der Untersuchungsgegenstand „Bauteildatensystem I“ entspricht einer „Standardausführung“ eines Organisationssystems von Daten und Informationen über z.B. Einzelbauteile oder Baukomponenten für eine Kreislaufführung. Dies umfasst eine elektronische und eine digitale Ebene, wobei industriell

vorhandene und weit verbreitete Technologien und Produkte als Speichermedium (z.B. RFID-Chips) und als Lese- und Schreibgeräte genutzt werden.

Das „Bauteildatensystem II“ stellt eine innovative Ausführung dieses Organisationssystems dar. Hierzu besteht der Ansatz darin, auf Einzelbauteilen, Einzelteilen oder Baukomponenten selbst dauerhaft Informationen zu speichern und über die gesamte Lebensdauer des Objektes lesbar zu halten.

In diesen Untersuchungsgegenständen erfolgte eine Literaturrecherche, die Entwicklung von Konzepten, und die experimentelle Untersuchung einzelner Systemelemente / Komponenten (auf bautechnischer, papiertechnischer, elektrotechnischer und digitaler Ebene) anhand von Versuchen.

4.1. Literaturrecherche

Durch das Projektteam wurden Fachbücher, Paper, Produktdatenblätter, Forschungsberichte, Normen und Gesetzestexte mit thematischem Bezug recherchiert und analysiert. Die Recherche erfolgte anhand des Untersuchungsgegenstandes und durch die Bildung von Stichwörtern, wie auch durch eine weiterführende Recherche anhand gefundener Literatur. Die Auswahl der Dokumente erfolgte durch eine qualitative Einschätzung der Relevanz durch das Projektteam.

Die Literatur wurde über die Bibliothek der TU Graz oder Suchmaschinen (z.B. https://scite.ai/) recherchiert und bezogen. Was beispielsweise Baustoffe und die Baukonstruktion (José Luis Moro: Baukonstruktion - vom Prinzip zum Detail, Band 1-4[80], Konrad Weller: Industrielles Bauen 1986[81]) oder die Digitalisierung (Bauprodukteverordnung 2024[82], ÖNORM B 1801-1[83]) betrifft. Produktdatenblätter konnten direkt von Herstellern (z.B. *APLIX S.A.*) bezogen werden.

4.2. Konzeptentwicklung

Die Konzeptentwicklung stellt den Kern des Projektes dar. Indem Anwendungssituationen, Verbindungskonzepte und Bauteildatensysteme ausgearbeitet wurden und den Ausgangspunkt für die experimentelle Untersuchung sowie bautechnische, elektrotechnische, digitale und papiertechnische Entwicklungsansätze bilden. Das umfasst die Bereiche „Anwendungssituationen“, „Verbindungssystem I und II“ sowie „Bauteildatensystem I und II“.

4.2.1. Anwendungssituationen

Die Anwendungssituationen für das Klettverbindungssystem wurden am *Institut für Architekturtechnologie* (IAT) definiert und bilden das Bauwesen in einer möglichst großen Breite ab. Hierzu sind diese möglichst häufig im österreichischen Bauwesen vorzufinden. Gleichzeitig soll sich das Klettverbindungssystem im Hinblick auf eine Kreislaufwirtschaft gut für die definierten Situationen eignen. Zur Feststellung der Häufigkeit dieser Situationen wurden Erfahrungswerte im

[80] Moro et al. 2019.
[81] Weller 1986.
[82] Europäisches Parlament, Rat der europäischen Union 2024.
[83] ÖNORM B-1801-1.

Team herangezogen. Zur Feststellung der Eignung für das Klettverbindungssystem wurden diese in Meetings qualitativ besprochen und wurde eine Nutzwertanalyse durchgeführt.

4.2.2. Verbindungssystem I und II

Die Konzeptentwicklung zum physischen Verbindungssystem erfolgte durch das *Institut für Architekturtechnologie* (IAT), das *Labor für Konstruktiven Ingenieurbau* (LKI) und das *Institut für Biobasierte Produkte und Papiertechnik* (BPTI) anhand von architektonischen, bautechnischen und papiertechnischen Entwurfs- und Entwicklungsmethoden jeweils in Bezug auf die Anwendungssituationen. Dies wurde anhand der Erstellung und Entwicklung von Skizzen und Details per Hand und auf digitaler Ebene umgesetzt. Diese Schritte wurden durch eine systematische Recherche und Analyse relevanter Literatur und das Abrufen von Vorwissen zu verschiedenen spezifischen Komponenten und Anwendungen unterstützt. Wesentlich war darüber hinaus die Erstellung und fortlaufende Bearbeitung detaillierter technischer Konzept-Beschreibungen. Zudem wurden Konzept-Workshops abgehalten, in welchen bestehende Konzepte besprochen, diese weitergedacht und detailliert, wie auch daraus resultierende neue Konzepte als Ideen festgehalten und entwickelt wurden.

Maßgebend waren die Bestandteile der Anwendungssituationen, welche analysiert und im Kontext der Konzepte detailliert und definiert wurden. Dies betrifft die Primärstruktur (Beton- und Holzbauteile), die Sekundär- und die Tertiärstruktur (Komponenten des Ausbaus und der TGA (z.B.: Wand und Deckensysteme, Rohrleitungen, Rohrschellen)), die dazwischen verorteten Klettkomponenten (industriell oder aus z.B. Rohbaustoffen gefertigt) und das Aufbringen industrieller Klettkomponenten (Kleben). Wie auch die Anforderungen die an eine Verbindung in diesen Situationen und an den angedachten Schnittstellen gestellt werden (Lebensdauer, Zugfestigkeit).

4.2.3. Bauteildatensystem I und II

Die Konzeptentwicklung im Bereich Bauteildatensystem erfolgte durch das IAT, die *NET-Automation GmbH* und die *axtesys GmbH* anhand von Konstruktionsmethoden und architektonischer Organisation sowie digitalen und elektrotechnischen Entwurfs- und Entwicklungsprinzipien. Hierzu wurden erneut Skizzen und technische Beschreibungen, sowie Analysen erstellt wie auch Workshops in einem transdisziplinären Team abgehalten.

Maßgebend waren erneut die (architektonischen) Anwendungssituationen. Wobei in diesem Bereich die mögliche Position und damit die Verortung von Speichermedien für Ausleseprozesse, wie auch die Eigenschaften der Bestandteile im Hinblick auf Konstruktion und Bauteildaten behandelt wurden.

Durch die *NET-Automation GmbH* wurde evaluiert, welche Speichermedien verfügbar sind. Dies wurde auf passive Speichermedien in Form von RFID-Chips begrenzt, die keine Energieversorgung benötigen um eine maximale Nutzungsdauer ohne Wartung zu ermöglichen. Das Ergebnis war ein begrenztes Spektrum, zum Beispiel Barcodes, QR-Codes, NFC oder RFID-Chips. Wobei QR-Codes eine hohe Lebensdauer und Beschädigungstoleranz aufweisen (können), was das Speichermedium wie auch Auslesegeräte betrifft. Um die Speicherbegrenzung von RFID-Tags zu umgehen, und möglichst viele Daten abzubilden, wurde eine Lösung entwickelt, die auf der Integration einer Datenbank basiert. Dabei wird auf jedem RFID-Tag eine eindeutige ID gespeichert. Diese ID dient als Schlüssel,

der in einer von World4You gehosteten Datenbanktabelle hinterlegt ist. Mithilfe einer Schnittstelle über ein JSON API zum Web-Dashboard (Untersuchungs- und Entwicklungsgegenstand der *axtesys GmbH*, siehe unten) können Informationen, die mit dieser ID verknüpft sind, aus der Datenbank abgerufen oder bearbeitet werden. Darüber hinaus wurden zwei Konzepte zur Positionierung von RFID-Tags in einem exemplarischen Gebäude (mobile / fix verbaute Lesegeräte) entwickelt.

Durch die *axtesys GmbH* wurde ein Bauteildaten-Web-Dashboard entwickelt. Dies umfasst die Definition der User mit dem IAT, somit der Personen, welche mit diesem Dashboard arbeiten. Zudem erfolgte durch das IAT die Entwicklung einer mehrstufigen, hierarchischen Gliederung von Gebäuden wie auch die Definition relevanter Bauteildaten. Dies wurde von der *axtesys GmbH* anhand von Erfassung und Konzeption der Gliederung für das Dashboard, Konzepten zur Verknüpfung und Einpflegung von verschiedenen Datenquellen in das Dashboard, sowie die Erarbeitung der möglichen Userflows und Benutzerinteraktion übersetzt. Zudem wurde die Einbindung der Bauteil-Metadaten und die Möglichkeit von externen Verknüpfungen wie zum Beispiel des GS1 Systems analysiert.

4.3. Potentialabschätzung

Die entwickelten architektonischen Anwendungssituationen sowie Konzepte (Verbindungssystem, Bauteildatensystem) wurden durch das Projektteam analysiert, miteinander verglichen und bewertet. Zudem erfolgte eine Auswahl für eine weitere Bearbeitung und Überprüfung in experimentellen Versuchen. Durch das IAT wurde eine Nutzwertanalyse durchgeführt, indem Bewertungskriterien bestimmt und gewichtet, Alternativen beurteilt und abschließend das Ergebnis berechnet und interpretiert wurde.

Die Bewertungskriterien der Anwendungssituationen bestehen in „Häufigkeit“ (Einschätzung, wie häufig der genannte Anwendungsfall in Österreich im Bauwesen vorkommt), „Umsetzbarkeit“ (bautechnische Anforderungen bei der Herstellung des Klettverbindungssystems), „Vielfältigkeit“ (Vielfalt an potentiellen Baukomponenten welche befestigt werden können), „Innovationsgehalt“ (Neuheit im Vergleich zum Stand der Technik) sowie „Potential durch die Klettverbindung“ (Vorteile gegenüber bestehenden Fügemethoden).

Die Bewertungskriterien der Verbindungssysteme bestehen in „Herstellbarkeit“ (bautechnische Anforderungen bei der Herstellung des Klettverbindungssystems), „Klettfähigkeit“ (wie gut und unter welchem Aufwand eine Verbindung zwischen der erzeugten Klettfläche und einem Verbindungspartner herstellbar ist), „Klettfestigkeit“ (mögliche Lastaufnahme), „Innovationsgehalt“ (Grad der Neuheit) sowie „Nachhaltigkeit“ (Ressourcenverbrauch und Dauerhaftigkeit).

Die Bewertungskriterien beim Bauteildatensystem bestehen in „Rückbau“ (Relevanz / Bedeutung des Elements für den Rückbau in einer Kreislaufwirtschaft), „QR-Code“ (Eignung für einen QR-Code), „RFID-Chip“ (Eignung für einen RFID-Chip).

Es wurden die Bewertungskriterien textlich beschrieben und quantitativ eingeschätzt und bewertet. Zudem wurden in Meetings Stärken, Schwächen und Potentiale auf qualitativer Ebene festgestellt. Aus den quantitativen Bewertungen wurde zudem ein Durchschnitt gebildet.

Für die Bewertung wurde eine Excel-Tabelle angewandt welche nachfolgend exemplarisch dargestellt ist. Diese besteht aus einer Überschriftzeile mit Konzeptkürzel, Name und Potentialindex und einer

Erläuterung der quantitativen Abschätzung. Wie auch eine Darstellung des Konzeptes als Konstruktionszeichnung und eines Diagramms der quantitativen Abschätzung der Bewertung.

Tabelle 1: Potentialabschätzung [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]

<table>
<tr><th>Kürzel</th><th colspan="3">Konzeptname</th><th>Potenzial Index</th><th>Erläuterungen zur Abschätzung</th></tr>
<tr><td colspan="5" rowspan="2">Konzeptbild</td><td>1. Häufigkeit / Herstellbarkeit / Rückbau</td></tr>
<tr><td>-</td></tr>
<tr><td colspan="5" rowspan="2"></td><td>2. Umsetzbarkeit / Klettfähigkeit / QR-Code</td></tr>
<tr><td>-</td></tr>
<tr><td>1.</td><td>2.</td><td>3.</td><td>4.</td><td>5.</td><td>3. Vielfältigkeit / Klettfestigkeit / RFID-Chip</td></tr>
<tr><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td rowspan="2">-</td></tr>
<tr><td colspan="5" rowspan="6">Diagramm</td></tr>
<tr><td>4. Innovations-gehalt</td></tr>
<tr><td>-</td></tr>
<tr><td>5. Potential durch die Klettverbindung / Nachhaltigkeit</td></tr>
<tr><td>-</td></tr>
</table>

4.4. Versuche

Es wurden Versuche zum Verbindungssystem I und II sowie zum Bauteildatensystem I durchgeführt, welche nachfolgend dargestellt sind.

4.4.1. Verbindungssystem I

Für die Untersuchung des Verbindungssystems I (Kleben von Klettkomponenten auf Beton und Holz) wurden durch das *Labor für Konstruktiven Ingenieurbau* (LKI) nachfolgende Versuche durchgeführt. Wobei inhaltliche Abstimmungen mit dem *Institut für Biobasierte Produkte und Papiertechnik* (BPTI) und dem *Institut für Architekturtechnologie* (IAT) erfolgten, wie auch gemeinsam und mit dem Kletthersteller *APLIX S.A.* die zu testenden Klettprodukte diskutiert und definiert wurden. Insgesamt wurden die nachfolgenden Versuche durchgeführt:

- Alterungsversuche
    - Vorversuche
    - Alterung unter Dauerlast
    - Alterung ohne Last
    - Referenzversuche
- Bauanwendungsversuche
    - Exzentrizität
    - Randfehler
    - Orientierung
- Temperaturversuche

Alterungsversuche

Für Klettverbindungen in konstruktiver Verwendung bestehen keine Erfahrungen zur Alterung (50 bzw. 100 Jahre im Bauwesen) und keine normativen Alterungsversuche. Um in diesem Kontext Erkenntnisse zu schaffen, wurde das Verhalten des alternden Kletts unter Dauerlast, sowie die Tragfähigkeit von gealtertem Klett untersucht.

12 **Vorversuche** dienen der Bestimmung der charakteristischen Haftzugfestigkeit und der Ermittlung eines geeigneten Lastniveaus für die Alterungsversuche unter Belastung. Hierzu wurden die beiden Klettkomponenten aplix® 800 und aplix® 803 auf Zug geprüft (siehe Abbildung 9 und Abbildung 10).

Abbildung 9: Andrücken der Klettverbindung (Durchmesser 50mm) [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz]

Abbildung 10: Zugversuch (Durmesser 100mm) [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz]

Die **Versuche zur Alterung unter Dauerlast** wurden in der Klimakammer des *Institutes für Biobasierte Produkte und Papiertechnik* (BPTI) aufgebaut. Für diese Untersuchungen (Verhaltens des alternden Kletts unter Dauerlast, einer simulierten langfristigen Anwendung im Bauwesen) wurden durch das *Institut für Architekturtechnologie* (IAT), das *Labor für Konstruktiven Ingenieurbau* (LKI) und das *Institut für Biobasierte Produkte und Papiertechnik* (BPTI) ein Versuchs- und Messaufbau entwickelt.

Als Ausgangspunkt der Entwicklung wurden die ÖNORM EN 13733 (Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Prüfverfahren, Bestimmung der Dauerhaftigkeit von Klebstoffen für konstruktive Zwecke) und die ÖNORM EN 15416 (Klebstoffe für tragende Holzbauteile ausgenommen Phenolharzklebstoffe und Aminoplaste — Prüfverfahren) herangezogen. Die ÖNORM 13733 beschreibt Beton-Prüfkörper welche hergestellt und anschließend miteinander verklebt werden. Dafür wird eine programmierbare Klimakammer verwendet, in welcher eine Temperaturwechselbeanspruchung erfolgen kann. Nach der Beanspruchung in dieser Kammer wird eine Prüfung auf Abscheren zur Feststellung der Last beim Versagen durchgeführt. Die Temperaturwechselbeanspruchung erfolgt anhand von 50 Wechselbeanspruchungen mit Zyklen zu 12 h (Wechsel von +55 °C bis -25 °C).[84]

Die ÖNORM 15416 beschreibt eine „Glashausprüfung“ welche eine Kurzzeit- und Langzeitprüfung umfasst, wobei beide Prüfungen durchgeführt werden müssen. Bei der Kurzzeit-Prüfung wird ein Kontrolllos (10 Prüfkörper) nach einer Verklebung und einer 14-tätigen Klimatisierung bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte unter monotoner Belastung geprüft. Weitere drei Lose (mit jeweils 10 Prüfkörpern) dienen der Langzeitprüfung. Die Dauer der Beanspruchung variiert zwischen drei Monaten, sechs Monaten und 12 Monaten. Nach der Belastungsdauer sind alle Prüfkörper die nicht versagt haben zu entlasten und im Klima 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte für drei Wochen erneut zu klimatisieren. Anschließend ist unter monotoner Belastung die Restzugfestigkeit rechtwinklig zur Klebstofffuge zu prüfen.[85] Das Klima bei diesen Prüfungen entspricht den natürlichen Außenbedingungen in Europa zwischen dem 45. und dem 60. Breitengrad. Alternativ wird eine

[84] Vgl. ÖNORM EN 13733, 4–8.
[85] Vgl. ÖNORM EN 15416-1, 11.

Klimakammer mit zyklischem Wechsel erwähnt, wobei alle 24 h zwischen 10+- 2 °C bei 90+-5% relativer Luftfeuchte und 35+-2°C bei 40+-5% relativer Luftfeuchte gewechselt wird.[86]

Anhand dieser Normen wurde der nachfolgende Versuchsausbau zur Prüfung von auf Beton- und Holzbauteilen aufgeklebten und dauerhaft belasteten Klettprodukten für den Innenraum entwickelt.

Für die Beanspruchung in einer programmierbaren Klimakammer wurden 25 Wechselbeanspruchungen (Zyklen) zu je 24h mit folgenden Phasen definiert:

- 360 min lineare Änderung des Klimas auf +5° C und 80% RH „kalt und trocken“ (simulierter Winter)
- 360 min lineare Änderung des Klimas auf +35° C und 20% RH „warm und feucht“ (simulierter Sommer)

Die Dauerlast wurde anhand der 5%-Fraktile der Kurzzeit-Haftzugfestigkeiten der Klettverbindung (Vorversuche) definiert. Diese ergibt sich zu 13,2 kg bzw. 132 N. Die Dauerlast der Alterungsversuche wurde mit 12,2 kg festgelegt, da dies einfacher umgesetzt werden konnte und als ausreichend genau angesehen wird. Dieses Gewicht wird über den Prüfstempel und einen weiteren Stempel als Zusatzgewicht erreicht (siehe Abbildung 11).

Um das Verhalten der Klettverbindung während der Versuchsdurchführung beurteilen zu können wurden zwei der sechs Versuchskörper mit Wegsensoren ausgestattet. Um die Auswirkung der Klimazyklen auf die Messsensoren korrekt berücksichtigen zu können, wurden zudem zwei „Dummy“ Versuchskörper ohne Klettverbindung erstellt und ebenfalls mit Wegsensoren ausgestattet (Abbildung 12) Bei allen mit Wegsensoren ausgestatteten Versuchskörpern handelt es sich um Versuchskörper mit Holzprismen.

Abbildung 11: Dauerlastversuche Serie 1 [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz]

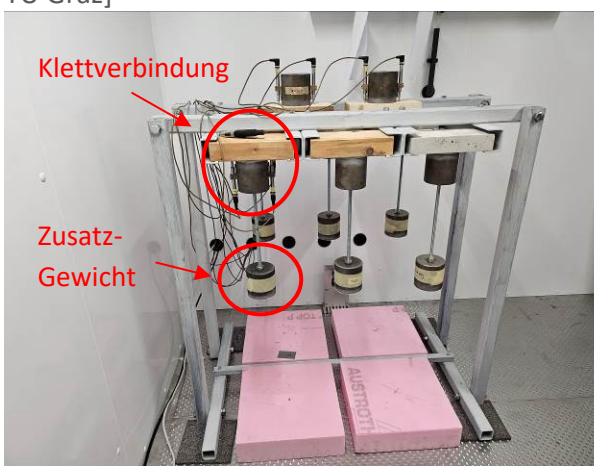


Abbildung 12: Dummy-Versuchskörper ohne Klett [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz]

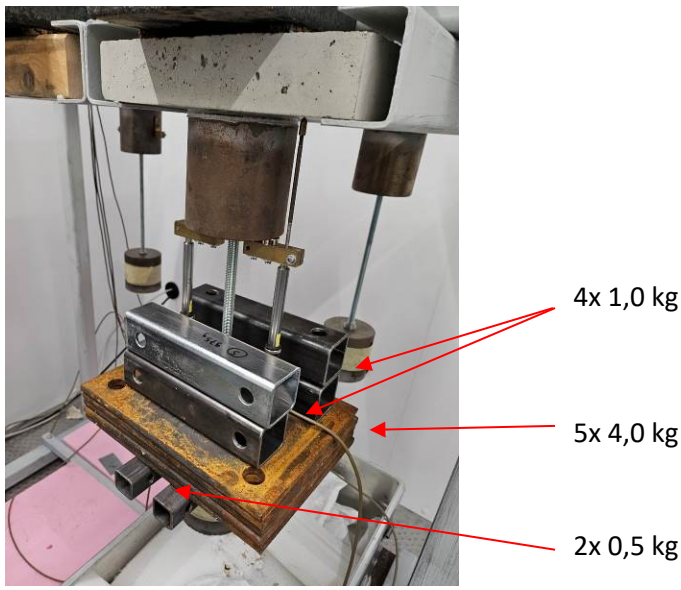
[86] Vgl. Ebd., 12.

Ergänzend wurden Versuchskörper mit Alterung ohne Last in der Klimakammer gelagert. Wobei die Klettverbindung unter Druckspannung stand. Auf Grund der unterschiedlichen Dichten von Holz und Beton war eine umgekehrte Positionierung (Stempel unten, Prisma oben) nicht sinnvoll, da sonst ungleiche Druckspannungen bei Beton- und Holz-Versuchskörpern auftreten würden.

Es erfolgte die Bestimmung der Haftzugfestigkeit nach erfolgter Alterung unter Dauerlast. Hierzu wurden an den Versuchskörpern Wegsensoren angebracht und mittels Zusatzgewichte ein Versagen der Klettverbindung herbeigeführt. Wobei es zu einem langsamen Öffnen der Verbindung kam, siehe Abbildung 13. Die Belastung der Versuchskörper wurde in 0,5 kg (= 5 N) Schritten gesteigert (siehe Abbildung 14).

Abbildung 13: Teilweise Öffnung der Klettverbindung bei Versuchskörpern unter Dauerlast [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz]

Abbildung 14: Zusatzgewichte zur Beschwerung der Versuchskörper bzw. des Prüfgestells [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz]



Die Versuche hinsichtlich **Alterung ohne Last** (Druck aus Eigengewicht) wurden weggeregelt mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 2,0 mm/min in einer elektromechanischen Prüfmaschine (Beta 1000 der Fa. *Messphysik*) durchgeführt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 15 und Abbildung 16 dargestellt.

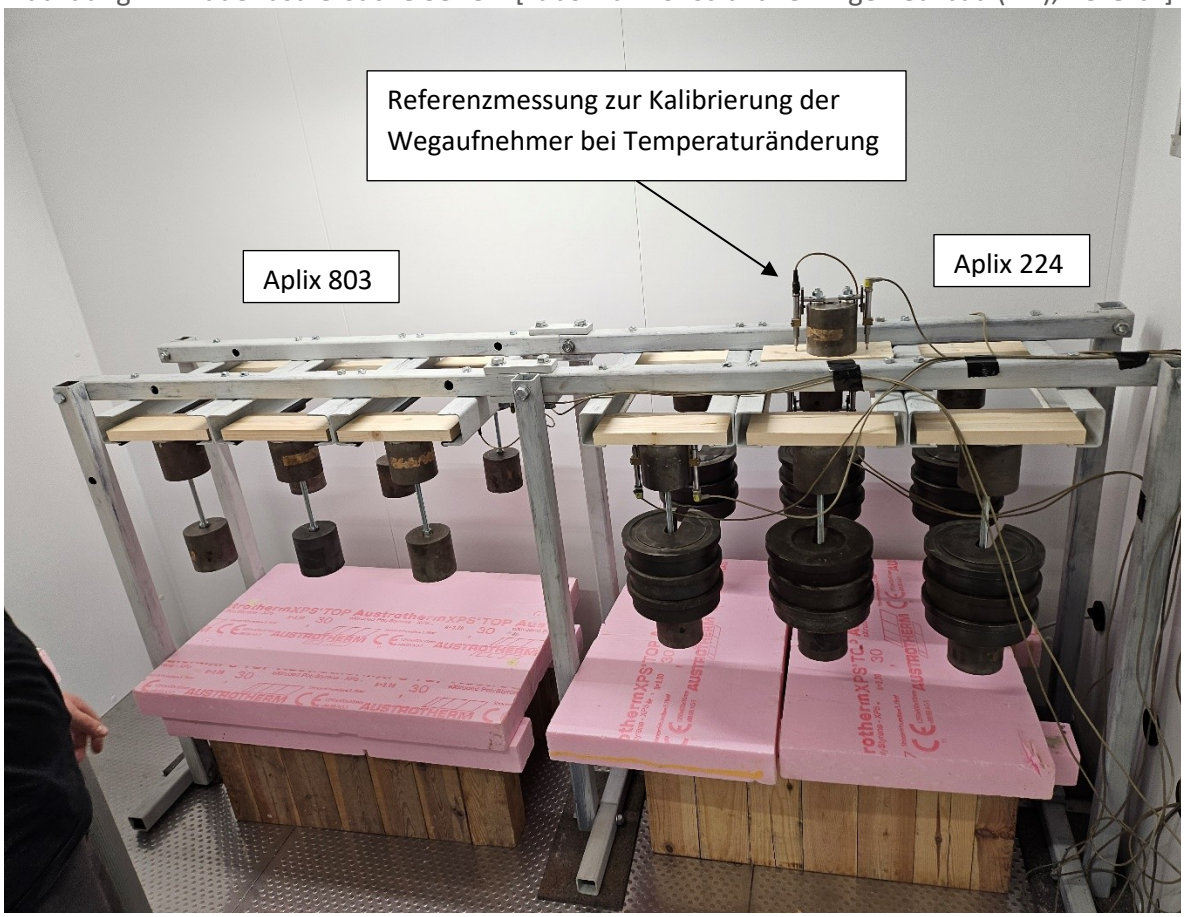
Abbildung 15: Versuchsaufbau der ohne Last gealterten Versuche und Referenzversuche [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz]

Abbildung 16: Versuchsaufbau der ohne Last gealterten Versuche und Referenzversuche [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz]

Mit dem Ziel, ein bisher unerklärbares Versagen von zwei Versuchskörpern während der **Alterung unter Dauerlast** zu bestätigen, wurden die Versuche wiederholt. Da im Rahmen der Orientierungsversuche (siehe unten) festgestellt wurde, dass die Orientierung der Klettkomponenten zueinander einen hohen Einfluss auf die Festigkeit hat, wurden die Versuchskörper in der Wiederholungsserie bewusst mit der besten und schlechtesten Orientierung verbunden. Zudem wurde das Produkt aplix® 224 in das Versuchsprogramm aufgenommen.

Die Versuche wurden gleich ausgeführt wie jene aus Serie 1 (siehe Abbildung 17) und unterscheiden sich lediglich dadurch, dass die Klettorientierungen bewusst gewählt wurden. Die Feststellung der Haftzugfestigkeit (nach dem Ende der künstlichen Alterung) erfolgte in der elektromechanischen Prüfmaschine.

Abbildung 17: Dauerlastversuche Serie 2 [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz]



Bauanwendungsversuche

Die Bauanwendungsversuche dienen der Feststellung, ob bestimmte Situationen, welche im Bauwesen bei der Montage von Objekten mittels Klettverbindung vorkommen könnten, einen Einfluss auf die Haftzugfestigkeit haben. Diese Versuche wurden durchgeführt, da es im Rahmen der Alterungsversuche unter Dauerlast, wie oben erwähnt, zu einem Versagen zweier Prüfkörper gekommen ist.

Die Bauanwendungsversuche umfassen eine exzentrische (außermittige) Belastung der Verbindung siehe Abbildung 18, einen Randfehler siehe Abbildung 19 (nicht übereinstimmende Verbindungsflächen zweier Verbindungspartner) und die Orientierung der Klettkomponenten zueinander siehe Abbildung 20 und Abbildung 21 (Abweichungen von der Maschinenrichtung der Produkte, welche aus der Herstellung resultieren).

Die Verbindung aller Versuchskörper wurde mit 20 kg Gewicht als Drucklast (+6 kg Eigengewicht des Stahlstempels) hergestellt und auf Zug getestet. Hierbei wurde eine Prüfmaschine des Typs Shimadzu AG-50kNG verwendet.

Abbildung 18: Versuche „Exzentrizität“ [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz]

Abbildung 19: Versuche „Randfehler“ [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz]

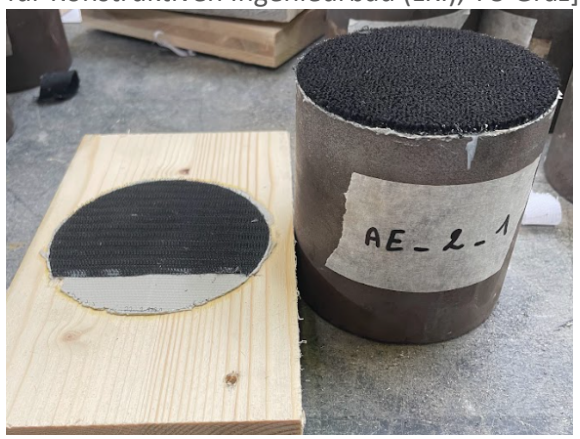


Abbildung 20: Versuche „Orientierung“ [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz]

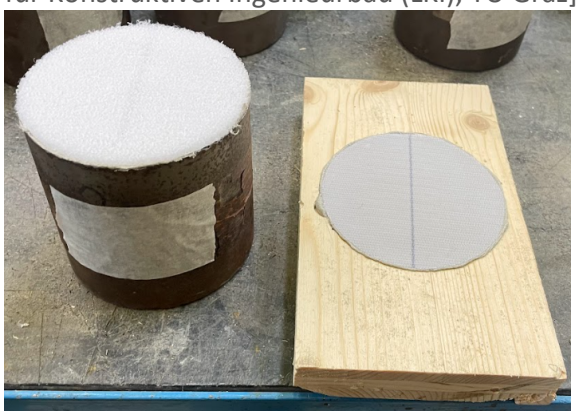
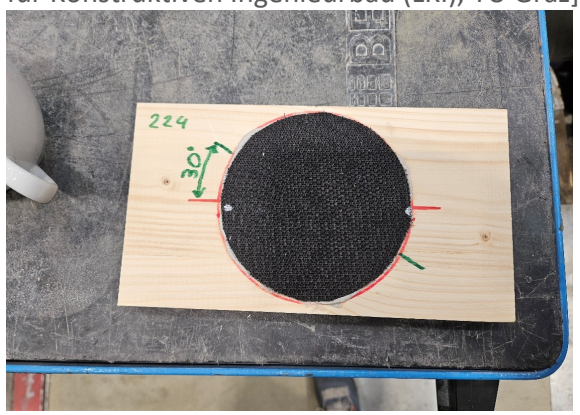


Abbildung 21: Versuche „Orientierung“ [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz]



Temperaturversuche

Die Temperaturversuche dienen zur Feststellung, welchen Einfluss die Temperatur auf die Haftzugfestigkeit hat. Dies erfolgte anhand der Klettprodukte aplix® 803 (Hakenprodukt) und aplix®224 (Pilzkopfprodukt) mit aplix®800 (Schlaufenprodukt). Ergänzend wurde untersucht, ob dieser Einfluss auch von der Orientierung abhängt, indem die Klettkomponenten um 0° und 90° (aplix® 803) sowie um 30° und 60° (aplix®224) zueinander verdreht wurden.

In den Dauerlastversuchen mit künstlicher Alterung (Klimazyklen) wurden Temperaturen von 5°C bis 35°C aufgebracht. Da in den Dauerlastversuchen ein Versagen bei Maximaltemperatur (T=35°C) beobachtet werden konnte, wurde der Fokus in dieser Versuchsserie vor allem auf höhere Temperaturen gelegt. Geprüft werden die Versuchskörper daher unter 25°C, 35°C und 45°C.

Die Prüfkörper wurden ca. 16 Stunden vor den Versuchen in einem Klimaschrank auf die gewünschte Temperatur erwärmt und dann während dem Versuch durch eine Heizmatte auf der gewünschten Temperatur gehalten (siehe Abbildung 22 und Abbildung 23). Die Versuche bei 25°C konnten unter Raumtemperatur gelagert und geprüft werden.

Abbildung 22: eingebauter Versuchskörper [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz]

Abbildung 23: Versuchskörper während der Prüfung [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz]

4.4.2. Verbindungssystem II

Für die Untersuchung des Verbindungssystems II (Klettkomponenten aus Rohbaustoffen oder Papierwerkstoffen) wurden durch das *Labor für Konstruktiven Ingenieurbau* (LKI), das *Institut für Biobasierte Produkte und Papiertechnik* (BPTI) und das *Institut für Architekturtechnologie* (IAT) Versuche durchgeführt. Diese betreffen vor allem die Herstellbarkeit aber auch Haftzugfestigkeiten. Da die jeweiligen Herstellungsverfahren Projektergebnisse darstellen, sind diese im entsprechenden Kapitel angeführt.

Klettbeton

Im Kontext von Klettbeton erfolgten Herstellversuche mit Schalungen aus Wachs (*ConFormWax* von *TECETE-Chemie GmbH*) (siehe Abbildung 24 und Abbildung 25) und aus extrudiertem Polystyrol (XPS) (siehe Abbildung 26 und Abbildung 27).

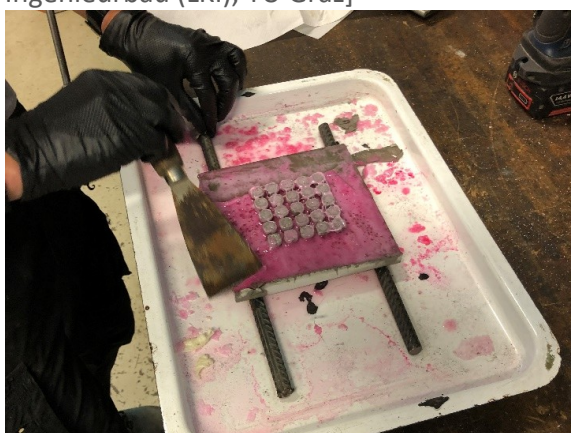
In diese Schalungen wurde Zementleim gegossen. Anschließend wurde die Wachsschalung mittels Temperatur bzw. das Polystyrol mittels Aceton entfernt. Hierbei ist hervorzuheben, dass für die Herstellung von Wachsschalungen ein Fräsverfahren unter Wasser erfolgreich getestet und eingesetzt wurde. Im Zuge der Herstellversuche wurden einige Betonrezepturen getestet und entsprechend verbessert.

Abbildung 24: Fräsen von Wachs unter Wasser [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz]

Abbildung 25: Auflösen der Wachsschalung mit Temperatur [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz]

Abbildung 26: Herstellung Klettbeton mit Polystyrol-Schalung [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz]

Abbildung 27: Auflösen der Polystyrol-Schalung mit Aceton [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz]



Klettholz

Für die Herstellung von Klettkomponenten aus Holz („Klettholz“) wurden durch das LKI Holzelemente aus Buche mit enger Maserung bearbeitet. Dies erfolgte durch das subtraktive Verfahren Schneiden mit schrägen Kreissägen-Schnitten. Dafür wurde Buchenholz verwendet, da diese eine besonders hohe Festigkeit und gute Bearbeitbarkeit aufweist.

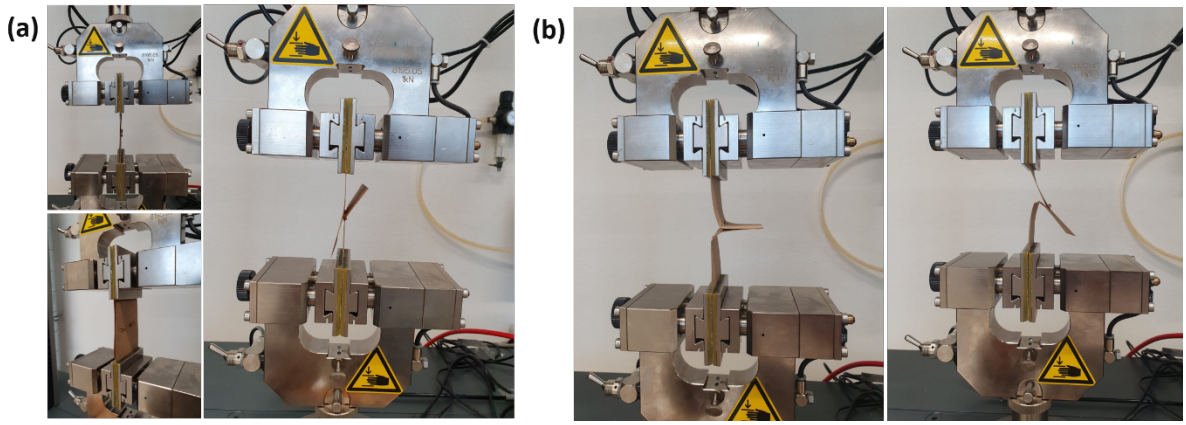
Durch das IAT wurde Klettholz durch ein additives Verfahren hergestellt. Hierzu wurden „LignoLoc® Holznägeln“ in eine Mehrschichtplatte eingebracht. Für die Herstellung wurden Löcher mit 5 mm vorgebohrt, Leim eingebracht und die Nägel eingebracht oder eingeklopft.

Klettpapier

Im Zusammenhang mit Klettkomponenten aus Papier („Klettpapier“) wurden durch das *Institut für Biobasierte Produkte und Papiertechnik* (BPTI) Muster von Klettkomponenten aus herkömmlichen Verpackungspapierwerkstoffen (Kraftliner mit einer Grammatur von 280g/m²) hergestellt. Hierzu wurde ein einfaches Pilzsystem zusammen mit einem Gegenstück aus Kraftliner gefaltet und das Gegenstück geschnitten.

Es erfolgten Versuche zur Festigkeit und dem Alterungsverhalten. In Abbildung 28 sind die verwendeten Testmethoden dargestellt. Links (a) ist die Messung der Festigkeit des Klettsystem in ebener Richtung zu sehen, rechts (b) die Schäl-/Lösekraft. Alle Versuche wurden in einem Universalprüfgerät (proline Z010, ZwickRoell, Deutschland) durchgeführt. Die Klettverbindung wurde insgesamt fünfmal geöffnet und wieder verschlossen, wobei nach jedem Vorgang die Messung wiederholt wurde. Für Erkenntnisse zum Alterungsverhalten wurden diese Versuche mit Versuchskörpern, welche nach der Herstellung für mindestens 24 Stunden bei zwei verschiedenen relativen Luftfeuchten (50% RH und 70% RH) gelagert wurden, wiederholt. Zudem erfolgte eine künstliche Alterung bei erhöhter Temperatur und Luftfeuchtigkeit für 12 Tage nach DIN ISO 5630-3.

Abbildung 28: Messverfahren für Papier-Klettsystem: (a) Festigkeit des Klettsystems und (b) Schälkraft [Institut für Biobasierte Produkte und Papiertechnik (BPTI), TU Graz]



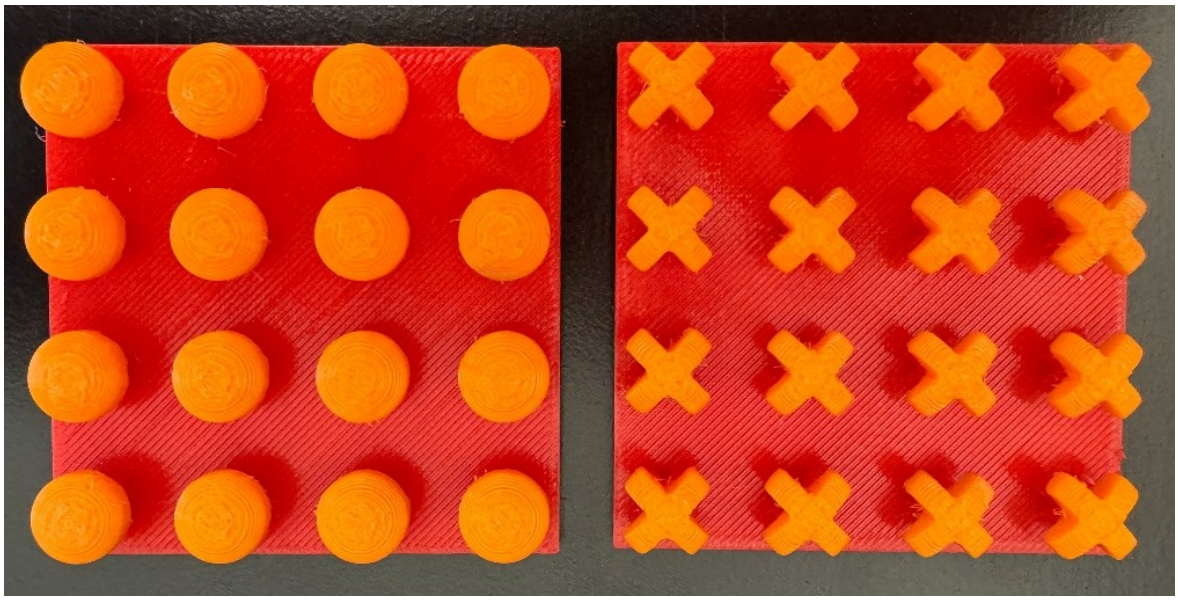
Verbindungspartner

Pilzkopfkomponente

Herstellversuche

Als Verbindungspartner von Klettbeton und Klettholz wurden durch das *Institut für Architekturtechnologie* (IAT) Versuche zur Herstellung von Klettkomponenten mit Pilzkopf- und Hakenelementen mittels 3D-Druck durchgeführt. In einem ersten Schritt erfolgte eine digitale Modellierung in *Rhinoceros 3D Version 7.* Die Drucke wurden auf einem *Bambulab P1P 3D-Drucker* mit dem flexiblen Material *Recreus Filaflex* durchgeführt. Die Besonderheit dieser Drucke liegt in der Verwendung von zwei Materialien mit unterschiedlichen Härtegraden. Das Material in Orange besitzt den Shore-Härtegrad A82 (biegeweicher) und bildet die Köpfe der Klettelemente, das Material in Rot den Shore-Härtegrad A95 und bildet die Stiele und die Basisplatte, siehe Abbildung 29.

Abbildung 29: Biegeweiche Klettkomponenten (IAT), TU Graz



Haftzugfestigkeit

Eine erste Feststellung der Klettfähigkeit zwischen „Klettbeton“ bzw. „Klettholz“ mit 3D-gedruckten Elementen erfolgte durch händische Tastversuche am IAT. Zudem wurden die Haftzugfestigkeit, Querzugfestigkeit und Schälzugfestigkeit, wie auch die nötige Kraft zur Herstellung der Verbindung am LKI getestet. Wobei hinsichtlich Haftzugfestigkeit und Kraft zur Herstellung der Verbindung folgende Pilzkopf-Geometrien mit Klettbeton (Pilz- und Nutgeometrie) und Klettholz (Pilz- und Nutgeometrie) untersucht wurden:

Tabelle 2: Pilzkopf-Geometrien für Versuche [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz]

Material	Form	Raster	Kopf-Form	Kopfgröße
Beton	Pilz	16,0 mm	O-Form	8,0 mm
				8,5 mm
			X-Form	8,0 mm
				8,5 mm
				9,0 mm
	Nut	16,0 mm	O-Form	8,0 mm
				8,5 mm
			X-Form	8,5 mm

Material	Form	Raster	Kopf-Form	Kopfgröße
Holz				9,0 mm
	Pilz	16,0 mm	O-Form	7,5 mm
				8,0 mm
				8,5 mm
			X-Form	8,5 mm
				9,0 mm
	Nut	17,2 mm	O-Form	8,5 mm
				9,0 mm
			X-Form	10,0 mm
				10,5 mm

Um bei den Haftzugversuchen zu gewährleisten, dass die 3D gedruckten Pilze alle gleichmäßig aus dem Klett gezogen werden und sich die Grundplatte nicht verformt, wurden sie auf Stahlplatten aufgeklebt. Das 3D gedruckte Pilzelement wurde anschließend in den Bauteilklett (Klettbeton) hineingedrückt bis die Verbindung vollständig geschlossen ist und anschließend wieder herausgezogen (siehe Abbildung 30). Dieser Vorgang wurde bei allen Versuchskörpern 2-mal durchgeführt, da es beim ersten Mal schließen und öffnen zu einem Ausrichten der beiden Elemente zueinanderkommt und damit die Schließkraft des zweiten Durchganges geringer wird.

Schälzugfestigkeit (Lösen der Verbindung)

Die Schälzugfestigkeit wurde anhand dem Objekt mit den Geometrien X-Form, Raster 16,0 mm und Kopfgröße 9,0 mm untersucht. Der Versuchsaufbau ist ähnlich wie zuvor, jedoch wurde die Grundplatte der 3D gedruckten Pilze auf einer Seite deutlich verlängert und an dieser Lasche wird normal zu Klettebene eine Zugkraft aufgebracht (siehe Abbildung 31)

Abbildung 30: Haftzugversuche der Kombination Klettbeton mit 3D-gedruckten Pilzköpfen [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz]

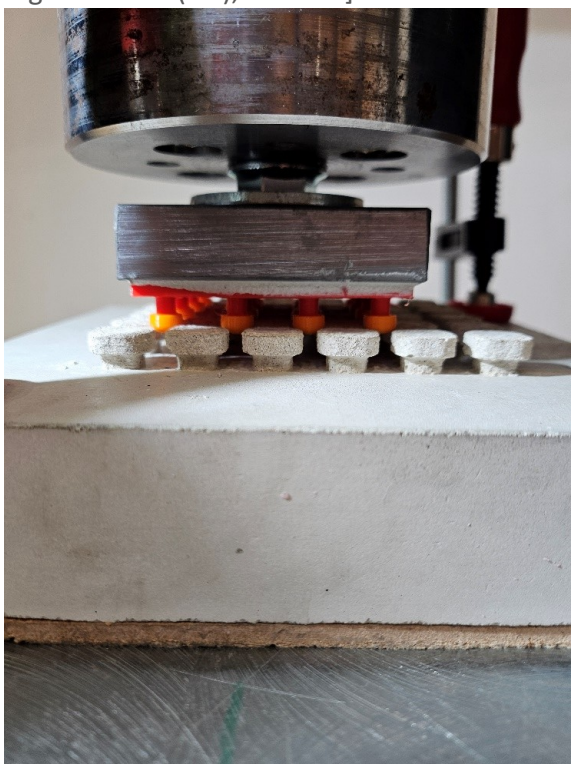
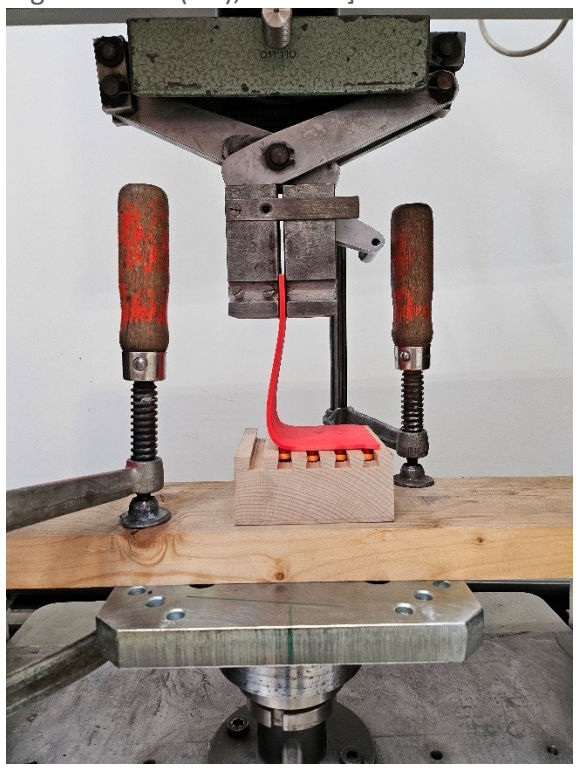


Abbildung 31: Schälzugversuche der Kombination Klettholz mit 3D-gedruckten Pilzköpfen [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz]



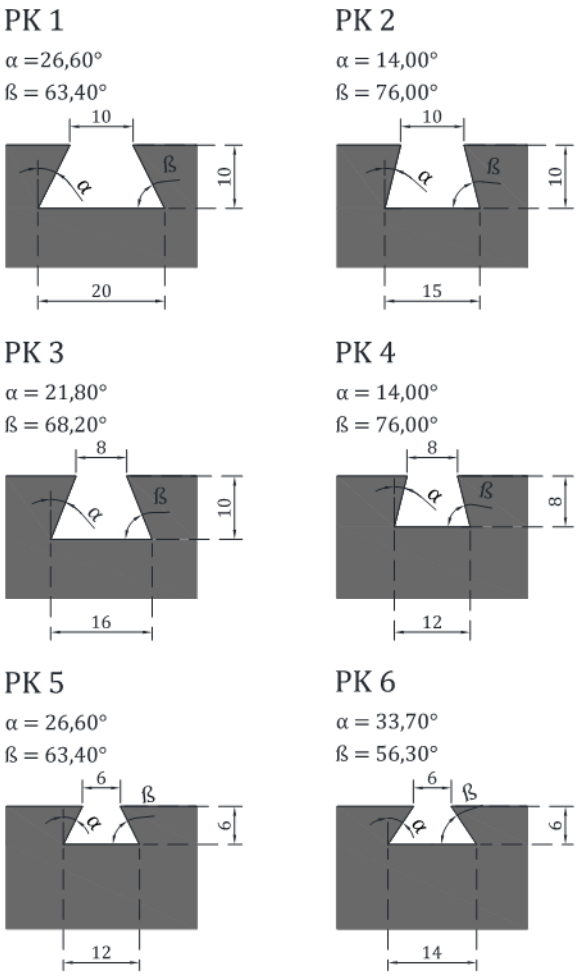
Papierkomponente

Haftzugfestigkeit

Ergänzend wurde als Gegenstück zu Klettholz mit Schwalbenschwanzgeometrie eine Papierkomponente untersucht. Hierzu wurden zwei unterschiedliche Papiere, Kraftliner aus Frischfasern und Testliner aus Recyclingfasern, verwendet. Zur Feststellung der Haftzugfestigkeit wurden fünf unterschiedliche Nutgeometrien mit dazu passenden Papiergegenstücken geprüft. Versuchskörper 3 (siehe Abbildung 32) wurde aus zeitlichen Gründen nicht untersucht, da dieser keine Extremwerte repräsentiert und damit mit keinen maßgebenden Unterschieden zu den anderen Geometrien zu rechnen ist.

Jede Nut hat eine Länge von 30 mm und jedes Papierstück 30 mm Breite, somit ergibt sich bei allen Versuchskörpern eine Verbindungslänge von 30 mm. Jede Nutgeometrie wurde zwei Mal erstellt, wovon eine zusätzlich mit Schleifpapier (P100) geklebt wurde, um unterschiedliche Rauigkeiten der Nutflanken zu simulieren.

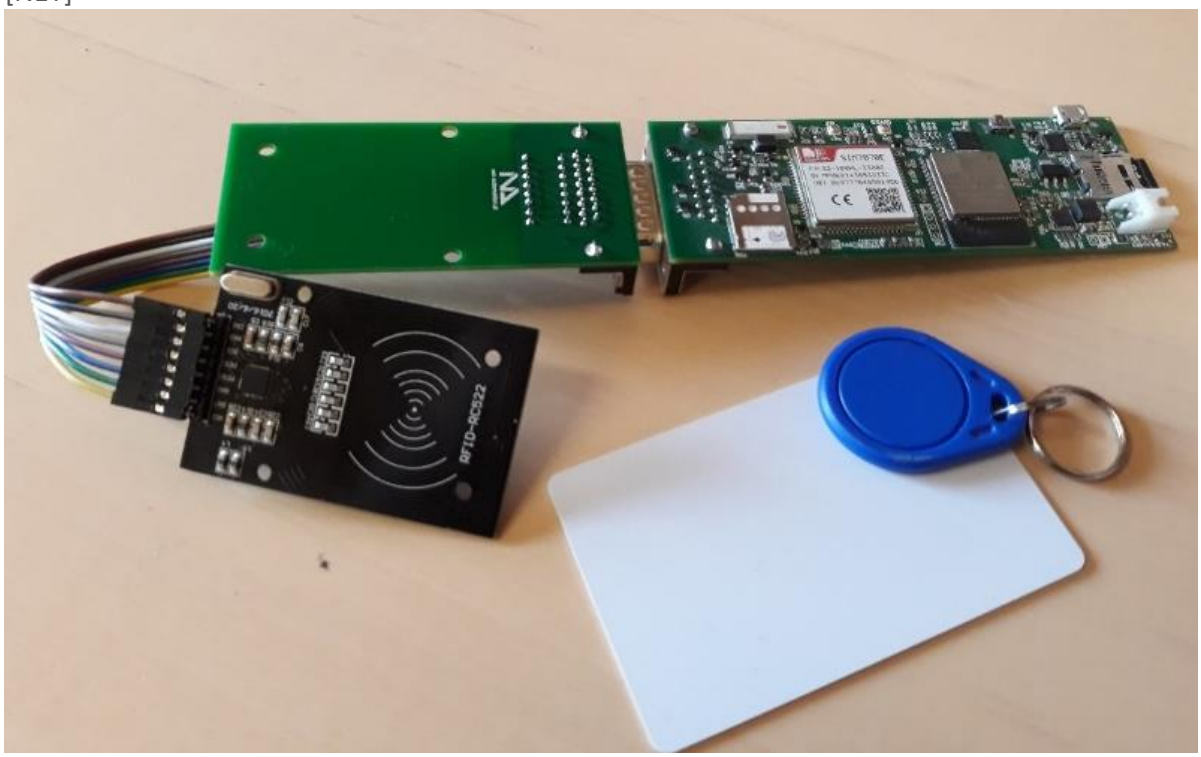
Abbildung 32: Papierkomponente Nut-Geometrien [BPTI, TU Graz]



4.4.3. Bauteildatensystem I

Aufbauend auf den Konzepten und für das *Bauteildatensystem I* entwickelte *NET-Automation GmbH* eine Elektronik zum Auslesen von RFID Tags. Dazu wurde eine am Markt verfügbare RFID Antenne mit Ausleseelektronik in die *NETBEE* Elektronik integriert (siehe Abbildung 33). Die Elektronik wurde designt und es folgte eine Firmware-Entwicklung bzw. Programmierung für das Auslesen und Übertragen der Daten in eine Cloud.

Abbildung 33: Basismodul mit RFID-Reader, sowie 2 RFID-Tags (in Anhänger- und Kartenform) [NET]



Nach Testreihen zur Funktionalität der Datenübertragung und Auswertung folgten weitere Testreihen auf Materialbasis, welche das Auslesen im eingebauten Zustand (im Gebäude) simulieren. Das Auslesen wurde beispielsweise durch eine Gipskartonplatte (einer Trockenbauwand), Kunststoff oder Holz (Abbildung 34) erprobt, wobei jeweils die Verbindung mit dem RFID Tag hergestellt werden konnte. Metall jedoch zeigte eine starke Abschirmung, die ein Auslesen verhinderte. Weiters folgten die systematische Variation der Abstände und die Verwendung jeweils einer RFID Karte und eines RFID Tags. Diese Versuche ergänzend wurde eine MIFARE® 1K NFC-Plastikkarte in eine Betondeckenplatte (Ausschnitt inklusive Stahlbewehrung) einbetoniert und getestet (Abbildung 35). Dies zielte darauf ab, die Effektivität des Lesens und Schreibens von Daten unter diesen erschwerten Bedingungen zu bewerten.

Abbildung 34: Test Holz 45mm mit 2 RFID-Tags (in Anhänger- und Kartenform) [NET]

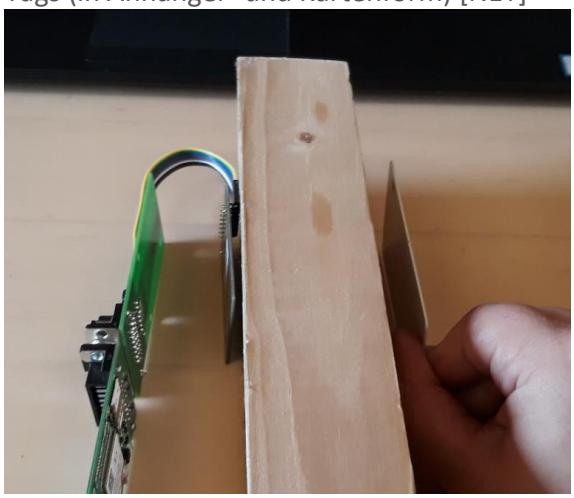


Abbildung 35: MIFARE® 1K NFC-Plastikkarte in eine Beton [NET]

5 Ergebnisse

Das Programm „Stadt der Zukunft“ strebt die Entwicklung von Technologien sowie deren Systemintegration an, mit dem Ziel nachhaltiger und damit zukunftsfähiger Städte, Quartiere und Gebäude. Was die Themen Energie und Ressourcen, wie auch die Dynamik urbaner Räume und neue Anforderungen an Städte und Gebäude aufgrund des Klimawandels umfasst.

Mit dem übergeordneten Ziel diesen Transformationsprozess zu unterstützen, behandelt das Projekt „ReCon“ die Kreislaufwirtschaft im Kontext von konstruktiv technischer und räumlicher Flexibilität, sowie durch ein fortlaufendes Bauteil-Datenmanagement. Dies erfolgt anhand der Kernelemente der „Rückbaubarkeit“ durch die Kletttechnologie sowie der „Information“ über verbaute Elemente und Objekte. Hierzu wurde, in Abhängigkeit des Applikationsfalls, ein Konzept eines resilienten Klettverbindungssystems zwischen Primär- (Tragkonstruktion/Rohbau), Sekundär- (Ausbau) wie auch Tertiärstruktur (Technische Gebäudeausrüstung) ausgearbeitet und auf Komponentenebene verifiziert.

Anhand der thematischen Inhalte des Projektes erfolgt somit eine Annäherung an ein für das Bauwesen neuartiges Verbindungssystem, welches physische und virtuelle Aspekte umfasst. Es wurden Grundlagen für die weitere Erforschung und für eine Etablierung dieses Verbindungssystems im Bauwesen geschaffen. Woraus innovative Projektinhalte, wie auch, durch die Zusammenarbeit von Architekten*innen, Bauingenieur*innen, Papiertechniker*innen und Personen aus dem Bereich der Elektrotechnik und der Softwareentwicklung, eine Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit und der F&E-Qualität resultieren.

Die nachfolgende Darstellung ausgewählter Projektergebnisse erfolgt anhand der Themen und Kapitel „Anwendungssituation“, „Klettverbindungssystem“ und „Bauteildatensystem“. Neben theoretischen Analysen sowie Konzepten umfasst dies Erkenntnisse und Ergebnisse aus experimentellen Versuchen.

5.1. Anwendungssituationen

Abbildung 36: Geschossdecke in Betonbauweise [IAT, TU Graz]

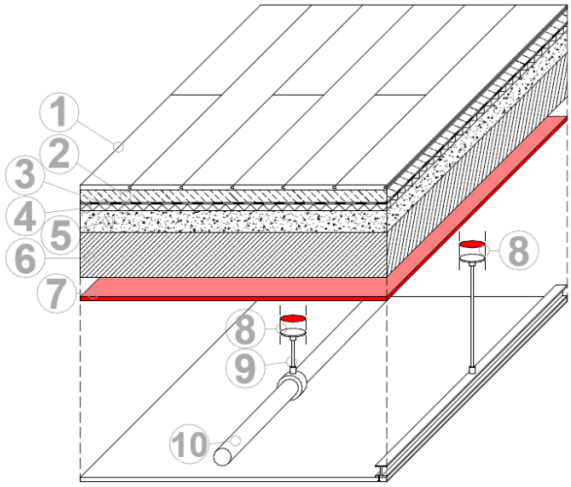
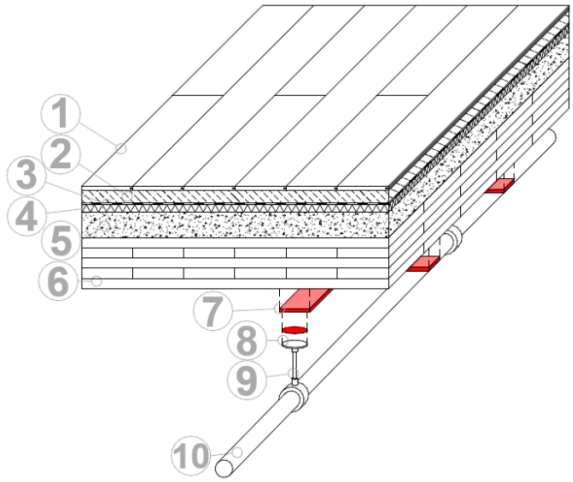


Abbildung 37: Geschossdecke in Holzbauweise [IAT, TU Graz]



Die für die Darstellung der Projektergebnisse wurden die Anwendungssituationen „Geschossdecke in Betonbauweise“ (Abbildung 36) und „Geschossdecke in Holzbauweise“ (Abbildung 37) ausgewählt. Diese umfassen konstruktiv jeweils eine Geschossdecke mit einem entsprechenden Fußbodenaufbau und an der Unterseite befestigten Leitungen der technischen Gebäudeausrüstung, sowie einmal eine abgehängte Decke.

Die Anwendungssituation „Geschossdecke in Betonbauweise“ besteht aus einer Deckenplatte aus Stahlbeton (6) mit darauf liegender gebundener Leichtschüttung (5), einer Trittschalldämmung (4), einer PE-Folie (3) sowie einem Estrich (2) und einem Holzparkett (1) als finale Oberfläche. An der Unterseite der Stahlbetonplatte (6) wird vollflächig eine Klettfläche (7) bereitgestellt. An welcher ein abgehängtes Deckensystem, sowie ein Rohr (10) der technischen Gebäudeausrüstung über eine Rohrschelle (9) mittels Klettmontagemittel (8) montiert wird.

Die Anwendungssituation „Geschossdecke in Holzbauweise“ besitzt als Tragstruktur eine Deckenplatte (6) aus Brettsperrholz auf welcher derselbe Fußbodenaufbau wie bei der Anwendungssituation „Geschossdecke in Betonbauweise“ besteht. An der Unterseite der Deckenplatte (6) wird eine Klettfläche (7) bereitgestellt. Diese Fläche (7) bildet einen streifenförmigen Raster, welcher eine hohe Flexibilität für die Montage unterschiedlicher Objekte bei gleichzeitiger Materialersparnis bieten kann. An der Klettfläche wird erneut ein Rohr (10) der technischen Gebäudeausrüstung über ein Klettmontagemittel (8) befestigt.

Die Klettflächen werden in beiden Situationen durch das Aufkleben industrieller Klettkomponenten in Form von Bahnen oder Streifen oder durch das Ausbilden der Geschossplatte als „Klettbeton“ oder als „Klettholz“ hergestellt. Das Aufbringen von industriellen Klettkomponenten erfolgt mittels Kleben und ist im Neubau (vor Ort oder bei der Vorfertigung) und bei der Sanierung angedacht. Die Herstellung von Klettkomponenten aus Rohbaustoffen kann nur im Rahmen der Vorfertigung erfolgen, wobei bei Beton Fertigteile und Halbfertigteile angedacht sind.

Grundsätzlich konkurriert die Klettverbindung im Bauwesen mit herkömmlichen Fügemethoden. Hierbei ist vor allem das Fügen durch Schrauben hervorzuheben. Eine Schraubverbindung ist im Betonbau zwar an beinahe jeder Position des Bauteils möglich, sowie bekannt bei Fachpersonal, jedoch nur mit hohem Aufwand (Vorbohren) herstellbar. Im Holzbau ist eine Schraubverbindung wesentlich einfacher herzustellen. Dennoch wird angenommen, dass eine Klettverbindung (verglichen mit einer Schraubverbindung) die nachfolgenden Potentiale umfassender abbilden kann. Dies betrifft auch den beschädigungsfreien Rückbau (siehe unten), da diese Eigenschaft im Holzbau von der Eindringtiefe der Schraube und den Feuchte- und Temperaturzyklen abhängig ist,[87] was auch den Ausbau oder die TGA betreffen kann.

Das Potential der Anwendung der Klettverbindung an der oben dargestellten Schnittstelle (Geschossplatte in Beton oder Holz zu TGA / abgehängter Decke) besteht, hinsichtlich einer Kreislaufwirtschaft und im Vergleich mit gängigen Fügemethoden, in folgenden Punkten:

- Lebensdauer
    - Verlängerung der Lebensdauer von Einzelteilen durch die Möglichkeit des (einfachen) beschädigungsfreien Rückbaus für eine Wiederverwendung (vor allem bei unterschiedlicher Materialität und / oder Lebensdauer der Einzelteile)
    - Verlängerung der Lebensdauer von Einzelteilen durch den Erhalt der Werkstoffeigenschaften (basierend auf Literatur zu Kleben – einer flächigen Fügemethode wie Klett): [88]
        - Keine mechanische Schädigung durch Bohrlöcher oder ähnliche punktförmige Krafteinleitung (z.B. Aufweitung der Bohrlöcher bei Schwingungsbelastung)
        - Weitgehende Vermeidung von Oberflächenstörungen
    - Verlängerung der Lebensdauer des Gebäudes (vor allem der Tragstruktur) durch die Möglichkeit der einfacheren Sanierung, Reparatur oder Umbauten bei Nutzungswechsel
- Montage- und Demontageprozesse
    - Einfache und schnelle Montage auch bei hohem Installationsgrad (kein Bedarf für Vorbohrungen, Montage ohne Spezialwerkzeug, je nach Objekt ist die Montage für eine Person alleine möglich, Neupositionierung möglich)
    - Einfache und zerstörungsfreie Demontage (Demontage ohne Spezialwerkzeug, je nach Objekt ist die Demontage für eine Person alleine möglich)

Damit diese Potentiale vollumfänglich und über die gesamte Nutzungsdauer von Gebäuden erreicht werden können, sind an die Klettverbindung bestimmte bautechnische Anforderungen gestellt, welche nachfolgend dargestellt sind.

5.1.1. Bautechnische Anforderungen

Im Kontext bautechnischer Anforderungen wurden die Lebensdauer und die mögliche Lastübertragung (Haftzugfestigkeit) thematisiert. Da bereits Klettprodukte aus Fasern aromatischer Polyamide (z. B. Kevlar, Nomex, Twaron) oder aus Polyphenylensulfid (PPS) bestehen, welche unbrennbar sind und in der Raumfahrt oder bei Kleidung in der Brandbekämpfung (Feuerwehr, Bohrturmbrände) eingesetzt werden,[89] wie auch das Produkt „aplix® 840“ des Unternehmens *APLIX*

[87] Vgl. Schuster, Geier 2023, 66.
[88] Doobe 2018, 322–323.
[89] Vgl. Krüger 2013, 3.

S.A. eine hohe Temperatur- und Feuerbeständigkeit aufweist,[90] wurde entschieden, dass der Aspekt „Brandschutz“ auf Materialebene und somit auf Herstellerseite zu thematisieren ist.

Lastübertragung

Die Haftzugfestigkeit und mögliche Lastübertragung einer Klettverbindung wird grundsätzlich über die Art der Verbindungspartner (z.B. industrielle Produkte, Klettbeton, Klettholz) und die Größe der Verbindungsfläche gesteuert. Für eine Abschätzung einer möglichen Last, welche in den gewählten Anwendungssituationen auftreten können, wurde die punktuelle Befestigung (mittels Abhänger) eines TGA-Stahlgewinderohres und eines TGA-Lüftungskanal an der Decke betrachtet.

Berechnungsbeispiel: TGA-Stahlgewinderohr (Wasserleitung)

Beim Stahlgewinderohr, welches in diesem Beispiel einen horizontalen Zuwasserstrang darstellt, wurde ein DN50 Rohr (50 mm Durchmesser) sowie eine gleichmäßige Lastverteilung angenommen. Das Metergewicht sowie der Rohrinnendurchmesser der mittelschweren Reihe (geringere Rohrwanddicke von 1,25 mm) betragen 5,03 kg/m sowie 53,1 mm. Für die schwere Reihe (größere Rohrwanddicke) beträgt das Metergewicht 6,19 kg/m und der Rohrinnendurchmesser 51,3 mm. Der Befestigungsabstand beträgt bei einem Stahlrohr DN50 4,75 m.[91]

Die errechneten Belastungen pro Anschlusspunkt, ohne Teilsicherheitsbeiwerte, betragen im ungefüllten Zustand (gerundet):

- Mittelschwer**:** $F_{M,u,c}$ = 5,03 kg/m * 4,75 m * 9,81 = **234 N**

$$F_{M,U,c} = 234\ N$$

- Schwer**:** $F_{H,u,c}$ = 6,19 kg/m * 4,75 m * 9,81 = **288 N**

$$F_{H,U,c} = 288\ N$$

Im gefüllten Zustand, unter der Annahme der Wasserwichte von 9,81 kN/m³, betragen die Einzellasten:

- Mittelschwer:
  - Radius = 53,1mm : 2 = 26,55 mm
  - Volumen Wasser = (A = πr²) x Rohrlänge
  - Vw = (0,0265 m)2 * 3.14 * 4,75 m = 0,0105 m³
  - Last Wasser: 0,0105 m³ * 9,81 kN/m³ = 0,103 kN = 103 N
  - Last insgesamt = 234 N + 103 N = 337 N

$$F_{M,G,c} = 337\ N$$

- Schwer**:**
  - Radius = 51,3mm : 2 = 25,65 mm
  - Vw = (0,0256m)2 * 3.14 * 4,75 m = 0,0098 m³
  - Last Wasser: 0,0098 m³ * 9,81 kN/m³ = 0,0963 kN = 96,3 N
  - FH,G,c = 288 N + 96,3 N = 384 N

$$F_{H,G,c} = 384\ N$$

Unter der Berücksichtigung eines Teilsicherheitsbeiwertes für ständige Lasten von 1,35 ergeben sich die Einzellasten zu:

[90] Vgl. APLIX GROUP 2023.
[91] Vgl. Pistohl 2009 1, B60-B63.

$$F_{M,U,d} = 316\ N$$

$$F_{H,U,d} = 389\ N$$

$$F_{M,G,d} = 455\ N$$

$$F_{H,G,d} = 519\ N$$

Somit ergibt sich die größte Einzellast als Zuglast durch ein Stahlrohr der mittelschweren Reihe unter Vollfüllung mit Wasser zu **519 N**.

Dies entspricht im Falle einer Klettfläche der Größe 10 cm x 10 cm (100 cm²), einer e**rforderlichen Zugfestigkeit von 5,2 N/cm².**

Klettprodukte, die eine geringere Zugfestigkeit besitzen, können alternativ in größeren Flächen, oder in kleineren Abhängungsabständen angebracht werden.

Berechnungsbeispiel: TGA-Lüftungskanal

Im Fall einer Lüftungsleitung wurde ein Extremfall mit einem 1000 x 1000 mm Rechteckkanal betrachtet. Die Annahme des Abstands bei horizontaler Leitungsführung orientiert sich an den Angaben von *Knauf GmbH*. Diese geben an, dass Lüftungskanäle geschossweise und maximal alle 5 m abgefangen werden müssen.[92]

Das Metergewicht wird für einen 1000 x 1000 mm Rechteckkanal mit 40mm Dämmung nach *Walraven* angenommen und beträgt 66,8 kg/m.[93]

Unter der Annahme einer Abhängung aller 5m, ergibt sich mit den oben genannten Parameter ein Gesamtgewicht von 334 kg, was einer Einzellast von 3275 N entspricht. Mit einem Teilsicherheitsbeiwert von 1,35 ergibt sich eine Gesamteinzellast von **4421 N Zuglast** pro 5m Rohrlänge. Dies entspricht im Falle einer Klettfläche der Größe 10 cm x 10 cm (100 cm²), einer erforderlichen Zugfestigkeit von **44,21 N/cm².**

Unter der Annahme eines **durchgehenden** Anschlusses mit Klett ergibt sich eine Linienlast von 884 N/m; sollte dieser durchgehende Klettanschluss eine Klettfläche mit der Breite von 10cm (und Länge von 500cm, also 5000 cm²) darstellen, spricht man von der erforderlichen Zugfestigkeit von **0,884 N/cm².**

Die Klettverbindung soll somit in der Lage sein, punktuell beispielsweise 519 N zu übertragen. Wie auch, bei einer linearen Befestigung 0,884 N/m.

Lebensdauer

Aus den oben dargestellten Anwendungssituationen lässt sich ableiten, dass für ein Erreichen des vollständigen Potentials über die gesamte Lebensdauer des Gebäudes hinweg, die Lebensdauer (Dauerhaftigkeit) der Klettfläche auf einem Stahlbeton- / Holzbauteil (Verbindungspartner 1) gleich der Lebensdauer dieses Stahlbeton- / Holzbauteils sein muss. Wie auch, dass die Lebensdauer der Klettfläche am montierten Objekt (Verbindungspartner 2, z.B. Rohrschelle) gleich diesem Objekt sein muss. Die Thematik Lebensdauer betrifft im Einzelnen somit folgende Elemente:

- die Beton- und Holzbauteile (konventionell oder in Form von „Klettbeton“ und „Klettholz“)

[92] Vgl. knauf GmbH, 1.
[93] Vgl. walraven GmbH, 3.

- die montierten Objekte (Ausbau, TGA)
- die industriellen Klettkomponenten (an den Beton- und Holzbauteilen / den montierten Objekten)
- die Klebeverbindung zwischen den industriellen Klettkomponenten und den Beton- und Holzbauteilen / den montierten Objekten

Grundsätzlich ist die Dauerhaftigkeit bzw. Lebensdauer von äußeren Einflüssen (wie Klima, Standort, Beanspruchung, Wartung bzw. Instandhaltung), sowie inneren Einflüssen (Material- oder systembezogene Parameter) abhängig. [94] Bei Beton betreffen die inneren Einflussfaktoren die Inhaltsstoffe (Zement, Gesteinskörnung, Zusatzmittel und -stoffe etc.). Zu den äußeren Faktoren zählen beispielsweise Temperatur, Feuchtigkeit und Verunreinigungen in Luft, Wasser und Boden, sowie Angriffe mechanischer, chemischer oder biologischer Natur. [95] In diesem Kontext erwähnen Stark, Wicht:

> „Die Dauerhaftigkeit lässt sich nicht durch einen einheitlichen Mess- oder Kennwert charakterisieren. Für jeden Anwendungsfall muss eine Quantifizierung der einzuhaltenden Parameter erfolgen.“ [96]

Die Abschätzung der Lebensdauer eines Bauteils und insbesondere einer Konstruktion welche aus Bauteilen und Einzelteilen besteht, wie in den Anwendungsfällen dargestellt, besitzt somit eine sehr hohe Komplexität. Da dies im Projekt, unter Beachtung aller (möglichen) Aspekte sowie innerer und äußerer Einflussfaktoren nicht behandelt werden konnte, wurde entschieden, die Lebensdauer der oben angeführten Einzelteile anhand von Erfahrungswerten zur Nutzungsdauer von Bauobjekten abzuschätzen. Dies erfolgte anhand der Publikation „Nutzungsdauerangaben von ausgewählten Bauteilen und Bauteilschichten des Hochbaus für den Leitfaden „Nachhaltiges Bauen““ aus dem Jahr 2008[97] welche, im Gegenzug zu neueren Publikationen (z.B.[98]), eine Abschätzung der gesamten Nutzungsdauer darstellt. Zur Ermittlung dieser Werte wurden folgende Quellen herangezogen:[99]

- Vorhandenes Wissen (Leitfaden Nachhaltiges Bauen, Untersuchungen des Schweizer Amts für Bundesbauten, Forschungsbericht F815 vom IFB, HdZ-Projekt 805785, Baustoffdaten-Ökoinventare (Uni Karlsruhe), Nutzungsdauerkatalog Landesverband Steiermark und Kärnten, www.bauteilkatalog.ch)
- Befragung von Expert*innen (Lehrstühle an deutschen Universitäten und Fachhochschulen mit den Fachgebieten Bauingenieurwesen, Architektur und Facility Management, Initiativpartner des Kompetenzzentrums „Kostengünstig, qualitätsbewusst Bauen“ Aussteller*innen auf internationalen Baufachmessen (Bau 2007 in Leipzig, Deubau 2008 in Essen) sowie Institute (z.B. DIN, DIBT), Planungsbüros, Wohnungsgesellschaften und Produkthersteller).

[94] Vgl. Kerz et al. 2008, 3.
[95] Vgl. Stark, Wicht 2013, 4.
[96] Ebd., 6–7.
[97] Kerz et al. 2008.
[98] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen 2017.
[99] Vgl. Kerz et al. 2008, 3–4.

Nutzungsdauer von Betonbauteilen und Kleben auf Beton

Für Stahlbetonbauteile können die nachfolgenden Werte angegeben werden.

Tabelle 3: Nutzungsdauern von Betonbauteilen[100]

Ebene I - Hauptgruppe	Ebene II - Untergruppe	Ebene III - Bereich	Ebene IV - Objekt / Material	Max (in Jahren)
Rohbau	Geschossdecken, Flachdachkonstruktionen	Massive Konstruktion	Vollbetondecke mit Betonstahlbewehrung, bekleidet oder innen	150
Rohbau	Außenwände - Tragschicht außen	Tragschicht, mehrschichtiger Wandaufbau	Beton	150
Rohbau	Außenwände - Tragschicht außen	Tragschicht, mehrschichtiger Wandaufbau	Leichtbeton	100
Rohbau	Innenwände - Tragschicht innen	Massivbauweise	Beton	150
Rohbau	Innenwände - Tragschicht innen	Massivbauweise	Leichtbeton	120

Die Nutzungsdauer von Fügemethoden mit Beton sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt. Hierbei ist anzunehmen, dass es sich beim „Anker in Betonbauteilen“ um ein in den Beton eingelegtes Stahlelement handelt, während die restlichen Elemente mittels Kleben gefügt werden.

Tabelle 4: Nutzungsdauern von Fügemethoden mit Beton[101]

Ebene I - Hauptgruppe	Ebene II - Untergruppe	Ebene III - Bereich	Ebene IV - Objekt / Material	Max (in Jahren)
Rohbau	Befestigungs- und Verbindungsmittel	Klebeverbindungen	Klebebewehrungen/Systeme	60
Rohbau	Befestigungs- und Verbindungsmittel	Anker in Betonbauteilen, innen	Stahl, nicht rostend	120
Rohbau	Befestigungs- und Verbindungsmittel	Klemmverbindungen	Schwerlastdübel/Systeme	60
	Folien und Kleber	Luftdichtigkeitsschicht-Dampfbremse	Kunststofffolien	50

[100] Vgl. Kerz et al. 2008, 8–22.
[101] Vgl. Ebd., 9–17.

Nutzungsdauer von Holzbauteilen und Kleben auf Holz

Die Nutzungsdauer von Holzbauteilen ist in nachfolgender Tabelle dargestellt, wobei sich eine ähnliche Nutzungsdauer wie bei Betonbauteilen zeigt.

Tabelle 5: Nutzungsdauern von Holzbauteilen[102]

Ebene I - Hauptgruppe	Ebene II - Untergruppe	Ebene III - Bereich	Ebene IV - Objekt / Material	Max (in Jahren)
Rohbau	Geschossdecken, Flachdachkonstruktionen	Massive Konstruktion	Massivholzdecken	150
Rohbau	Geschossdecken, Flachdachkonstruktionen	leichte Konstruktion	Holz-Balkendecke	120
Rohbau	Außenwände - Tragschicht außen	Holzmassivbauweise mit Bekleidung	Schichtholzbauweise	150
Rohbau	Außenwände - Tragschicht außen	Leichte Holzbauweise mit Bekleidung	Ständerbauweise	60
Rohbau	Außenwände - Tragschicht innen	Holzmassivbauweise	Brettschichtbauweise	150
Rohbau	Außenwände - Tragschicht innen	Leichte Holzbauweise	Rahmen-, Ständer-, und Tafelbauweise	60

Das in dieser Tabelle angeführte Brettschichtholz entsteht, indem Holzschichten in derselben Orientierung gestapelt und verleimt und somit miteinander verklebt werden. Bei Brettsperrholz erfolgte eine Verleimung von Schichten welche um 90° zueinander verdreht werden. Da bei diesen Bauteilen (siehe oben „Schichtholzbauweise“ und „Brettschichtbauweise“) eine Nutzungsdauer von 150 Jahren erreicht werden kann,[103] wird gefolgert, dass die Klebeschicht aus Leim diese Lebensdauer ebenso erreicht.

Nutzungsdauer von Klettprodukten, Objekten des Ausbaus und der TGA

Klettprodukte sind in unterschiedlichsten Ausführungen und für verschiedene Anwendungen existent. Die „Profile“ oder „Clips“ des Unternehmens *Gottlieb Binder GmbH & Co. KG* können laut Hersteller im Innen- und Außenbereich angewandt werden, besitzen eine hohe Lebensdauer, sind UV-, alterungs-, wasser- und chemikalienbeständig und können darüber hinaus schwerentflammbar ausgeführt werden.[104] Hierzu werden die Profile mit den Klettkomponenten und Produkten Pressotex® oder Duotec® und die Gegenstücke mit dem Produkt „Velour“ kombiniert. Mögliche Anwendungen betreffen die Befestigung von PV-Modulen auf Dächern, von Dämmungen auf

[102] Vgl. Kerz et al. 2008, 9–142.
[103] Vgl. Ebd., 9–142.
[104] Vgl. Gottlieb Binder GmbH & Co. KG 2023.

Dächern oder an Fassaden, von Dämmungen an Rohren der TGA oder von Lärm- oder Sichtschutzplatten im Innenausbau.[105]

Bei den Dämmschichten eines Wärmedämmverbundsystems kann mit einer maximalen Nutzungsdauer von 60 Jahren gerechnet werden.[106] Rohre der Trinkwasserversorgung (aus Kunststoff) besitzen eine Nutzungsdauer von 35 Jahren und Entwässerungsrohre aus PVC bis zu 50 Jahre.[107] Aus diesen Informationen wird gefolgert, dass Klettprodukte des Unternehmens *Gottlieb Binder GmbH & Co. KG* diese Lebensdauern vermutlich ebenso erreichen.

Das Produkt „DecoGrip“ von *APLIX S.A.* ist ein Klettverschlusssystem für Bodenverlegungen und Wandverkleidungen. Bodenbeläge aus Holzparkett besitzen eine maximale Nutzungsdauer von 70 Jahren, Natursteinbeläge von 100 Jahren und Teppiche von 20 Jahren.[108] Wandverkleidungen als Tapeten haben eine maximale Nutzungsdauer von 15 Jahren, Naturstein von 120 Jahren, Kunststoffe von 50 Jahren und keramische Fliesen (Steinzeug) von 90 Jahren.[109] Grundsätzlich besteht im Kontext der Lebensdauer somit ein breites Spektrum, wobei nicht mit Sicherheit gesagt werden kann, dass all diese Produkte für eine Montage mit „DecoGrip“ (Abbildung 38) gedacht sind.

Abbildung 38: DecoGrip[110]

Darüber hinaus ist auf das eingangs erwähnte Produkt „RigiMove“ von *SAINT-GOBAIN RIGIPS GmbH*[111] zu verweisen. Bei diesem Produkt ist die Klettverbindung Teil des Innenwandsystems. Für Gipskartonplatten in Innenwandsystemen (sowie als Deckenbekleidung) kann eine Nutzungsdauer

[105] Vgl. Gottlieb Binder GmbH & Co. KG 2023.
[106] Vgl. Kerz et al. 2008, 12–13.
[107] Vgl. Ebd., 130.
[108] Vgl. Ebd., 63–66.
[109] Vgl. Ebd., 67–69.
[110] APLIX S.A.
[111] Vgl. SAINT-GOBAIN RIGIPS GmbH 2024.

von 60 Jahren angegeben werden.[112] Eine Zeitspanne, welche von der Klettverbindung in diesem System somit ebenso erreicht werden muss. Da die Klettverbindung für eine Anwendung in der Regel auf die zu verbindenden Komponenten aufgeklebt wird, kann angenommen werden, dass die hier erwähnten Nutzungsdauerangaben auch auf die Klebstoffe zutreffen.

Aus diesen Punkten leitet das Projektteam ab, dass Klettprodukte theoretisch eine hohe Lebensdauer von bis zu 60 Jahren erreichen können.

Zusammenfassung

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass bei Beton- und Holzbauteilen (Geschossdecken) eine Nutzungsdauer von durchschnittlich 150 Jahren anzunehmen ist.[113] Die Nutzungsdauer von Kleben (Klebebewehrungen) auf Beton ist mit 60 Jahren angegeben.[114] Ob diese auch gleich der Nutzungsdauer von Betonbauteilen (150 Jahre) sein kann, konnte nicht festgestellt werden. Beim Baustoff Holz kann ein Kleben oder Leimen eine Nutzungsdauer von 150 Jahren erreichen, da dies der Nutzungsdauer von Schichtholzbauweise oder Brettschichtbauweise entspricht.[115]

Bei industriellen Klettprodukten, (ausgewählten) Objekten des Ausbaus und der TGA sowie für das Kleben von Klettprodukten wird eine Nutzungsdauer von 60 Jahren angenommen, welche der Nutzungsdauer der Dämmschichten eines Wärmedämmverbundsystems,[116] wie auch von Gipskartonplatten in Innenwandsystemen sowie als Deckenbekleidung entspricht.[117]

Bei Klettbeton und Klettholz wird angenommen, dass die Klettfläche der Lebensdauer der Bauteile entsprechen kann, somit 150 Jahre (sofern Beschädigungen vermieden werden).[118]

Die Nutzungsdauer und mögliche technische Lebensdauer des Gesamt-Klettverbindungssystems wird somit grundsätzlich als hoch eingeschätzt. Da industrielle Klettprodukte jedoch noch nicht so lange im Bauwesen eingesetzt werden, kann keine genaue Zahl genannt werden. Auch fehlt Kenntnis zum Verhalten der industriellen Klettverbindung im eingebauten Zustand im Bauwesen. Um Erkenntnisse zu diesem Verhalten unter definierten Feuchte- und Temperaturzyklen zu gewinnen, wurde im Projekt ein Versuchsaufbau in einer Klimakammer entwickelt und umgesetzt. Die Ergebnisse und andere Themen sind im nachfolgenden Kapitel dargestellt.

[112] Vgl. Kerz et al. 2008, 73–78.
[113] Vgl. Kerz et al. 2008, 8–9.
[114] Vgl. Ebd., 9.
[115] Vgl. Ebd., 11–22.
[116] Vgl. Ebd., 12–13.
[117] Vgl. Ebd., 73–78.
[118] Vgl. Ebd., 8–9.

5.2. Klettverbindungssystem

Das Klettverbindungssystem beschreibt die oben dargestellte Schnittstelle, die Deckenplatte (aus Beton oder Holz) hin zur technischen Gebäudeausrüstung und Objekten des Ausbaus. An dieser Schnittstelle wurde eine „Standardausführung“ des Verbindungssystems untersucht, indem herkömmliche industrielle Klettkomponenten (Bahnen mit Schlaufenkomponenten) auf Rohbauteile aufgebracht werden. Als Verbindungspartner oder Gegenstück dienen industrielle Klettkomponenten, welche auf Montagemittel, auf Objekte des Ausbaus oder der technischen Gebäudeausrüstung aufgebracht werden.

Zudem wurde eine innovative Ausführung behandelt, wobei Klettkomponenten direkt aus Rohbaustoffen hergestellt werden. Wodurch ein monomaterielles Bauteil mit klettfähiger Oberfläche entsteht. Als Verbindungspartner dienen Klettkomponenten, welche sich an industriellen Produkten orientieren, jedoch hinsichtlich Skalierung, Geometrie und Materialeigenschaften an die Klettkomponenten aus Rohbaustoffen angepasst sind. Ergänzend wurde die Herstellung einer Klettverbindung aus Papierwerkstoffen untersucht.

5.2.1. Industrielle Klettkomponenten

Abbildung 39: Betonbauteil, Klebeschicht, industrielle Klettkomponente und TGA-Element (IAT)

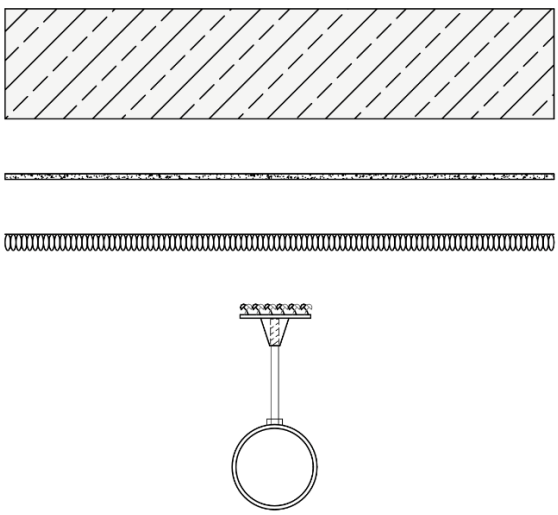
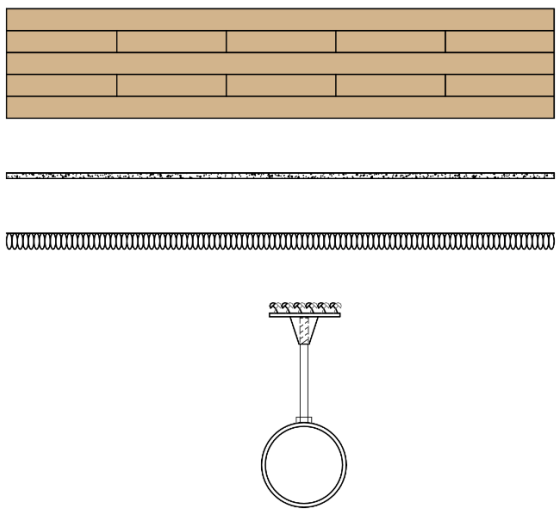


Abbildung 40: Holzbauteil, Klebeschicht, industrielle Klettkomponente und TGA-Element (IAT)



Bei der hier dargestellten „Standardausführung“ des Klettverbindungssystems wird vorgeschlagen, industrielle Klettkomponenten mittels Kleben auf die Oberfläche von herkömmlichen Beton- (Abbildung 39) oder Holzbauteilen (Abbildung 40) aufzubringen. Dies erfolgt großflächig, in Bahnen oder in Form eines Rasters. Die Methode des Aufklebens wurde gewählt, da dies eine Anwendung im Rahmen der Vorfertigung, auf Baustellen vor Ort und auch bei der Sanierung ermöglicht. Wie auch dem Stand der Technik des Aufbringens von Klettkomponenten entspricht.

Betonbauteile

Als Betonbauteile bestehen Deckenplatten (Massiv oder z.B. Hohldielen), aber auch Außen- und Innenwände sowie Stützen und Träger. Wobei herkömmliche und weit verbreitete Betonarten angedacht sind wie z.B. Normalbeton mit einer Festigkeit von C25/30, wodurch die Anwendbarkeit möglichst breit gehalten wird. Die Verbindung zwischen Betonbauteil und der Klettkomponente erfolgt wie erwähnt durch Kleben. Hierzu wird die Komponente im Werk mit Kleber bestrichen, auf ein fertig hergestelltes Halbfertigteil oder Fertigteil aufgebracht und mit einem entsprechenden Gewicht, z.B. durch das Eigengewicht der Bauteile, belastet. Eine weitere Möglichkeit bildet das Einlegen der Schlaufenkomponente in die Schalung und somit ein Verkleben infolge des Aushärteprozesses des Betons, was im Rahmen der Vorfertigung oder auch bei der Herstellung von Ortbeton auf der Baustelle denkbar ist. Dieses Thema wurde im Rahmen des Vorgängerprojektes „Klett-TGA“ grundlegend behandelt,[119] hier jedoch nicht weiterverfolgt, da mit diesem Verfahren nur neue Bauteile hergestellt werden können.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Klettkomponenten vor Ort auf die fertig hergestellten Bauteile (Neubau) oder auf bestehende Rohbauteile (Sanierung) aufzukleben. Hierzu kann der Kleber mittels Walzen (aufrollen) auf saubere Bauteile aufgebracht und die Klettkomponente anschließend angepresst werden. Wobei ein gleichmäßiger Anpressdruck aufzubringen ist. Dies wäre beispielsweise erneut durch Walzen (wenn nur kurzfristiger Druck erforderlich ist) oder durch teleskopierbare Schalungen möglich. Diese Schalungen bilden horizontale Flächen, auf welchen die Klettkomponenten zuerst positioniert und anschließend an die Bauteile gepresst würden. Hierbei ist zu erwähnen, dass einzelne Bahnen generell einfacher herzustellen sind als vollflächige Klettflächen, welche bspw. eine gesamte Deckenuntersicht umfassen. Was das Potential der Klettverbindung in linearen Bereichen mit hohem Installationsgrad, wie beispielsweise im Gangbereich, betont.

Holzbauteile

Als Holzbauteile sind erneut Deckenplatten (z.B. Brettsperrholz), aber auch Außenwände (z.B. Rahmen- oder Massivbauweise), Innenwände sowie Stützen und Träger angedacht. Grundsätzlich können alle herkömmlichen Bauteile mit entsprechender Fläche mit einer Klettkomponente ausgestattet werden. Hierzu ist besonders beim Holzbau die Vorfertigung hervorzuheben. Da beim Fertigungsprozess von Bauteilen aus mehreren Holzschichten, wie z.B. Brettsperrholz (BSP 200 5s), bereits ein Positionieren und Verkleben der einzelnen Elemente erfolgt, ist es naheliegend, bei diesem Prozess eine Klettkomponente als finale Oberfläche einzulegen. Auch, da dieses Verfahren im Zuge des Furnierens von Plattenwerkstoffen den Stand der Technik widerspiegelt und Erfahrungswissen besteht.

Wie Betonbauteile können auch Holzbauteile im Zuge einer Sanierung oder des Neubaus direkt vor Ort mit Klettkomponenten ausgestattet werden. Wobei dieselben Verfahren wie bei Betonbauteilen (Aufrollen oder teleskopierbare Schalungen) angewandt werden könnten. Denkbar wäre zudem das kurzfristige Aufschrauben solcher Schalungen bis der Kleber ausgehärtet ist. Oder das Aufschrauben von Holzwerkstoffplatten mit aufgeklebter Klettfläche als finale Bauteiloberfläche.

Industrielle Klettkomponente

Das bei dieser Ausführung und den oben dargestellten Anwendungssituationen anzuwendende Klettprodukt wurde gemeinsam mit dem Unternehmen *APLIX S.A.* definiert. Neben bautechnischen

[119] Vgl. Riewe et al. 2018.

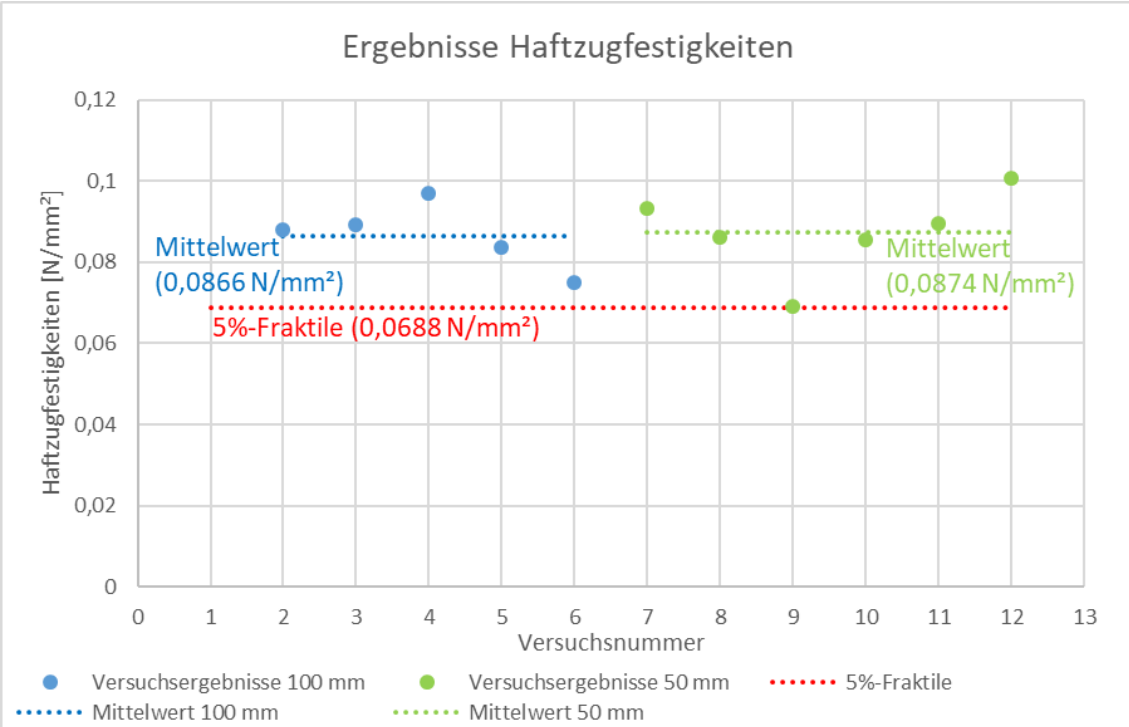
Anforderungen (Lastübertragung, potentielle Nutzungsdauer) wurden das gegenwärtige Anwendungsgebiet des Produktes wie auch die Kosten (Konkurrenzfähigkeit mit bestehenden Befestigungsprodukten im Bauwesen) beachtet. Daraus wurden drei Produkte oder Klettsysteme ausgewählt. Das Schlaufenprodukt „aplix® 800“ in Kombination mit dem Hakenprodukt „aplix® 803“ und mit den Pilzkopf-Klettprodukten „aplix® 220“ und „aplix® 224“.

Wie oben erwähnt, wurden für Erkenntnisse zur Bauanwendung, dem Einfluss von Temperatur auf die Haftzugfestigkeit sowie zum Verhalten der Klettverbindung unter definierten Feuchte- und Temperaturzyklen Versuche durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuche sind nachfolgend dargestellt.

Versuchsergebnisse

Anhand der **Vorversuche** konnte für das Klettprodukt aplix® 800 mit aplix® 803 (eine Kombination aus Haken- und Schlaufenkomponente) eine durchschnittliche Haftzugfestigkeit von 0,087 N/mm² festgestellt werden. Wie sich zudem zeigt, ist bei den Versuchskörpern mit kleinerer Klettfläche (Abbildung 41 grün) eine größere Streuung sichtbar als bei jenen mit größerer Klettfläche. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Störstellen eine größere Auswirkung auf das Ergebnis haben, je kleiner die betrachtete Fläche ist. Die Mittelwerte der beiden Verbindungsgrößen sind, bis auf statistische Abweichungen, gleich groß.

Abbildung 41: Versuchsergebnisse der Vorversuche inkl. 5%-Fraktile [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz]



Bei allen Versuchskörpern konnte beobachtet werden, dass nach Erreichen der Maximallast das Versagen von einer Seite des Kletts ausgeht und sich bei zunehmendem Weg und Abnehmen der Kraft bis auf die andere Seite fortpflanzt. Zur Veranschaulichung ist nachfolgend ein Versuchskörper

bei voranschreiten des Versagens dargestellt siehe Abbildung 42. Es gilt zu erwähnen, dass zum Zeitpunkt der Aufnahme noch eine Resttragfähigkeit von 350 N (51% der Maximallast) gegeben war.

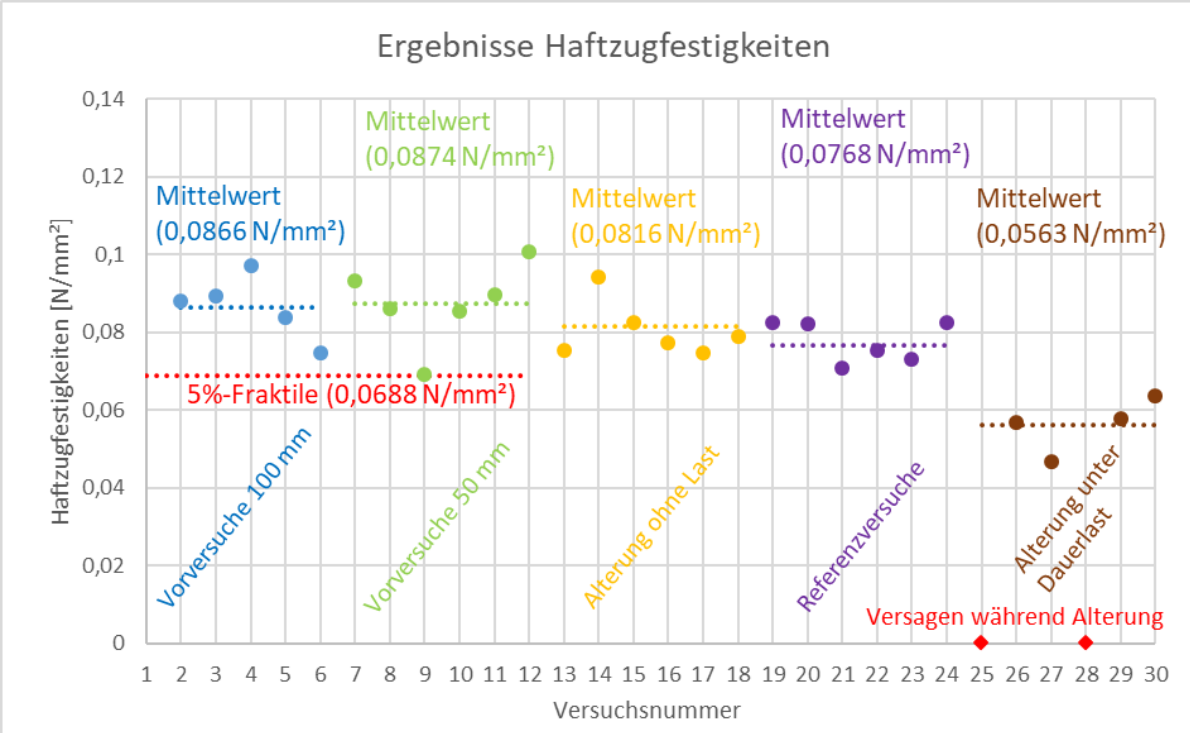
Abbildung 42: Zugversuch Durmesser 100mm (Resttragfähigkeit 350N) [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz]

Ergebnisse „Alterung unter Dauerlast Serie 1“

Grundsätzlich zeigen die in dieser Serie getesteten Klettverbindungen das gleiche Tragverhalten wie die Klettverbindungen der Vorversuche, jedoch werden geringere Haftzugfestigkeiten ersichtlich (siehe Abbildung 43). Ob diese Verringerung aus Alterungseffekten, dem leicht abgeänderten Versuchsaufbau oder aus der Lagerung unter Druckspannung resultieren, konnte nicht festgestellt werden. Es zeigt sich, dass die ohne Last gealterten Versuchskörper keine Verschlechterung des Tragverhaltens gegenüber den Referenzversuchen aufweisen. Während die Versuchskörper welche unter Dauerlast gealtert wurden, eine deutlich geringere Tragfähigkeit aufweisen. Zwei der sechs Versuchskörper haben bereits während der Alterung versagt (1 x Holz und 1 x Beton). Diese wurden in der Mittelwertberechnung nicht berücksichtigt.

Da die Versuchskörper mit einer deutlich langsameren Belastungsgeschwindigkeit getestet wurden (manuelle Erhöhung der Last in 0,5 kg Schritten) ist ein Vergleich der Traglasten nur bedingt möglich.

Abbildung 43: Gegenüberstellung aller gemessenen Haftzugfestigkeiten in Versuchsserie 1 [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz]



Wie bereits in den Vorversuchen konnte auch in diesen Versuchen beobachtet werden, dass das Versagen der Klettverbindung immer an einer Seite beginnt und sich dann zur anderen Seite hin fortpflanzt. Beim nachfolgend dargestellten Versuchskörper wurde der Versuch bei Maximallast und nach Abfall der Traglast auf 50% gestoppt und fotografiert (siehe Abbildung 44 und Abbildung 45). Dabei ist zu erkennen, dass bereits bei Erreichen der Höchstlast in Teilbereichen die einzelnen Verbindungspunkte fast vollständig gelöst war. Nur noch einzelne Haken des gelösten Bereichs übertrugen Kräfte.

Abbildung 44: Klettverbindung bei Erreichen der Haftzugfestigkeit [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz]

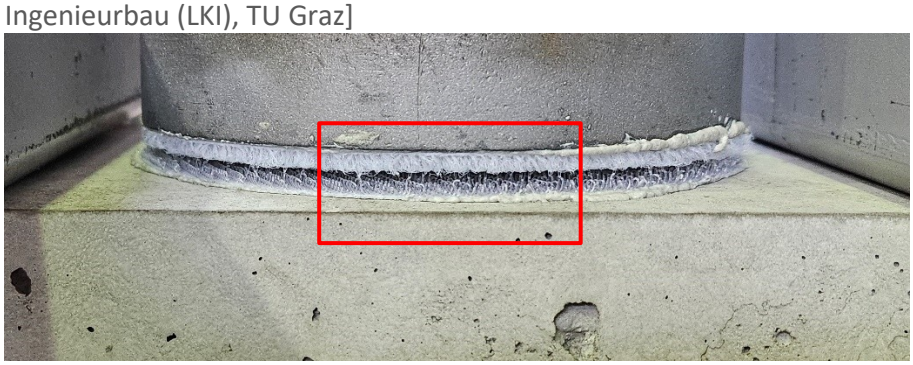
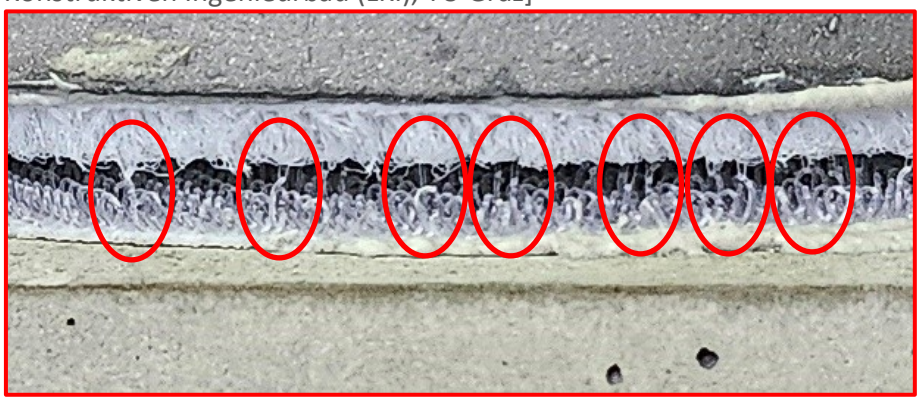
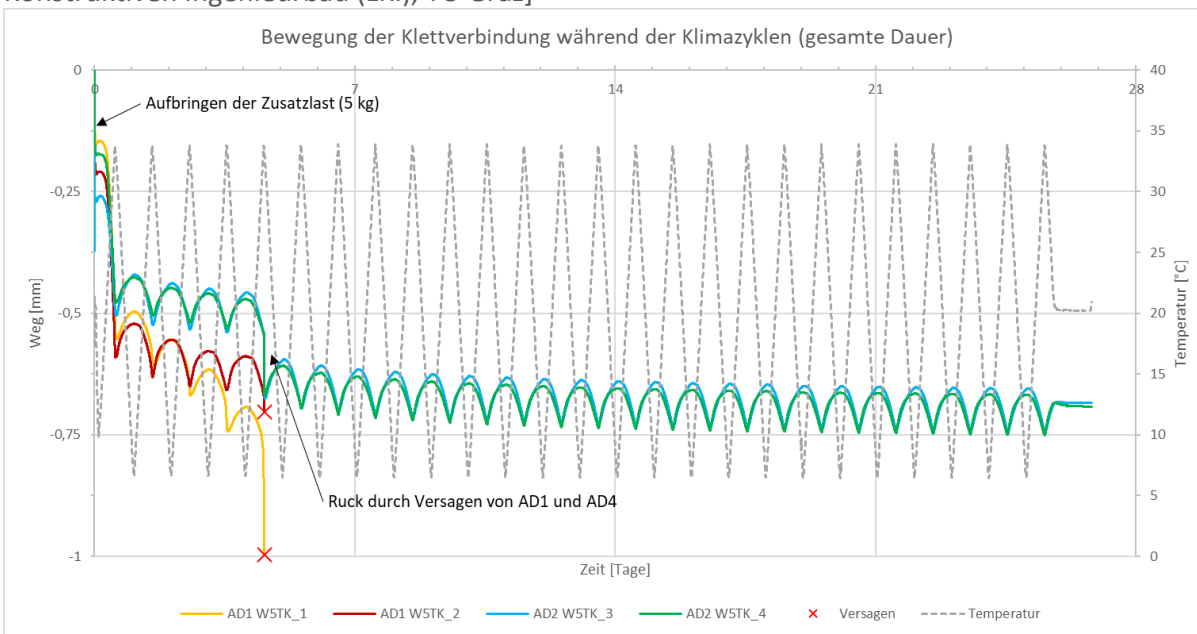


Abbildung 45: Klettverbindung bei Erreichen der Haftzugfestigkeit, Detail [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz]



Anhand der Messergebnisse der Alterungsversuche unter Dauerlast kann festgehalten werden, dass vor allem die warmen feuchten Phasen der Klimazyklen große Auswirkungen auf die Klettverbindung haben. Insbesondere die erste warme Phase führt zu großen bleibenden Verformungen der Klettverbindung. Bei den nachfolgenden warmen Phasen nimmt die bleibende Verformung weiter zu, jedoch bei jeder warmen Phase weniger als in der Phase davor (siehe Abbildung 46).

Abbildung 46: Bewegung der Klettverbindung während der Klimazyklen [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz]



An den Messdaten des Versuches AD1 lässt sich erkennen, dass der Wegsensor W5TK_1 eine Seite der Klettverbindung aufzeichnet, welche sich nicht stabilisiert, sondern die Verformung mit jedem Zyklus (ab Zyklus 2) weiter exponentiell zunimmt (siehe Abbildung 46). Dies führt zu einer stark einseitigen Belastung des Kletts und schließlich zum Versagen. Das einseitig stark verformende Verhalten lässt darauf schließen, dass sich nur wenige Haken der weicheren / schwächeren Seite mit dem Flausch verbunden sind. Und diese sich durch das Weicher-Werden bei steigender Temperatur

und der hohen Spannung (auf einzelnen Haken) lösen. Dies führt dazu, dass die Spannung in den verbleibenden Haken erhöht wird (gleiche resultierende Kraft auf weniger Haken) und diese sich beim nächsten Erwärmungszyklus lösen.

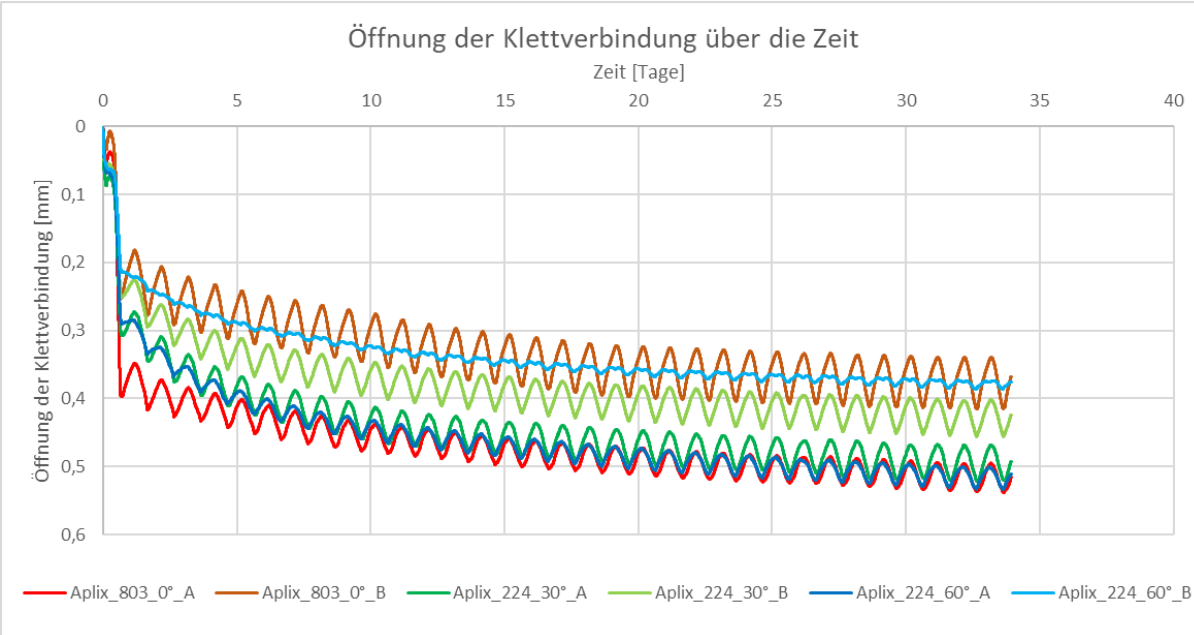
Im Gegensatz dazu zeigt der Versuchskörper AD2 ein konträres Verhalten. Die beiden Seiten der Klettverbindung sind nach dem Belasten unterschiedlich weit verformt und gleichen sich während der ersten warmen Phase aneinander an. So entsteht eine gleichmäßige Verteilung der Spannungen in der Klettverbindung.

Ergebnisse „Alterung unter Dauerlast Serie 2“

Das Verhalten der zwei untersuchten Klettverbindungen (aplix® 803 und aplix® 224 jeweils mit aplix® 800) entspricht jenem Verhalten, welches bereits in Serie 1 festgestellt werden konnte. In den warmen Phasen der Klimazyklen kommt es zu größeren Verformungen (Öffnen) der Klettverbindung, welche sich in den kalten Phasen teilweise wieder schließen. Wobei die bleibende Differenzverformung zwischen Öffnen und Schließen mit jedem Klimazyklus geringer wird. Erneut konnte festgestellt werden, dass in der ersten warmen Phase der Großteil der bleibenden Verformungen auftritt.

Die Verformung der Versuchskörper während der Klimazyklen ist in Abbildung 47 dargestellt. Die Bezeichnungen A und B beschreiben die beiden gegenüber positionierten Wegaufnehmer auf einem Versuchskörper. Die angegebenen Werte sind bereits mit Hilfe der Referenzmessung kalibriert um den Einfluss der Temperatur auf die Wegmessung zu kompensieren. In den Kurzzeitversuchen konnte beobachtet werden, dass das Versagen der Klettverbindung immer von einer Seite ausgeht und durch die damit verbundene Schrägstellung eine unterschiedlich große Verformung an zwei gegenüberliegenden Seiten auftritt. Es wird daher angenommen, dass dieses Verhalten dafür verantwortlich ist, dass die beiden Wegaufnehmer auf den Versuchskörpern unterschiedliche Werte liefern.

Abbildung 47: Bewegung (Öffnung) der Klettverbindungen während der Klimazyklen [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz]



Nach den Dauerlastversuchen unter künstlicher Alterung mittels Klimazyklen wurden die Versuchskörper auf ihre Haftzugfestigkeit geprüft. Die Versuchsergebnisse sind in Tabelle 6 zusammengefasst. Zusätzlich sind die Mittelwerte der Temperaturversuche (siehe Kapitel unten) der gleichen Orientierungen angeführt. Beim Versuchskörper 224_30°_3 kam es zu einem technischen Fehler der Prüfmaschine.

Tabelle 6: Haftzugfestigkeiten nach Dauerlast und künstlicher Alterung [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz]

Klett	Orientierung	Nr.	Haftzugfestigkeit	Mittelwert	Referenz (Temperaturversuche)
224	30°	1	16,9 N/cm²	20,0 N/cm²	24,7 N/cm²
		2	23,1 N/cm²		
		3	-		
	60°	1	20,3 N/cm²	20,2 N/cm²	23,8 N/cm²
		2	23,8 N/cm²		
		3	16,6 N/cm²		
803	0°	1	3,0 N/cm²	4,5 N/cm²	6,9 N/cm²
		2	4,6 N/cm²		
		3	6,0 N/cm²		
	90°	1	6,0 N/cm²	4,6 N/cm²	6,9 N/cm²
		2	4,7 N/cm²		
		3	3,1 N/cm²		

Wie ersichtlich wird, sind die Haftzugfestigkeiten der Versuchskörper nach einer Dauerlast in Kombination mit den Klimazyklen deutlich geringer als bei den unvorbelasteten Proben der Temperaturversuche. Es ist daher davon auszugehen, dass die Dauerlast in Kombination mit den Klimazyklen (künstliche Alterung) zu einer Abnahme der Haftzugfestigkeit führt.

Die Ergebnisse der Haftzugversuche der Dauerlastversuche ohne Klimazyklen sind in der nachfolgenden Tabelle 7 zusammengefasst. Im Vergleich zu den Dauerlastversuchen mit künstlicher Alterung der Serie 1, siehe oben Abbildung 43, (Mittelwert = 5,63 N/cm²) haben die Versuchskörper ohne künstliche Alterung (Mittelwert = 5,42 N/cm²) eine etwas geringere Haftzugfestigkeiten erreicht. Auf Grund der unterschiedlichen Testmethoden können diese geringen Unterschiede der Haftzugfestigkeiten nicht zielsicher interpretiert werden.

Tabelle 7: Ergebnisse der Haftzugversuche der Dauerlastversuche ohne Klimazyklen [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz]

VK	Haftzugfestigkeit	Mittelwert
D1	5,62 N/cm²	5,42 N/cm²
D2	5,29 N/cm²	
D3	5,49 N/cm²	
D4	5,07 N/cm²	
D5	5,38 N/cm²	
D6	5,67 N/cm²	

Abschließend kann somit nicht beurteilt werden, ob die künstliche Alterung einen Einfluss auf die Haftzugfestigkeit hat oder ob nur die Dauerlast für die geringere Haftzugfestigkeit, im Vergleich zu unbelasteten Versuchskörpern, verantwortlich ist.

Bauanwendungsversuche

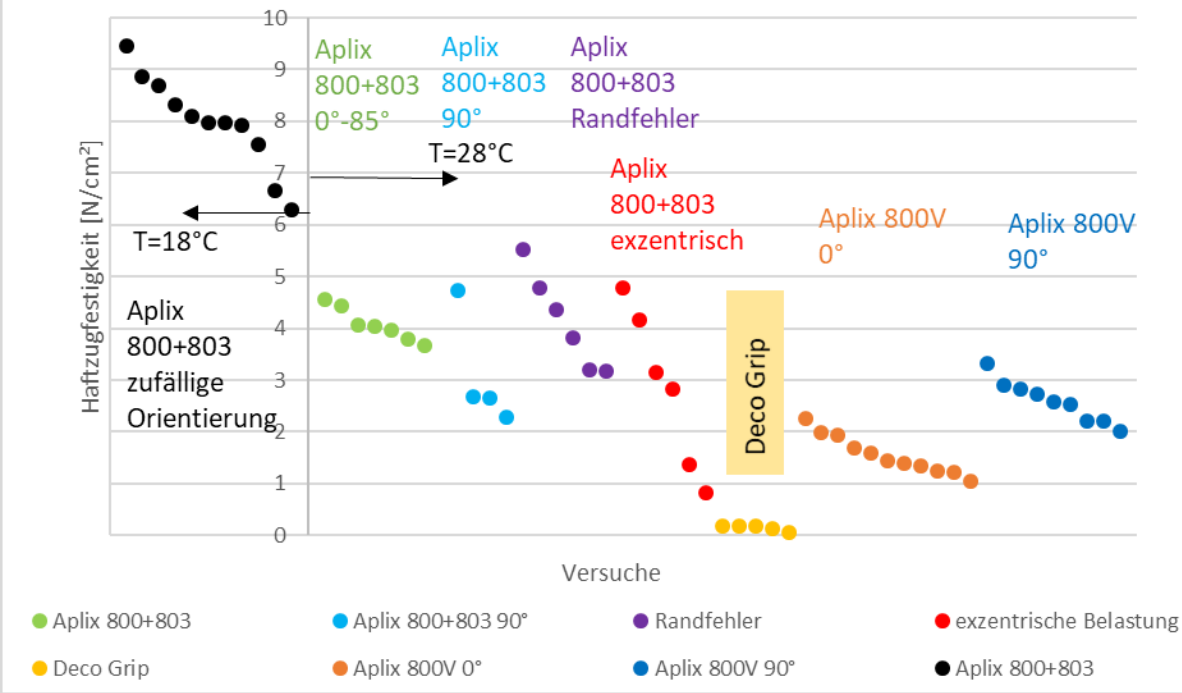
Bei den Versuchen mit **exzentrischer Belastung** konnte festgestellt werden, dass die Ergebnisse stärker Streuen als bei den anderen getesteten Parametern. Bei höherer Exzentrizität (> 1/20 der Klettabmessung) ist mit einer deutlichen Abnahme der Festigkeit zu rechnen. Versuche mit 5 mm Exzentrizität weisen eine Abnahme von ca. 10% der Haftzugfestigkeit auf.

Bei der Betrachtung des **Randfehlers** hat sich herausgestellt, dass größere Randfehler zu höheren Festigkeiten (verglichen mit den Referenzversuchen) führten. Dies ist vermutlich auf die Druckbelastung beim Schließen des Kletts zurückzuführen, da durch die kleinere Fläche höhere Druckspannungen auftreten und damit mehr Haken und Schlaufen verbunden werden.

Hinsichtlich der **Orientierung** zeigen die Versuchsergebnisse, dass jene Versuchskörper mit 90° höhere Haftzugfestigkeiten aufweisen als jene mit 0° Orientierung. Bis auf einen Versuchskörper liegen alle Versuche mit 0° Orientierung unterhalb der schlechtesten Versuchskörper mit 90° Orientierung.

In Abbildung 48 sind die Ergebnisse der Bauanwendungsversuche zusammengefasst. Wie ersichtlich wird, konnte in den Versuchen mit der Klettkombination aplix® 800+803 eine Abhängigkeit der Haftzugfestigkeit von der Orientierung des Klettverschlusses festgestellt werden. Auch bei stark exzentrischen Lasten kann es zu einer deutlichen Abnahme der Haftzugfestigkeit kommen. Zusätzlich konnte festgestellt werden, dass die Produkte aplix® 800V und DecoGrip geringere Haftzugfestigkeiten aufweisen als das Referenzprodukt aplix® 800+803 (und im Projekt daher nicht weiterverfolgt wurden).

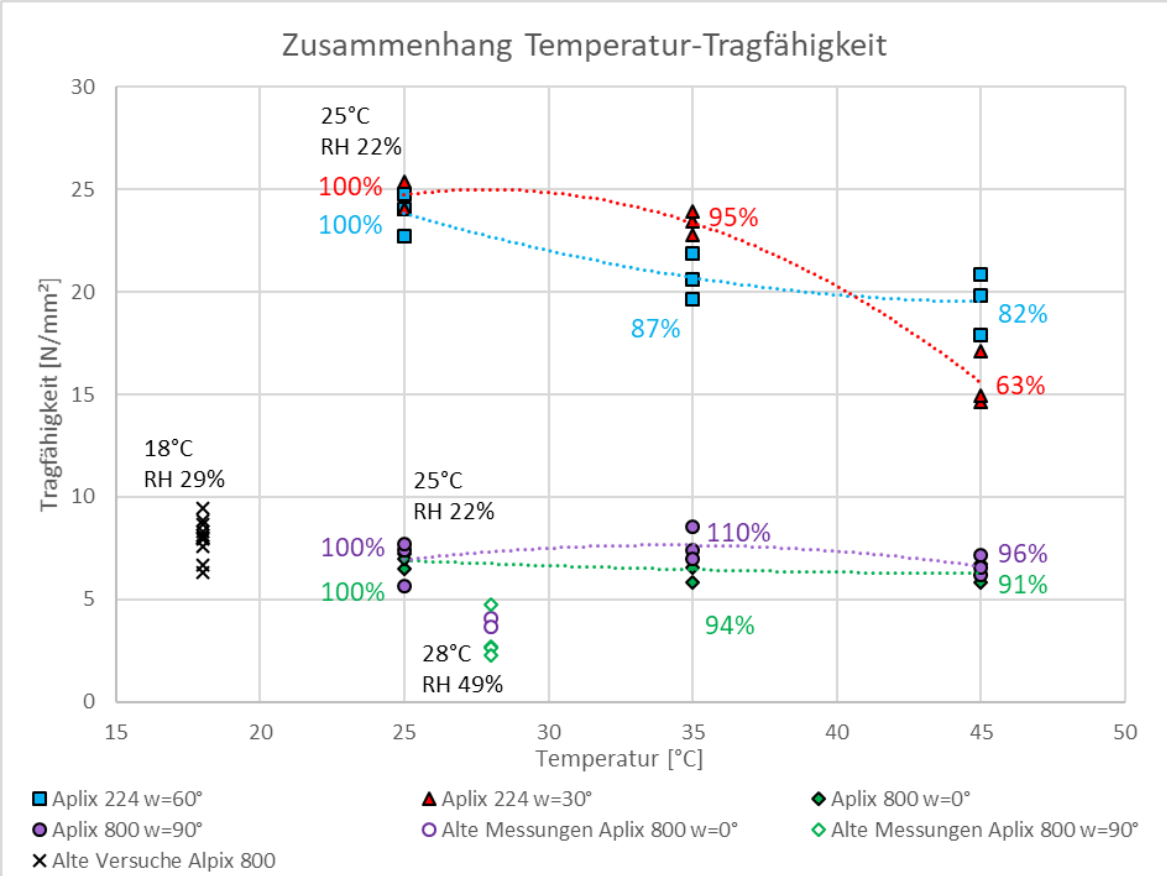
Abbildung 48: Ergebnisse Bauanwendungsversuche [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz]



Temperaturversuche

In Abbildung 49 sind die Versuchsergebnisse dargestellt. Für alle Versuchsreihen ist die Trendlinie der Mittelwerte eingezeichnet. Für jede Temperatur wird der Mittelwert aus den 3 Versuchskörpern auch relativ zur Haftzugfestigkeit bei 25°C angegeben. Für einen besseren Überblick sind auch die Versuchsergebnisse der Alterungsversuche („Alte Versuche aplix® 800“) und der Orientierungsversuche („Alte Messungen aplix® 800 w=0° und w=90°“) in diesem Diagramm dargestellt.

Abbildung 49: Ergebnisse Zusammenhang Temperatur-Tragfähigkeit[Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz]



Bei aplix® 800 (+803) kann ein leichter Abfall der Haftzugfestigkeit bei steigender Temperatur beobachtet werden. Wobei auf Grund der geringen Anzahl der Versuchskörper nicht mit Sicherheit festgestellt werden kann, ob die erhöhte Tragfähigkeit des 90° orientierten aplix® 803 unter T=35°C wirklich höher ist als bei Raumtemperatur oder ob dies nur auf Grund eines Ausreißers so wirkt. Bei beiden Orientierungen ist unter T=45° die Tragfähigkeit niedriger als bei Raumtemperatur, jedoch immer noch deutlich höher als die im Rahmen der Orientierungsversuche (Alte Messungen aplix® 800 w=90° und w=0°) ermittelte Haftzugfestigkeit. Es ist daher davon auszugehen, dass nicht die Temperatur für die geringe Haftzugfestigkeit der Orientierungsversuche (Alte Messungen aplix® 800 w=90° und w=0°) verantwortlich ist, sondern möglicherweise die Luftfeuchtigkeit oder ein anderer bislang unbekannter Faktor. Mit den Haftzugfestigkeiten der Alterungsversuche (Alte Versuche aplix® 800) lassen sich die ermittelten Werte gut in Einklang bringen, denn sie liefern leicht höhere Tragfähigkeiten bei geringerer Temperatur.

Anhand der Ergebnisse von aplix®224 kann festgestellt werden, dass für dieses Produkt das Verhalten bei höheren Temperaturen von der Orientierung abhängig ist. Während bei 60° Orientierung der Temperaturanstieg von 25°C auf 35°C einen deutlichen Einfluss auf die Haftzugfestigkeit zeigt, reagieren die Versuchskörper mit 30° Orientierung weniger stark auf die Temperaturänderung, allerdings reagiert dieser viel stärker auf den Temperaturanstieg von 35°C auf 45°C. Der starke Abfall des aplix® 224 unter 30° Orientierung ist als problematisch für bautechnische

Anwendungen zu sehen. Dieses Produkt sollte daher nur in kontrollierten Klimabedingungen verwendet werden oder hinsichtlich Haftzugfestigkeit überdimensioniert werden.

Das konträre Verhalten der beiden Orientierungen beim aplix® 224 lässt den Schluss zu, dass es möglicherweise auch beim aplix® 803 Orientierungen gibt, welche sich in ihrem Verhalten bei höheren Temperaturen deutlich von den geprüften Orientierungen unterscheiden.

Die in den Orientierungsversuchen ermittelte Differenz der Haftzugfestigkeiten der geprüften Orientierungen konnte für beide Klettprodukte nicht bestätigt werden. Bei beiden Klettprodukten sind die Haftzugfestigkeiten der zwei geprüften Orientierungen (beste und schlechteste Orientierung laut Orientierungsversuchen) in etwa gleich groß.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der durchgeführten Versuche konnten neue Erkenntnisse zum Tragverhalten von Klettprodukten gewonnen werden.

In allen durchgeführten Versuchen konnte ein **duktiles Tragverhalten** des Kletts festgestellt werden. Vor allem die großen Verformungen die der Klett aufnehmen kann, sind für bautechnische Anwendungen ideal, da dadurch ein Ankündigen des Versagens gewährleistet ist und in vielen Anwendungsfällen eine **Lastumlagerung** ermöglicht wird. Die möglichen Verformungen sind dabei stark von der Größe (Höhe) der Haken bzw. Pilzköpfe und Schlaufen abhängig. Dies stellt ein Projekthighlight dar.

Nachfolgend sind für die bautechnisch relevanten Klettprodukte die erreichten Haftzugfestigkeiten in allen durchgeführten Versuchen zusammengefasst.

Haftzugfestigkeiten:

- aplix® 803+800 2,3 - 9,4 N/cm²
- aplix® 800V 1,1 - 3,3 N/cm²
- aplix® 220+800 3,6 - 6,3 N/cm²
- aplix® 224+800 22,7 - 34,5 N/cm²
- DecoGrip 0,13 - 0,19 N/cm²

Im Hinblick auf die oben bei den Anwendungsfällen definierten möglichen Belastungen (Befestigung eines Rohres oder eines Lüftungskanals) resultieren die nachfolgenden Verbindungsflächen für ausgewählte Klettsysteme. Wobei jeweils der geringere Wert der Haftzugfestigkeit herangezogen und die notwendige Fläche zusätzlich verdoppelt wurde, um einen Sicherheitsfaktor abzubilden.

Tabelle 8: Verbindungsflächen Klettprodukte [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]

TGA-Element	Last [N]	aplix® 803/800 [cm²]	aplix® 220/800 [cm²]	aplix® 224/800 [cm²]
Stahlgewinderohr	519	452	288	46
Lüftungskanal (Extremfall)	4421	3844	2456	390

Um ein Stahlgewinderohr mit der Kombination aplix® 803/800 zu befestigen, würde somit eine Verbindungsfläche in den Größen von 22 cm x 22 cm benötigt werden. Während bei der Kombination aplix® 224/800 eine Fläche von 7 cm x 7 cm ausreichen würde. Für die Befestigung des Lüftungskanals (im Extremfall) würde die Kombination aplix® 803/800 eine Fläche von 70 cm x 70 cm und die Kombination aplix® 224/800 eine Fläche von 20 cm x 20 cm erfordern.

Die Form der verhakenden Komponente beeinflusst die Tragfähigkeit sowie das Verhalten unter Dauerlast maßgeblich. In den Versuchen konnten **Pilzköpfe mit Widerhaken** (aplix® 224) die größte Haftzugfestigkeit erreichen.

In den Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass sowohl die **Orientierung** der beiden Klettkomponenten zueinander als auch die **Temperatur** einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf die Haftzugfestigkeit des Kletts haben. Der Einfluss der beiden Faktoren ist je nach Klettprodukt unterschiedlich stark ausgeprägt.

Größere **Exzentrizitäten** der Lasteinleitung führen auf Grund der einseitigen Belastung des Kletts zu einer Reduktion der Haftzugfestigkeit (bezogen auf die gesamte Klettfläche). Auch kleinere Exzentrizitäten (1/20 der Klettabmessung) hatten in den Versuchen schon eine reduzierende Wirkung auf die Haftzugfestigkeit.

Aus Zeitgründen konnten folgende Einflussfaktoren nicht geprüft werden, könnten aber nach dem gewonnenen Wissensstand einen Einfluss auf die Haftzugfestigkeit der Klettverbindung haben:

- Luftfeuchtigkeit
- Produktionscharge
- Alter des Produktes (zum Beispiel lange Lagerzeiten)

Das Versagen von zwei der sechs Versuchskörper der Dauerlastversuche unter künstlicher Alterung (Klimazyklen) konnte nicht reproduziert und somit auch nicht nachvollziehbar erklärt werden. Denkbar wäre ein stark von der Kombination Orientierung und Temperatur abhängiges Verhalten des Kletts (aplix® 803+800) wie es beim Pilzkopfprodukt aplix® 224+800 festgestellt werden konnte. Für eine solche Überprüfung wäre ein Versuchsprogramm mit sehr engen Abstufungen der Orientierungen erforderlich.

Die Ursache für globale Differenz der Haftzugfestigkeiten zwischen den Versuchsserien 1 und 2 der der Dauerlastversuche unter künstlicher Alterung (gleiche Klettrolle) konnte im Rahmen der Untersuchungen nicht gefunden werden. Da die Versuche in unterschiedlichen Jahreszeiten durchgeführt wurden, wäre ein klimatischer Einfluss (z.B.: Luftfeuchtigkeit) oder Alterungseffekte (ca. 7 Monate Unterschied) denkbar. Aus Zeitgründen konnte jedoch nur der Temperatureinfluss getestet werden, welcher sich nicht als der maßgebende Einflussfaktor erwiesen hat.

5.2.2. Bauteile als Klettkomponenten

Abbildung 50: Konzept „Klettbeton“ (Neubau)

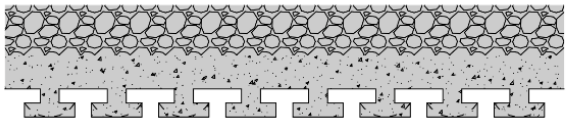
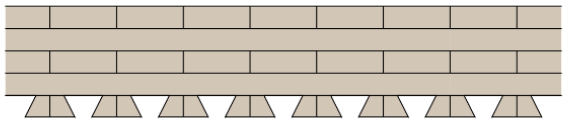


Abbildung 51: Konzept „Klettholz“ (Neubau)



Die Konzepte im Bereich „Bauteile als Klettkomponenten“ schlagen vor, Klettkomponenten und somit einzelne Klettelemente an der Oberfläche und als Teil von Beton- (Abbildung 50) oder Holzbauteilen (Abbildung 51) herzustellen. Ergänzend und mit dem Ziel einer experimentellen Erweiterung der Thematik wurde die Herstellung einer Klettverbindung aus Papierwerkstoffen untersucht. Für dieses Konzept wurden Geometrien bestehender industrieller Klettelemente auf eine Anwendung bei Bauteilen übertragen und entsprechende Herstellverfahren untersucht. Dies umfasst die Kapitel „Klettbeton“, „Klettholz“, „Verbindungspartner“ sowie „Klettpapier“. Als Projekthighlight ist hervorzuheben, dass „Klettbeton“, „Klettholz“ und „Klettpapier“ in hoher Qualität hergestellt werden konnten.

Klettbeton

Betonbauteile welche in Form von Klettbeton (mit „klettfähiger“ Oberfläche) ausgebildet werden können sind Deckenplatten (Massiv oder z.B. Hohldielen), aber auch Außen- und Innenwände. Denkbar sind zudem Stützen und Träger. Die Herstellung dieser Klettbeton-Bauteile erfolgt in der Vorfertigung. Da, wie durch die Versuche bestätigt werden konnte, eine Herstellung von Klettelementen in einer entsprechenden Qualität und die Durchführung der Herstellungsverfahren nur unter gut steuerbaren Bedingungen möglich ist.

Die Klettbeton-Bauteile werden im Rahmen der Vorfertigung als Halbfertigteil oder als Fertigteil ausgebildet. Während das Fertigteil auf der Baustelle direkt montiert wird, dient das Halbfertigteil als verlorene Schalung für Ortbeton. Neben der Herstellung der Klettfläche bestehen somit wesentliche Aspekte in der Anlieferung der Bauteile auf die Baustelle, einer dortigen Lagerung und in der Montage. Besonders in diesen Phasen sind die kleinteiligen Klettelemente vor Beschädigungen zu schützen. Hierzu wird vorgeschlagen die Klettelemente vertieft / versenkt herzustellen, somit einen „Rahmen“ am Rand der Bauteile auszubilden. Was ein Hinlegen, Bewegen und Positionieren der Bauteile wesentlich erleichtert. Auch können für den Transport und die Lagerung Bereiche definiert werden, wo Klettelemente ausgespart werden, welche dann (in Kombination mit Zwischenelementen) als Auflager dienen. Denkbar ist zudem das Aufbringen einer zusätzlichen schützenden Konstruktion, welche nach der Montage der Bauteile und kurz vor der Verwendung der Klettfläche entfernt wird.

Als Ausgangsstoff für die Bauteile dienen in erster Linie erneut herkömmliche und weit verbreitete Betonarten wie z.B. Normalbeton mit einer Festigkeit C 25/30. Bei der Herstellung, welche durch das Gießen von flüssigem Beton in eine entsprechende Schalung erfolgt, gelangt jedoch keine oder kaum Gesteinskörnung in die kleinteiligen Klettelemente. Weshalb die Klettelemente durch herkömmlichen Zementleim (nach der Aushärtung Zementstein) gebildet werden. In diesem Kontext wurde eine Optimierung des Zementleims durch Fasern thematisiert, im Rahmen von gemeinsamen Meetings

jedoch ausgeschlossen, da Fasern erst bei Bruch ihre Wirkung entfalten und ein solcher Bruch der Klettelemente für eine Dauerhaftigkeit der Verbindungsfläche vermieden werden muss.

Die Klettelemente auf den Bauteilen werden, verglichen mit bestehenden Produkten, in einem größeren Skalierungsgrad hergestellt. Da die mögliche Größe und Geometrie der Elemente von der Herstellbarkeit der Schalung, von der Fließfähigkeit des Zementleims und von den Möglichkeiten der Trennung der Schalung vom Zementstein abhängig ist. Als Ausgangspunkt für die Definition der Geometrie der Klettelemente wurden die Klettprodukt-Geometrien „Pilzkopf“ und „T-Haken“ herangezogen (siehe Abbildung 52 und Abbildung 53):

Abbildung 52: Pilzkopf-Klettelemente auf schwarzer Bindemittelschicht[120]

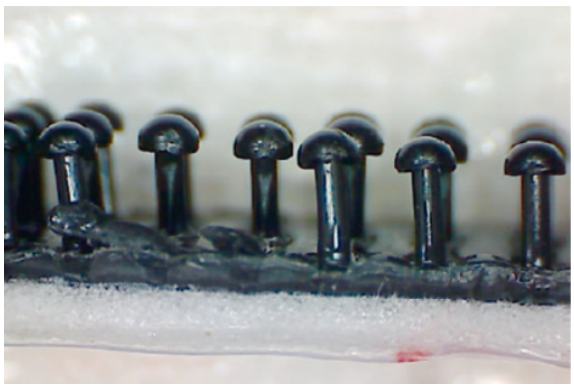


Abbildung 53: Haken-Klettkomponente mit T-förmigen Klettelementen[121]

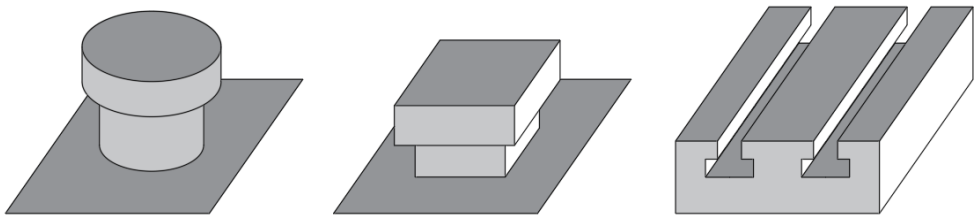
Bei der Übertragung dieser Geometrien auf Betonbauteile wurden zudem runde Geometrien in eckige Formen übertragen und, resultierend aus möglichen Herstellungsverfahren, auch lineare Elemente entwickelt. Insgesamt wurde die Herstellung von drei verschiedene Geometrien untersucht (siehe auch Abbildung 54), welche nachfolgend dargestellt sind:

- Runde Pilzkopfelemente
- Eckige Pilzkopfelemente
- T-förmige Nuten

[120] Krüger 2013, 20.

[121] Gottlieb Binder GmbH & Co. KG.

Abbildung 54: Gewählte Geometrien der Herstellversuche „Klettbeton“, Runde Pilzkopfelemente (links), Eckige Pilzkopfelemente (Mitte), T-förmige Nuten (rechts) [LKI, TU Graz]



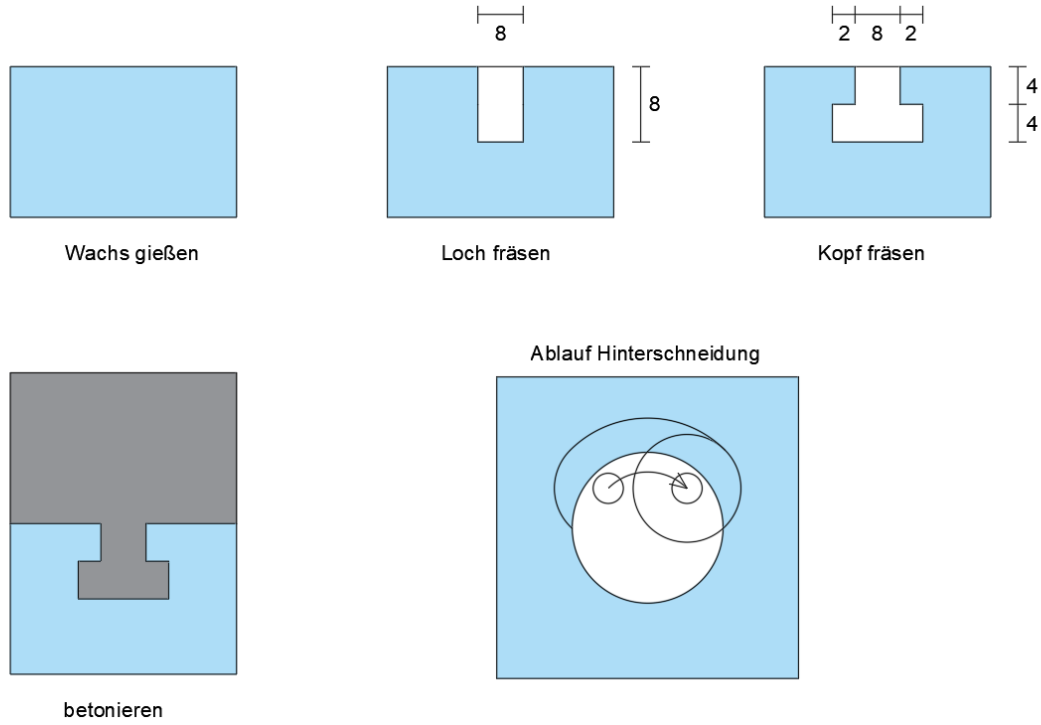
Runde Pilzkopfelemente

Runde Pilzkopfelemente ermöglichen bei großflächiger Anwendung eine hohe Anwendbarkeit und eine gute Bedienung (Schließen / Lösen) des Klettverbindungssystems. Da Gegenstücke sehr frei auf der Fläche der Klettverbindung positioniert werden können. Aber auch, da aus runden Klettelementen diagonal rautenförmige Zwischenräume resultieren, was ein einfacheres Positionieren und Einbringen von Gegenstücken mit Pilzkopf-Klettelementen ermöglichen kann.

Für die Herstellung runder Pilzkopfelemente wurden zwei Konzepte entwickelt. Ein Konzept besteht in der Verwendung einer Wachsschalung und der Unterteilung dieser Schalung in zwei plattenförmige Elemente mit geringer Stärke, welche beide mittels „Bohren“ bearbeitet werden. Ein Schalungselement bildet den Pilzkopf-Stiel und wird hierzu in einem gewählten Raster mit einem Bohrer mit geringem Durchmesser durchbohrt. Das zweite Schalungselement bildet den Pilzkopf-Kopf und wird mit einem größeren Bohrer, welcher im selben Raster nur auf das Element aufgesetzt wird, bearbeitet. Wodurch in diesem Element eine Halbkugel und somit eine Pilzkopf-Form entsteht. Anschließend werden diese Elemente passgenau aufeinander positioniert und z.B. durch Anpressdruck und Temperatur miteinander verbunden.

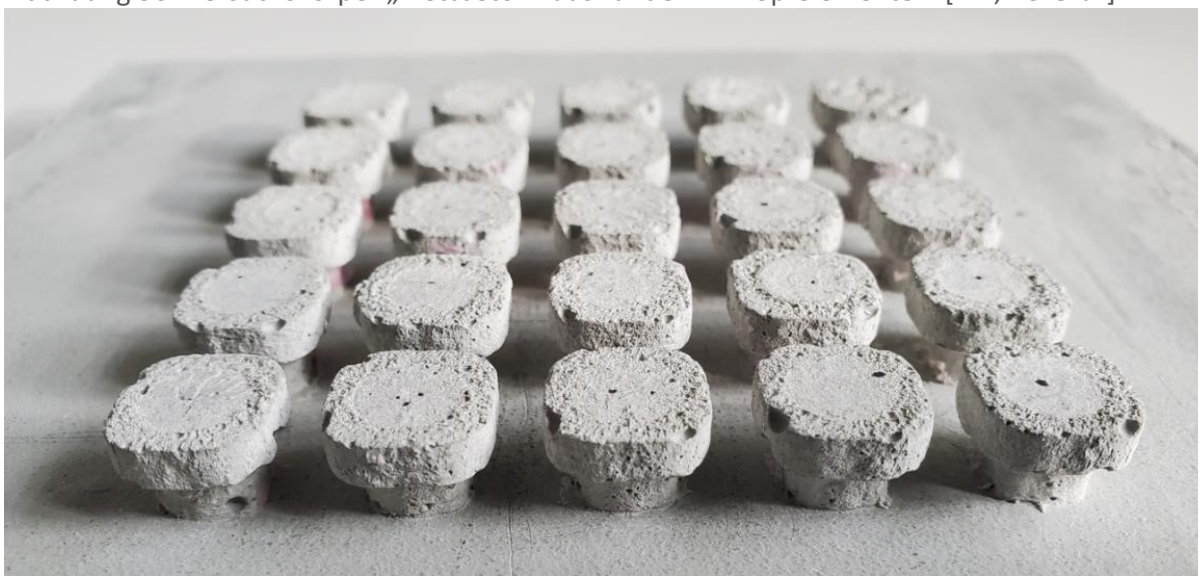
Ein weiteres Konzept besteht darin, die Pilzkopfelemente direkt aus einem Element oder Wachsblock mittels Fräsen herzustellen. Dies erfolgte in zwei Schritten, indem zuerst ein Loch gebohrt und anschließend ein Fräser eingesetzt wird, welcher am Loch entlang im Kreis geführt wird und so eine Hinterschneidung fräst, siehe auch die Abbildung 55. Da dies gegenüber dem ersten Konzept den Herstellungsaufwand der Schalung reduziert, wurden hierzu Versuche durchgeführt. Wobei es jedoch zu einem Verkleben der Fräsköpfe und einem fehlenden Abtransport der Späne kam.

Abbildung 55: Arbeitsschritte für die Herstellung von runden Pilzkopfelementen [LKI, TU Graz]



Weshalb eine Adaptierung des Konzeptes erfolgte. Hierbei ist zu erwähnen, dass das Projekt der Überprüfung der Machbarkeit dient, wobei die angewandten Verfahren nicht hinsichtlich Ablauf, Technologien oder ökologischer Aspekte optimiert werden. Weshalb die Schalung aus extrudiertem Polystyrol (XPS) hergestellt wurde. Dieses Material wurde ausgewählt, da es sehr gute Eigenschaften hinsichtlich einer spantechnischen Bearbeitung und für ein Auflösen der Schalung (mit Aceton) nach dem Einbringen und Aushärten des Betons aufweist. Diese Herstellmethode führte zu sehr positiven Ergebnissen und einer hohen Qualität der einzelnen Klettelemente, siehe Abbildung 56, Lediglich das Entfernen der XPS-Reste nach dem Auflösen zeigte sich als sehr zeitaufwendig. Dies könnte aber durch speziell dafür entwickelte Materialien bei der industriellen Herstellung entfallen.

Abbildung 56: Versuchskörper „Klettbeton“ aus runden Pilzkopfelementen [IAT, TU Graz]



Eckige Pilzkopfelemente

Eckige Pilzkopfelemente bieten erneut eine hohe Anwendbarkeit und eine gute Bedienung (Schließen / Lösen) des Klettverbindungssystems. Wobei aufgrund der eckigen Geometrie Nachteile hinsichtlich des Positionierens und Einbringens von Gegenstücken mit Pilzkopf-Klettelementen bestehen können. Während sich bei einer Verbindung mit Schlaufenkomponenten die einzelnen Schlaufen einfacher mit den spitzen Enden der Pilzköpfe Verhaken könnten und somit auch Vorteile bestehen.

Zur Herstellung eckiger Pilzköpfe wurden zwei Ansätze entwickelt. Das erste Konzept sieht eine Herstellung der Schalung aus drei plattenförmigen Wachselementen mit geringer Stärke vor, welche mittels „Stanzen“ bearbeitet werden. Ein Schalungselement bildet den Pilzkopf-Stiel und wird in einem gewählten Raster mit einem kleinen Stanzkopf (einem „Keksausstecher“) durchgestanzt. Das zweite Schalungselement bildet den eckigen Pilzkopf-Kopf und wird mit einem größeren Stanzkopf durchgestanzt. Das dritte Schalungselement bildet den Abschluss der Klettelemente und soll ein Hinterlaufen der Schalung vermeiden. Diese Elemente werden erneut passgenau aufeinander positioniert und miteinander verbunden.

Das zweite Konzept, welches im Rahmen von Versuchen umgesetzt wurde, stellt eine Kombination aus Wachs- und XPS-Schalungen dar. Dadurch konnte eine hohe Genauigkeit und gute Bearbeitbarkeit ermöglicht werden (XPS-Schalung), während zudem Erkenntnisse zum Herstellen von Pilzkopfelementen mittels Wachsschalung und ohne spantechnische Bearbeitung generiert wurden. Hierzu wurde in einem ersten Schritt eine Positivform aus XPS gefräst und diese dann mit einem Wachskörper ausgegossen. Nach dem Aushärten des Wachses wurde das XPS durch Aceton aufgelöst und entfernt. Siehe auch Abbildung 57. Die resultierende Negativform aus Wachs stellt die eigentliche Betonschalung dar. In diese wurde der Beton eingebracht und nach dem Aushärten des Betons das Wachs herausgeschmolzen. Das Ergebnis ist in Abbildung 58 dargestellt.

Abbildung 57: Arbeitsschritte für die Herstellung von eckigen Pilzkopfelementen [LKI, TU Graz]

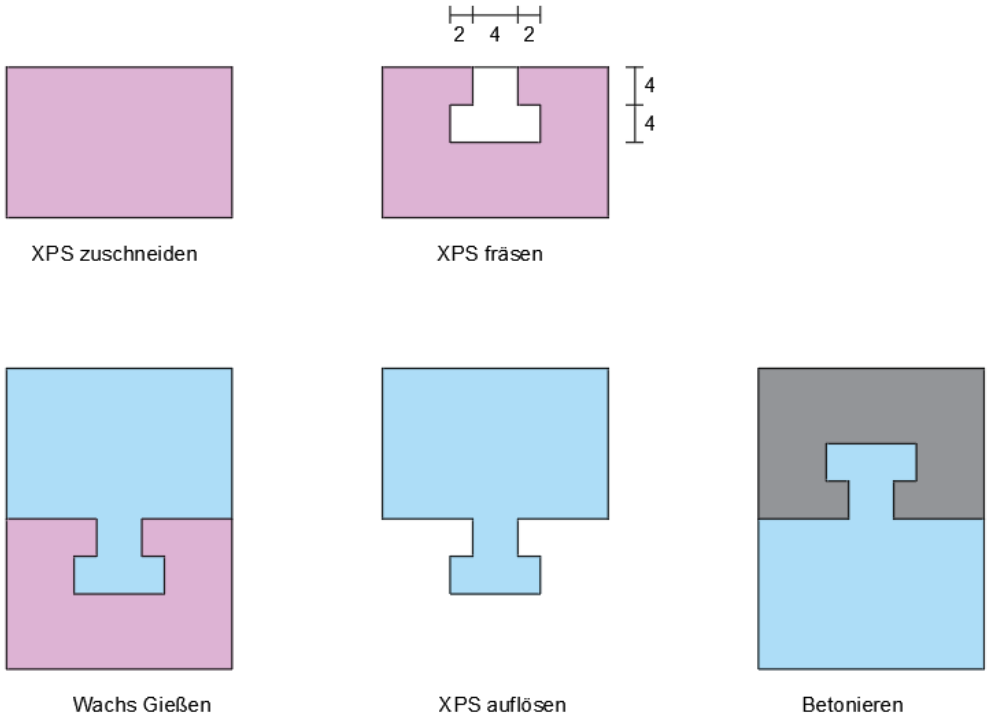


Abbildung 58: Versuchskörper „Klettbeton“ aus eckigen Pilzkopfelementen [LKI, TU Graz]

T-förmige Nuten

T-förmige Nuten besitzen eine gewisse Entfernung zur Klettverbindung, welche durch mehrere einzelne Verbindungspunkte charakterisiert ist. Da bei durchgehenden Nuten viele einzelne Elemente mit wenigen linearen Elementen ersetzt werden. Im Kontext der bereits hohen Vielfalt an Klettverbindungen wurde jedoch entschieden, dass diese Nuten, bei Verwendung von Gegenstücken mit einzelnen Klettelementen, weiterhin als Klettverbindung zu definieren sind.

T-förmige Nuten ermöglichen eine gute Anwendbarkeit und Bedienung des Klettverbindungssystems. Bei der Verwendung von Gegenstücken mit einzelnen Pilzkopf-Klettelementen entspricht die Anwendbarkeit den vorangehenden Geometrien. Die Nuten bieten sich zudem für ein Montieren mittels einschieben an, was zwar eine höhere Haftzugfestigkeit ermöglicht, jedoch eine Rückbaureihenfolge bedingen kann und somit in einer geringeren Flexibilität resultiert. Darüber hinaus besitzen Nuten-Geometrien einen Vorteil gegenüber einzelnen Elementen was die Lebensdauer betrifft. Da die Gefahr für Beschädigungen (bei der Nutzung der Klettfläche oder dem Transport der Bauteile) reduziert ist.

Die T-förmigen Nuten stellen die am einfachsten herzustellende Geometrie dar. Hierzu wurden ein Konzept entwickelt und mittels Versuchen bestätigt. Dies umfasst die Herstellung eines Wachsblockes, welcher mittels Fräsen bearbeitet wird. Wodurch eine linear verlaufende Nut, eine Negativform des Klettbetons, hergestellt wird (siehe Abbildung 59). Um ein Verkleben der Fräsköpfe durch das Wachs (infolge der Reibungshitze) zu vermeiden (siehe Abbildung 60), wurde ein Fräsaufbau unter Wasser entwickelt und erfolgreich eingesetzt (siehe Abbildung 61).

Abbildung 59: Arbeitsschritte für die Herstellung von T-förmigen Nuten [LKI, TU Graz]

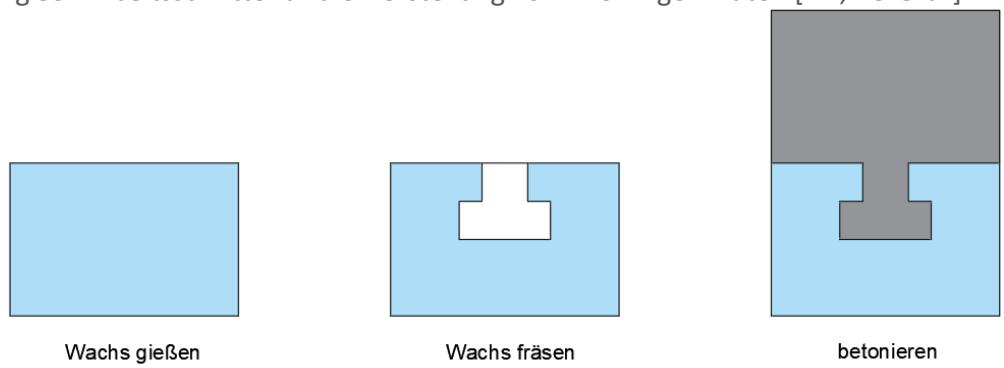


Abbildung 60: Verklebter Fräskopf (T-Nuten) [LKI, TU Graz]

Abbildung 61: Unterwasser Fräsen (T-Nuten) [LKI, TU Graz]

Das Ergebnis des Herstellungsversuchs ist nachfolgend abgebildet. Grundsätzlich konnte die Geometrie gut abgebildet werden, doch zeigte sich das Wachsschmelzen als problematisch. Da der Zementstein der Versuchskörper zum Zeitpunkt des Wachsschmelzens noch relativ jung war (1 bzw. 2 Tage) und daher noch viel Feuchtigkeit beinhaltet hat, kam es zu Rissen auf Grund der Expansion des Wassers beim Verdampfen und des starken Austrocknens der Oberfläche. Es zeigte sich auch, dass sich das Wachs nicht vollständig von den Versuchskörpern löste, dies ist in Abbildung 62 an den dunklen Verfärbungen zu erkennen.

Abbildung 62: Versuchskörper „Klettbeton“ aus T-förmigen Nuten (Wachsschalung) [IAT, TU Graz]

Klettholz

Es wurde untersucht, Holzbauteile als „Klettholz“ und somit mit „klettfähiger“ Oberfläche auszubilden. Als Holzbauteile sind wie bei Klettbeton Deckenplatten, Außenwände, Innenwände sowie Stützen und Träger angedacht. Hierzu werden diese im Rahmen der Vorfertigung und der Herstellung dieser Bauteile, durch Anwendung eines subtraktiven Verfahrens (wie Fräsen oder Schneiden) bearbeitet. Wodurch das Holz in die gewünschte Geometrie gebracht wird. Zudem können durch Anwendung eines additiven Verfahrens (z.B. Aufleimen oder Einschlagen) Holzelemente hinzugefügt werden um die gewünschte Geometrie herzustellen. Beide Verfahren sind nur in der Vorfertigung denkbar (da z.B. Roboter auf einer Baustelle ausgeklammert werden).

Einen wichtigen Aspekt stellt, neben der Herstellung der Klettfläche, erneut die Anlieferung der Bauteile auf die Baustelle, eine potentielle Lagerung und die Montage dar. Bei diesen Phasen sind die kleinteiligen Klettelemente vor Beschädigungen zu schützen, was wie bei Klettbeton durch vertieft / versenkt hergestellte Klettelemente, Bereiche ohne Klettelemente, oder durch das Aufbringen einer schützenden Konstruktion erfolgen kann.

Als Ausgangsstoff für Klettholz sind herkömmliche Holzprodukte (neu oder aus dem Rückbau stammend) wie massives Brettsperrholz (z.B. BSP 200 5s CL26E11.8), Brettschichtholz oder Massivholzbauteile angedacht. Ebenso sind Plattenwerkstoffe, wenn diese eine ausreichende Stärke

aufweisen, für das Konzept geeignet. Wodurch der Massivbau aber auch der Leichtbau (z.B. Holzrahmenbauweise) abgedeckt werden können. Optimierungspotential besteht grundsätzlich bei der Holzauswahl. Um eine gute Bearbeitung zu ermöglichen wie auch ein Ausbrechen oder Absplittern (bei der Herstellung oder der Nutzung der Verbindung) zu verhindern, sind Holzelemente mit möglichst schmalen Jahresringen (langsames Wachstum) zu verwenden. Zudem kann (für die Deckschicht und somit das Klettholz) eine Holzart mit besonders hoher Zugfestigkeit ausgewählt werden.

Wie bei Klettbeton bilden herkömmliche Klettprodukte den Ausgangspunkt der Klettholz-Klettelemente. Diese wurden erneut größer skaliert, sowie eckig und linear hergestellt. Zudem wurden herkömmliche Holzfüge-Geometrien wie der Schwalbenschwanzzinken integriert. Wobei die Größe und Geometrie der Elemente von der Herstellbarkeit (Fräsen, Schneiden), den eingesetzten Maschinen und Werkzeugen, wie auch vom Holzobjekt selbst abhängt. Insgesamt wurden folgende Geometrien untersucht, welche nachfolgend beschrieben sind:

- Eckige Pilzkopfelemente
- V-förmige Nuten (Schwalbenschwanz)
- Runde-Pilzkopfelemente (Holznägel)

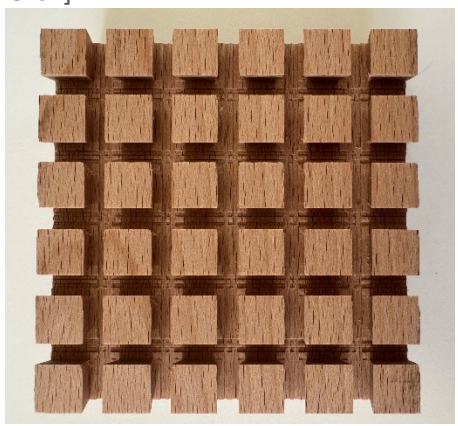
Eckige Pilzkopfelemente und V-förmige Nuten (Schwalbenschwanz)

Da die eckigen Pilzkopfelemente und die V-förmigen Nuten mit demselben Herstellungsverfahren hergestellt sind, wurden diese in ein Kapitel zusammengefasst. Eckige Pilzkopfelemente und V-förmige Nuten bieten grundsätzlich eine hohe Anwendbarkeit und eine gute Bedienung des Klettverbindungssystems. Die eckigen Pilzkopfelemente können Nachteile beim Positionieren und Einbringen von Gegenstücken mit Pilzkopf-Klettelementen jedoch Vorteile bei einer Verbindung mit Schlaufenkomponenten zeigen. T-förmige Nuten ermöglichen eine Verbindung mit Pilzkopf-Gegenstücken wie auch mit Elementen, welche seitlich eingeschoben werden. Woraus eine höhere Haftzugfestigkeit jedoch geringere Flexibilität (Rückbaureihenfolge) resultieren kann.

Die Herstellung der eckigen Pilzkopfelemente und der V-förmigen Nuten erfolgte durch das Bearbeiten eines Vollholz-Elements aus Buche mittels Schneiden. Hierzu wurde ein Sägeblatt auf einen entsprechenden Winkel eingestellt und das Holzelement eingeschnitten. Dies erfolgte mehrmals, wobei der Winkel des Sägeblatts nachgestellt wurde. Während die Schnitte für eine Herstellung der V-förmigen Nuten nur in eine Richtung erfolgen, wurde für die Herstellung der eckigen Pilzkopfelemente in zwei um 90° zueinander verdrehten Richtungen geschnitten. Wie die Versuchskörper zeigen, konnte durch dieses Verfahren ein sehr positives Ergebnis mit einer hohen Qualität der Klettelemente erreicht werden. Siehe Abbildung 63 und Abbildung 64

Abbildung 63: „Klettholz“ aus V-förmigen Nuten [IAT, TU Graz]

Abbildung 64: „Klettholz“ aus eckigen Pilzkopfelementen [IAT, TU Graz]



Runde-Pilzkopfelemente (Holznägel)

Runde Pilzkopfelemente ermöglichen eine hohe Anwendbarkeit und eine gute Bedienung des Klettverbindungssystems, indem Gegenstücke frei auf der Fläche der Klettverbindung positioniert werden können und ein einfacheres Positionieren und Einbringen von Gegenstücken mit Pilzkopf-Klettelementen besteht.

Zur Herstellung runder Pilzkopfelemente aus Holz wurde ein Konzept entwickelt, welches auf der Verwendung von „LignoLoc® Holznägeln“ basiert. Dieses Produkt aus Kunstharzpressholz dient als Ersatz für Stahlnägel und kann mit einem herkömmlichen Nagler geschossen oder mit dem Hammer in (weiches) Holz eingeklopft werden. Im Projekt wurden die Nägel in eine Mehrschichtplatte eingebracht. Die Platte hat die Maße 9 x 9 x 2,8 cm. Die Köpfe einen Kopfdurchmesser von ca. 6 mm und Schaftdurchmesser von ca. 4,5 mm (leichte Unterschiede je nach Nagel). Für die Herstellung wurden Löcher mit 5 mm vorgebohrt, Leim eingebracht und die Nägel eingebracht oder eingeklopft. Für eine gleichmäßige Höhe wurden die Versuchskörper umgedreht, ein Zwischenstück eingebracht und mittels Hämmern bearbeitet. Da die Nägel auf der Rückseite vorstanden, mussten diese abgeschnitten und die Fläche geschliffen werden. Der Holznagel ist in Abbildung 65 dargestellt und das Versuchsergebnis in Abbildung 66.

Abbildung 65: Holznagel Lignoloc, 58 mm [IAT, TU Graz]

Abbildung 66: Klettholz mit runden Pilzkopfelementen [IAT, TU Graz]

Verbindungspartner

Für die Herstellung einer Klettverbindung mit Klettbeton und Klettholz wurden Verbindungspartner entwickelt und untersucht. Wobei das herkömmliche Klettelement „Pilzkopf“ den Ausgangspunkt darstellt. Die Weiterentwicklungen und Adaptierungen welche im Projekt durchgeführt wurden umfassen die Skalierung und Positionierung, die Materialität und die Geometrie.

Pilzkopfkomponente

Herstellversuche

Eine Entwicklung im Bereich Skalierung und Positionierung (Raster) erfolgte durch eine Anpassung an die Klettbeton und Klettholz Objekte. Als Raster wurden 16,0 mm und 17,2 mm gewählt, welche aus der Herstellbarkeit der Klettbeton und Klettholz Objekte resultieren. Während Klettprodukte Klettelemente in Größen von wenigen Millimetern aufweisen, wurden Pilzköpfe mit folgen Kopfgrößen (Durchmessern) untersucht:

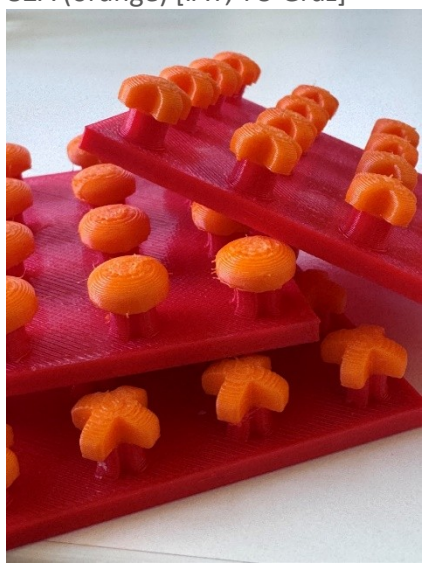
- 7,5 mm
- 8,0 mm
- 8,5 mm
- 9,0 mm
- 10,0 mm
- 10,5 mm

Im Bereich Materialität erfolgte eine Weiterentwicklung der Klettelemente durch die Herstellung aus zwei Materialien. Indem die Basisplatte und der Pilzkopf-Stiel (siehe Abbildung 67, rot) eine höhere Biegesteifigkeit als der Pilzkopf-Kopf (siehe Abbildung 67, orange) aufweisen, soll eine gute Herstellbarkeit der Verbindung bei hoher Haftzugfestigkeit und geringer Abnutzung (häufiges Öffnen / Schließen der Verbindung) ermöglicht werden.

Im Bereich Geometrie wurde eine Variation in Form von X-förmigen Pilzköpfen entwickelt. Hierzu wurden die Köpfe wie auch die Stiele in X-Form ausgebildet, was bei gleicher Haftzugfestigkeit Material sparen soll, aber auch zu einer guten Herstellbarkeit der Verbindung führen kann (siehe Abbildung 68). Ergänzend erfolgte bei den Stielen der Klettelemente (Pilzköpfe mit O-Form und X-Form) eine konischen Verbreiterung (Vergrößerung des Durchmessers) hin zur Basisplatte. Was eine verbesserte Krafteinleitung ermöglichen soll.

Abbildung 67: Detailansicht Verbindungspartner „Pilzkopf-rund“ im Verbund mit Klettbeton [IAT, TU Graz]

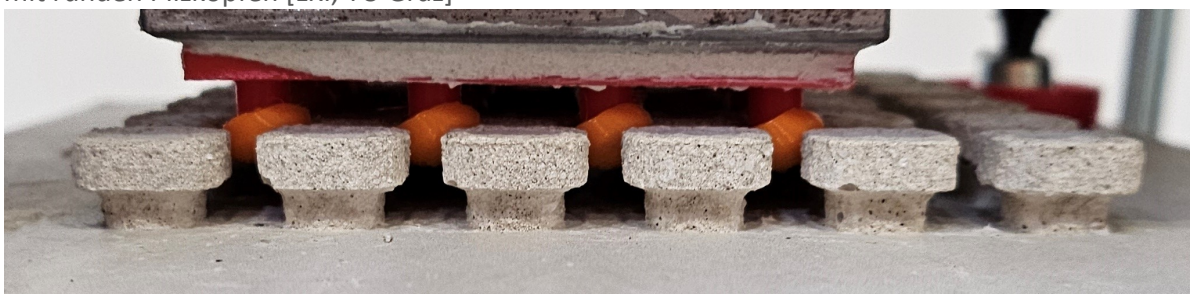
Abbildung 68: 3D-gedruckte Verbindungspartner mit X-förmigen und runden Pilzköpfen, Materialkombination: Grundplatte und Stiel 95A (rot), Pilzkopf-Kopf 82A (orange) [IAT, TU Graz]



Wie Versuche zur Herstellung der Verbindung mit dem Gegenstück Klettbeton zeigen, kam es zu dem gewünschten Effekt, dass sich die Köpfe der Klettelemente flexibel verhalten und verbiegen, während die Stiele annähernd gerade bleiben. Auffallend war zudem, dass sich die X-Pilzköpfe eher gleichmäßig verformen, während es bei den runden O-Pilzköpfen zu einem vollständigen Ausweichen und schrägem Eindrehen der Köpfe kommt. Siehe Abbildung 69 und Abbildung 70.

Abbildung 69: Versuche zum Schließen der Verbindung, X-förmige Pilzköpfe mit Klettbeton mit runden Pilzköpfen [LKI, TU Graz]

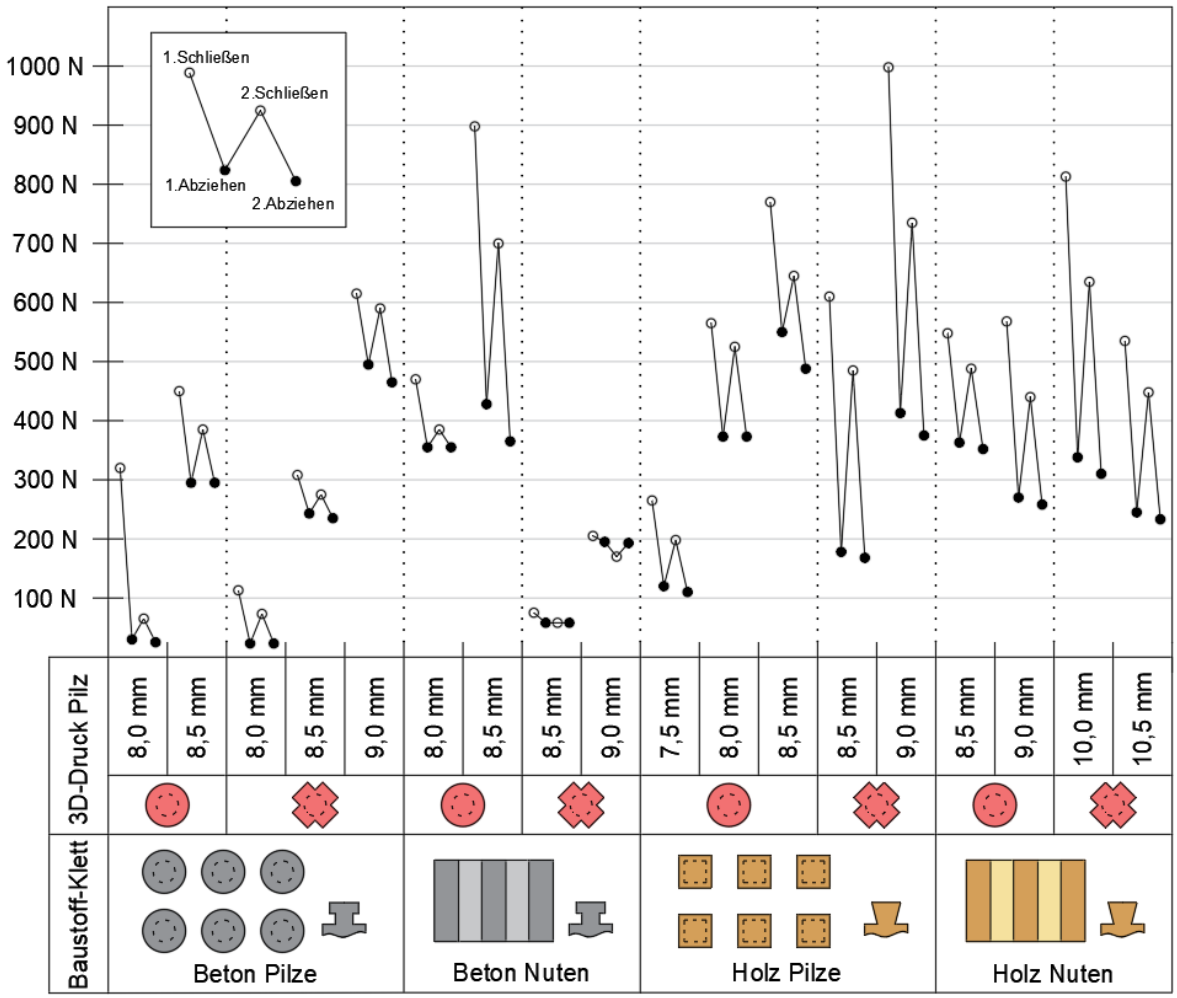
Abbildung 70: Versuche zum Schließen der Verbindung, O-förmige Pilzköpfe mit Klettbeton mit runden Pilzköpfen [LKI, TU Graz]



Haftzugfestigkeit

Darüber hinaus konnten Haftzugfestigkeiten von Klettbeton sowie Klettholz mit den 3D-gedruckten Verbindungspartnern im Bereich von 0,5-11,5 N/cm² aufgezeigt werden. Nachfolgend in Abbildung 71 sind alle Ergebnisse der Haftzugversuche zusammengefasst.

Abbildung 71: Versuchsergebnisse der Haftzugversuche der Pilzreihen [LKI, TU Graz]

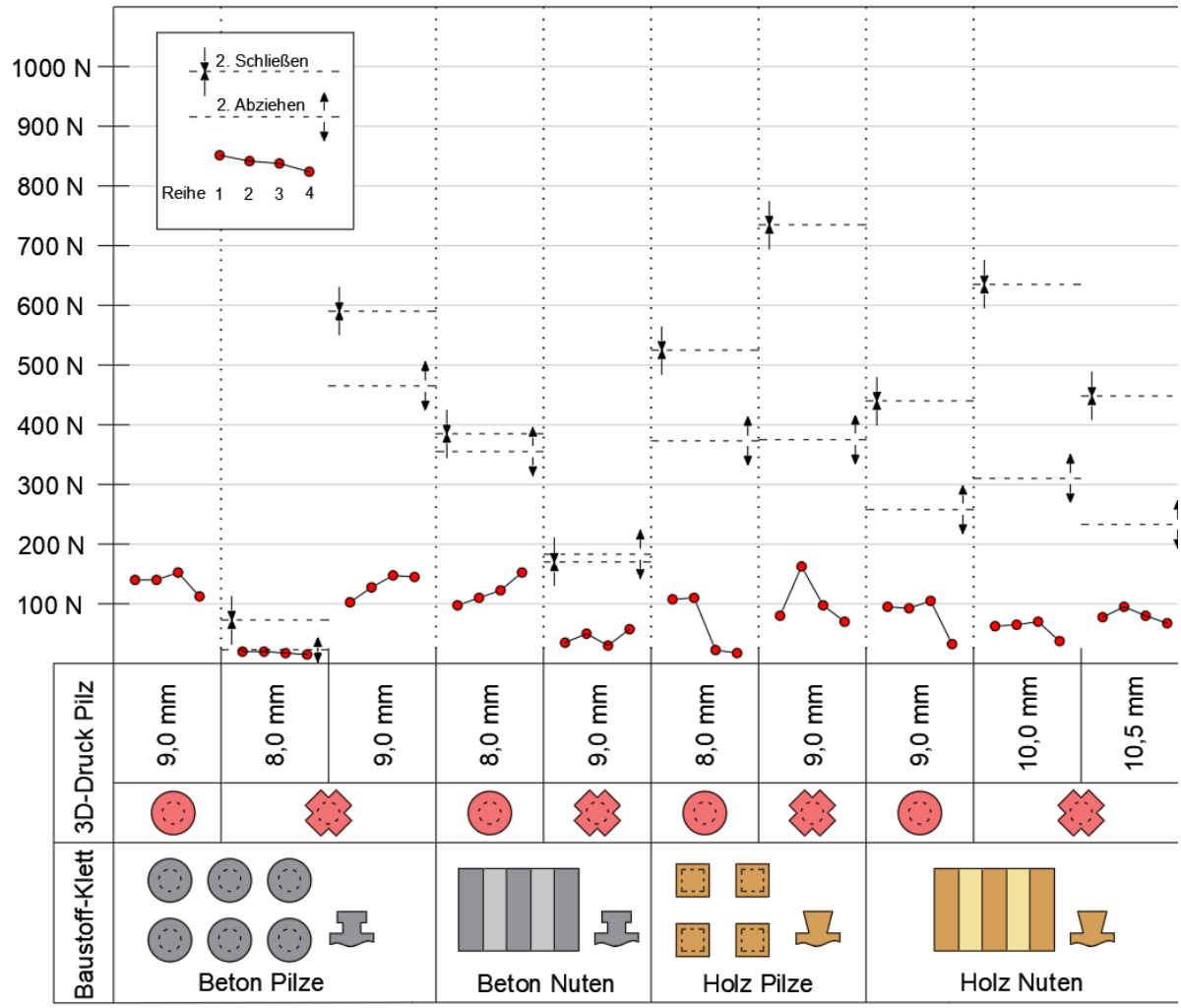


Wie in der obenstehenden Abbildung 71 ersichtlich wird, benötigen beinahe alle Kombinationen eine höhere Kraft zum Schließen der Verbindung als zum Abziehen dieser. Hierbei ist jedoch festzuhalten, dass die getesteten Versuchskörper unter den Gesichtspunkten Herstellbarkeit und hohe Haftzugfestigkeit erstellt wurden, jedoch kaum Überlegungen hinsichtlich der benötigten Kraft zum Schließen der Verbindung im Design berücksichtigt wurden. Es zeigte sich auch, dass zwischen den Stielen und den Pilzkopf-Köpfen eine Schwachstelle besteht, an welcher es bei zu hoher Belastung zu einem Bruch kommt. Beim 3D-Druck wird Material schichtweise aufgetragen und infolge des Aushärtungsprozesses miteinander verklebt. Eine Herstellung mittels z.B. Spritzguss würde diese Schwachstelle nicht aufweisen und stellt einen interessanten Weiterentwicklungsschritt dar.

Schälzugfestigkeit

Nachfolgend in Abbildung 72 sind die Versuchsergebnisse der Schälzugversuche dargestellt. Angeführt ist jeweils die Kraft welche nötig ist, um die einzelnen Pilzreihen zu lösen. Deutlich erkennbar ist auch dass die 3. und 4. Pilzreihe je nach Kombination unterschiedlich auf die schräge Zugkraft reagieren. Zudem ist festzuhalten, dass die Schälzugfestigkeit (maximaler Wert) in den meisten Fällen etwa 1/3 der Haftzugfestigkeit aufweist.

Abbildung 72: Schälzugkräfte der Pilzreihen [LKI, TU Graz]

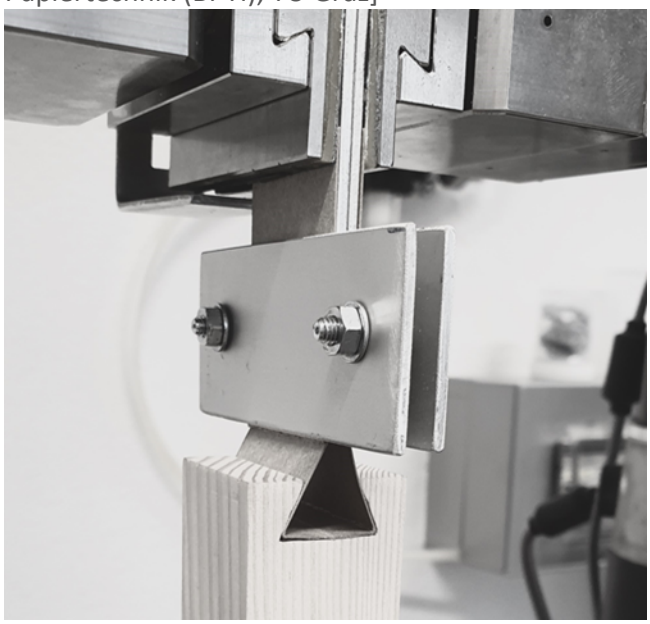


Papierkomponente

Haftzugfestigkeit

Ergänzend wurde als Verbindungspartner (Gegenstück) von Klettholz mit Schwalbenschwanzgeometrie eine Papierkomponente untersucht (siehe Abbildung 73).

Abbildung 73: Klettholz mit Papierkomponente [Institut für Biobasierte Produkte und Papiertechnik (BPTI), TU Graz]



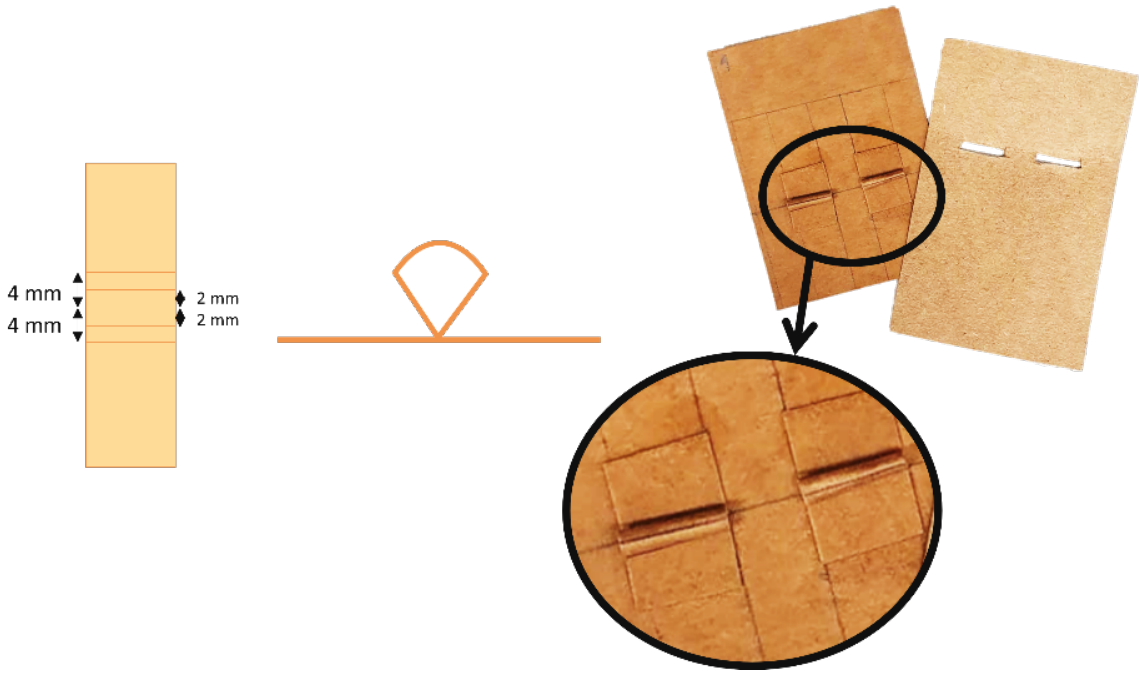
In den Versuchen konnten Festigkeiten der Verbindung im Bereich von 2,20-18,2 N/cm² erreicht werden. Zudem hat sich zudem gezeigt, dass die Nutgeometrien mit 26,6° Flankenneigung (PK1 und PK5) die höchste Tragfähigkeit erreichen. Sowohl flachere, als auch steilere Nutflanken, haben zu niedrigeren Festigkeiten geführt. Es ist daher davon auszugehen, dass die ideale Neigung der Nutflanken auch im Bereich von 26,6° liegt. Wie auch, dass eine Skalierung der Nutgeometrie nicht zu einer proportionalen Skalierung der Festigkeit führt. Das bedeutet, dass eine größere Nutgeometrie in einer geringeren Auszugskraft resultiert.

Generell bestätigt sich, dass steiferes Papier und rauere Flanken einen positiven (erhöhenden) Effekt auf die Traglast der Verbindung haben. Der deutlich steifere Kraftliner konnte ca. doppelt so hohe Kräfte aufnehmen, wie der weichere Testliner bei Kombination mit der Nutgeometrie PK1. Der Extremwert der Flankenrauigkeit mit Schleifpapier (P100) hat im Durchschnitt zu einer Erhöhung der Traglast von 105% geführt. In der baupraktischen Anwendung ist jedoch nicht mit derart rauen Flanken zu rechnen.

Klettpapier

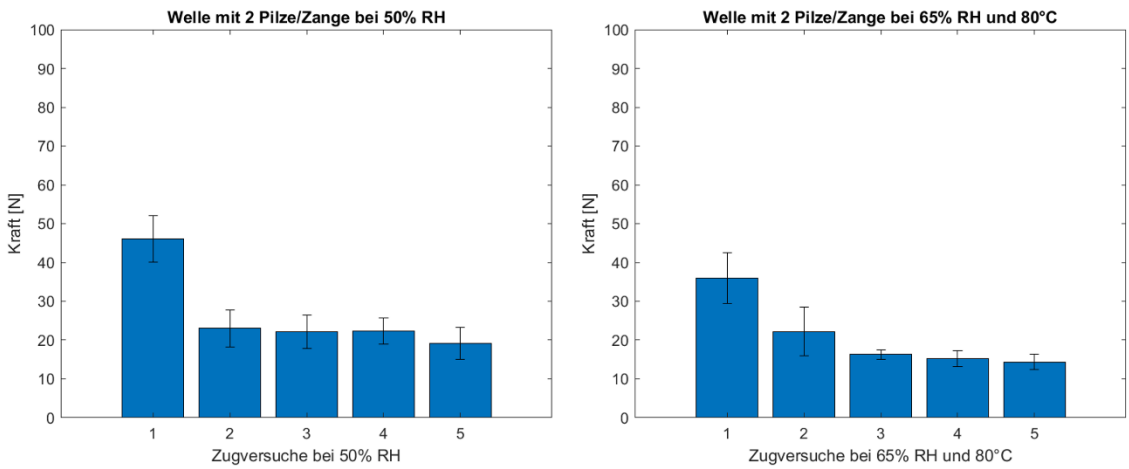
Im Kontext von Klettpapier wurden Konzepte entwickelt wie in Abbildung 74 dargestellt. Dabei handelt es sich um gefaltete bzw. gebogenen Pilzköpfe, welche auf einem Trägerpapier aufgebracht und mittels Leim fixiert werden (rechts). Das Gegenstück, in Abbildung 74 links zu sehen, besteht aus Schlitzen die schmäler sind als die Dicke der Pilzköpfe. Es wurde darauf geachtet, eine möglichst unkomplizierte Verarbeitung zu gewährleisten, um eine potenzielle großtechnische Fertigung zu ermöglichen. Dabei wurden die Pilzköpfe entweder gefalzt oder mit einer Zange geformt, wobei die Methode mit der Falzung für eine maschinelle Produktion besser geeignet wäre.

Abbildung 74: Herstellung Klettpapier [Institut für Biobasierte Produkte und Papiertechnik (BPTI), TU Graz]



Bei den Versuchen zur Festigkeit konnten zwischen den zwei Herstellungsverfahren (gefalzt / mit Zange geformt) keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden, obwohl im Mittel die Fertigung mit Zange höhere Festigkeiten liefert. Versuche zur Konditionierung bei zwei verschiedenen relativen Luftfeuchten (50% RH und 70% RH) zeigten keinen signifikanter Unterschied. Eine künstliche Alterung nach DIN ISO 5630-3 zeigt eine nicht-signifikante Verringerung der Festigkeit auf, die Festigkeit ist aber weiterhin auf einem hohen Niveau. Siehe Abbildung 75.

Abbildung 75: Alterung eines 2x1-Klettsystems nach DIN ISO 5630-3 (rechts) im Vergleich zu einem nicht-gealterten System (links). Die Fehlerbalken repräsentieren ein 95%-Konfidenzintervall von 10 Messungen. [Institut für Biobasierte Produkte und Papiertechnik (BPTI), TU Graz]



Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes ReCon wurden geeignete lösbare Verbindungssysteme hergestellt und getestet. Es wurden erfolgreich Nuten und Pilzköpfe aus Holz und Beton hergestellt, sowie dazu passende Papierelemente und 3D gedruckte Pilzkopfkomponenten.

Für die Prototypen-Herstellung der Betonpilze und Nuten wurden Schalungselemente aus extrudiertem Polystyrol verwendet. Die Erstellung von Schalungselementen aus Wachs hat sich hingegen als komplexer erwiesen. Aufgrund der wärmeabhängigen Eigenschaften des Wachses und der entstehenden Reibungshitze beim Fräsen war eine Bearbeitung des Wachses nur unter Wasser möglich. Zudem konnte kein rückstandsfreies Entfernen des Wachses erreicht werden. Die Holzgeometrien wurden durch schräge Kreissägenschnitte oder durch das einzelne Einbringen von Holznägel hergestellt. Beide Verfahren eignen sich nicht für eine Massenproduktion, sind aber für die Herstellung von Prototypen aufgrund der Verfügbarkeit verwendet worden.

Die in den Versuchen erreichten Festigkeiten sind mit denen von handelsüblichen Klett vergleichbar. Nachfolgend sind die Festigkeiten der im Rahmen von ReCon getesteten Verbindungssysteme angeführt. Dabei wird jene mittlere Festigkeit angegeben, welche nach aktuellem Stand des Wissens für praktische Anwendungen unter Raumtemperatur realisierbar ist. Zusätzlich wird jener Bereich angegeben, in dem die Haftzugfestigkeiten der Versuche liegen und welche Parameter für die Streuung der Versuchsergebnisse verantwortlich sind. Es ist zu beachten, dass bei aplix® 800+803 nicht bekannt ist, welcher Faktor neben der Orientierung für die Streuung der Ergebnisse verantwortlich ist.

- Holz- bzw. Beton-Klett: ca. 11 N/cm²
  0,54-11,5 N/cm²
  Variation: geometrische Verhältnisse
- Papierklett: ca. 8,5 N/cm²
  2,2-18,2 N/cm²
  Variation: geometrische Verhältnisse, Papier und Flankenrauigkeit
- aplix® 800+803: ca. 4,0 N/cm²
  2,3-9,4 N/cm²
  Variation: Orientierung
- aplix® 800+220: ca. 5,0 N/mm²
  3,6-6,3 N/cm²
  Variation: Orientierung
- aplix® 800+224: ca. 25 N/cm²
  24,6-34,5 N/cm²
  Variation: Orientierung

Im Vergleich zu den handelsüblichen Klettsystemen aplix® 800+803 und aplix® 800+220 liefern die hergestellten Verbindungssysteme gleichwertige Tragfähigkeiten, was ein Projekthighlight darstellt. Wobei berücksichtigt werden muss, dass zum aktuellen Zeitpunkt noch vergleichsweise hohe Kräfte zum Schließen der Verbindung erforderlich sind (meist gleich oder sogar höher als die Zug-Tragfähigkeit).

Durch die händische Herstellung des Papier-Kletts, sind deutlich höhere Ungenauigkeiten vorhanden als bei einer maschinellen Herstellung. Bei maschineller Herstellung wäre mit einer deutlich höheren Qualität der Maßhaltigkeit zu rechnen und damit mit besseren Ergebnissen und weniger starken Streuungen.

Bei allen erstellten Verbindungssystemen ist nicht bekannt, welche Auswirkungen das Raumklima auf das Tragverhalten hat. Auch Lasten innerhalb der Verbindungsebene (Scherkräfte) und Dauerlasten wurden nicht untersucht.

5.3. Bauteildatensystem

Mit dem vorgeschlagenen „Bauteildatensystem“ sollen Informationen wie bspw. Einbaudatum, stoffliche Zusammensetzung, Position und Demontagehinweise über die Lebensdauer von Bauobjekten hinweg, und mit dem Ziel einer Kreislaufwirtschaft, verwaltet werden. Wobei der gezielte Zugriff auf (Informationen über) Bauobjekte, im Sinne der höchsten Stufe des kreislauffähigen Bauens, der direkten Wiederverwendung, gefordert ist.

Hierzu erfolgte eine Übersetzung oder einer Verschränkung der physischen Ebene, somit von Bauobjekten, mit Informationen oder dem Informationsbedarf aus Prozessen der Kreislaufwirtschaft. Im Detail wurde auf digitaler Ebene eine Gebäudegliederung entwickelt und diese mit potentiell erforderlichen Metadaten hinterlegt sowie in ein digitales Dashboard und eine elektronische Ebene übersetzt. Zudem erfolgte eine Anwendung anhand ausgewählter Nutzer*innen-Szenarien (Planung mit Reuse-Bauteilen, Wartung und Reparatur). Auf elektronischer Ebene wurde ein System entwickelt, bei welchem sich RFID-Chips und QR-Codes auf oder seitens der Architektur, in vordefinierten Elementen bzw. in Räumen befinden.

5.3.1. Digitale Ebene

Die digitale Ebene umfasst, wie oben angeführt, eine Gebäudegliederung, Metadaten und ein digitales Bauteildaten-Dashboard.

Gebäudegliederung

Die entwickelte Gliederung umfasst alle wesentlichen Objekte eines Gebäudes (z.B. Material, Einzelteil, Baukomponente) und bietet eine eindeutige Definition dieser Objekte. Damit soll einerseits eine Verschränkung der (BIM-) Planung mit dem gebauten Objekt ermöglicht werden (Informationen aus der Planung und der Wartung oder des Rückbaus werden fortlaufend und wechselseitig ergänzt und genutzt). Zudem soll, für eine Planung, der Zugriff auf noch in Gebäuden gebundenen oder gerade rückgebauten Objekten ermöglicht werden. Ergänzend wird mit dieser Gliederung eine neue Definition von Bau-Objekten vorgeschlagen, welche den Austausch und Diskussionen rund um die Kreislaufwirtschaft vereinfachen soll.

Die entwickelte Gebäudegliederung ist in der Tabelle 9 angeführt, die Definitionen der wesentlichsten Gliederungsebenen sind im Anschluss beschrieben. Die Gliederung basiert in hohem Ausmaß auf einer Gliederung zu vorgefertigten Bauteilen in Weller Konrads Buch „Grundlagen und Entwicklung des industriellen, energie- und rohstoffsparenden Bauens“ [122] aus dem Jahr 1985. Weitere Quellen, welche diese Gliederung geschärft haben, sind in der Tabelle 9 ersichtlich.

[122] Weller 1986, 83–84.

Tabelle 9: Gebäudegliederung [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]

Gebäudegliederung „ReCon“	**Moro 2019**[123]	**Weller 1986**[124]	**Rosen 2021**[125]	**Schuster, Geier 2023**[126]
-	-	-	Rohstoff	
Material	Rohstoff	Werkstoff / Baustoff	Material	Material
Bauhalbzeug	Bauhalbzeug	Bauhalbzeug / Halbzeug / Halbfabrikat	Bauteilschicht	Komponente
Einzelteil	Einzelteil	Einzelteil		
Teilegruppe	Teilegruppe	Teilegruppe	-	-
Einzelbauteil	-	Bauteil - Bau-konstruktionsteil	Bauelement	-
Baukomponente	Bauteil	Bauteil - Bau-komponente		Bauelement
Bauteil		Bauteil - Bau-element		Bauteil
Einzelbauteilgruppe	-	-	-	-
-	Bau(teile)gruppe	Bauteilgruppe / Baugruppe	-	-
Teil- oder Substruktur	Teil- oder Substruktur	Baustruktur - Substruktur (Subsystem)	Bauteil	-
Hauptstruktur	Teil- oder Subsystem (gleich Hauptstruktur)	Baustruktur - Hauptstruktur	Bauteilgruppe	-

[123] Moro 2019 1, 40–42.
[124] Weller 1986, 83–84.
[125] Rosen 2021, 157.
[126] Vgl. Schuster, Geier 2023, 63.

Gebäudegliederung „ReCon“	Moro 2019[123]	Weller 1986[124]	Rosen 2021[125]	Schuster, Geier 2023[126]
Gebäude	Gebäude	Gebäude	Gebäude	Gebäude

Material

Die Gliederungsebene Material stellt die Ausgangsstufe für alle nachfolgenden Elemente dar.[127] Materialien sind z.B. Holzwerkstoffe wie Spanwerkstoffe (z.B. für OSB oder Spanplatten) oder Faserwerkstoffe (z.B. für MDF-Platten). [128] Weiters sind auch Lehm, Stahl,[129] und Beton Materialien.

Rohstoffe (z.B. Zement, Baustahl, Kunststoff, Bauholz) sind nicht Teil dieser Definition, es sei denn, das Material kann in diesen oder einen ähnlichen Ursprungszugang rückgeführt werden kann (z.B. kann ein Holzträger zu Spanwerkstoffen werden).

Bauhalbzeug

Ein Bauhalbzeug entspricht einem industriell hergestellten Produkt, welches nicht zusammengesetzt ist und ein Vorprodukt für die weitere Bearbeitung darstellt. Die Form resultiert meist aus der Fertigung. Ein Bauhalbzeug ist teilweise funktionsspezifisch oder projektneutral.[130] Bauhalbzeuge eignen sich gut für den Selbstbau. Was sich durch die Anwendung von Produkten direkt vom Baumarkt mit geringer Nachbearbeitung auszeichnet.[131]

Einzelteil

Diese Ebene beschreibt untergeordnete Objekte wie z.B. Holzwerkstoffplatten, Lattungen oder Dampfsperren.[132] Weitere Einzelteile können „Rähm, Schwelle, Holzwerkstoffplatte, Verbindungsmittel, Elektrodose“ sein.[133] Einzelteile weisen geringere bautechnischen Anforderungen auf und werden für eine Bauanwendung (in der Regel) mit weiteren Objekten (zu Baukomponenten, Einzelbauteilen oder Bauteilen) kombiniert.

Teilegruppe

Eine Teilegruppe entspricht einer Gruppe von Einzelteilen, welche in einer funktionalen Beziehung zueinanderstehen. Das sind z.B. mehrere Dampfsperren, Abdichtungen oder OSB-Platten die miteinander verklebt sind.

Einzelbauteil

Ein Einzelbauteil entspricht einem einzelnen Objekt, welches statisch-konstruktiv wirksam ist. Einzelbauteile sind Stützen, Träger, Deckenplatten sowie Wandscheiben.

[127] Vgl. Weller 1986, 83.
[128] Vgl. Schuster, Geier 2023, 63.
[129] Vgl. Graf et al. 2022 99.
[130] Vgl. Weller 1986, 85.
[131] Ebd., 88.
[132] Vgl. Schuster, Geier 2023, 63.
[133] Vgl. Graf et al. 2022 99.

Baukomponente

Eine Baukomponente stellt ein industriell hergestelltes Produkt dar, welches zusammengesetzt ist und für verschiedene Anwendungsfälle geeignet ist. Es hat zudem die Eigenschaft der überwiegenden „Projektneutralität“ und ist form- und funktionsspezifisch. Eine Baukomponente ist auf Grundlage übergeordneter Konstruktionsregeln hergestellt.[134] Baukomponenten sind z.B. ein „Fenster, Türe, Sonnenschutzelement“.[135] Baukomponenten können zudem vorgefertigte Bestandteile eines Bauteils sein.[136] Darüber hinaus sind Baukomponenten dadurch gekennzeichnet, dass sie in sich geschlossene Produkte darstellen.

Bauteil

Ein Bauteil ist ein statisch-konstruktiv sowie funktional und geometrisch abgeschlossener Teil eines Gebäudes oder eines Bauwerks.[137] Bauteile bestehen aus mehreren Schichten. Das Bauteil „Geschossdecke“ kann somit aus den Schichten (und Einzelteilen und einem Einzelbauteil) Deckenplatte, Trittschalldämmung, Trennlage, Estrich und Oberboden bestehen.[138] Bauteile sind z.B. tragende Außenwände, nichttragende Außenwände, [139] Geschossdecken[140] oder Innenwände.[141]

Einzelbauteilgruppen

Eine Einzelbauteilgruppe entspricht einer Gruppe von Einzelbauteilen, welche in funktionaler Beziehung zueinanderstehen. Dies sind z.B. zwei aufeinander liegende Holzträger, welche für eine höhere Spannweite kraftschlüssig miteinander verbunden sind. Wie auch vorgefertigte Deckenelemente, welche auf der Baustelle miteinander verbunden werden.

Teil- oder Substruktur

Ein Subsystem entspricht einem untergeordneten Teilsystem eines Gesamt-Bausystems. Es umfasst Bauelemente die untereinander und mit Bauelementen anderer Subsysteme (des Gesamt-Bausystems) in Verbund stehen.[142] (Austauschbare) Subsysteme können den raumschließenden Ausbau, den technischen Ausbau und die Einrichtung betreffen und am Markt angeboten werden. Dies betrifft z.B. Innenwände, Außenwände und die Tragstruktur.[143] Da die Tragstruktur auch der Primärstruktur (siehe Hauptstruktur) zugeordnet wird, sind hier nur einzelne Systeme der Tragstruktur gemeint.

Hauptstruktur

Diese umfassen die Primärstruktur, die Sekundärstruktur und die Tertiärstruktur. Hierbei beschreibt die Primärstruktur die Tragstruktur, die Sekundärstruktur den raumschließenden Ausbau und die Tertiärstruktur den technischen Ausbau.[144] Bei industriell gefertigten und montierten Gebäuden ist

[134] Vgl. Weller 1986, 85.
[135] Vgl. Graf et al. 2022 99.
[136] Vgl. Schuster, Geier 2023, 63.
[137] Vgl. Ebd., 63.
[138] Vgl. Rosen 2021, 158.
[139] DIN 276, 13–19.
[140] Vgl. Schuster, Geier 2023, 63.
[141] Vgl. Graf et al. 2022 99.
[142] Vgl. Weller 1986, 86.
[143] Vgl. Ebd., 87–88.
[144] Vgl. Ebd., 83.

die Tragstruktur projektspezifisch, die raumschließenden Bauteile teilweise projektspezifisch und der technische Ausbau vorwiegend projektneutral.[145]

Metadaten für Einzelteile, Einzelbauteile und Baukomponenten

Die Metadaten zu „Einzelteilen“, „Einzelbauteilen“ und „Baukomponenten“ stellen für eine Kreislaufwirtschaft die wichtigste Ebene dar, da hier (Einzel-) Objekte beschrieben werden, welche direkt wiederverwendet werden können. Bauteile bestehen in der Regel aus mehreren Einzelteilen oder Baukomponenten. Die nachfolgenden Metadaten werden bei Bauteilen somit nur angewandt, wenn dieses Objekt aus nur einer Schicht besteht. Andernfalls bestehen für jedes Einzelteil und / oder für jede Baukomponente eines Bauteils eigene Metadaten. Darüber hinaus bestehen für jedes Objekt auf Materialebene weitere Metadaten, welche in diesem Bericht aber nicht angeführt sind.

Die nachfolgende Darstellung der Metadaten stellt einen Auszug des Projektergebnisses dar, wobei der Anspruch darin besteht, die wesentlichsten Arten von möglichen Bauteil-Informationen sowie besonders relevante Quellen abzubilden. Dies resultiert aus dem Umstand, dass zu diesem Thema viele unterschiedliche Quellen bestehen und laufend neue Publikationen erfolgen.

[145] Vgl. Ebd., 83.

Tabelle 10: Metadaten für Einzelteile, Einzelbauteile und Baukomponenten [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]

Art der Metadaten	**Gliederung 2. Ebene**	**Gliederung 1. Ebene**
Handelsname des Objektes[146] [147] [148] [149] [150]	Allgemeine Angaben	**Administrative Merkmale**
Global Trade Item Number[151] [152] [153] [154] [155] Herstellerinformationen (Name, Anschrift, Registrierungsnummer, usw.) [156] [157] [158] [159] [160]		
Garantie / Haftung (Datum bis wann und wer) [161] Produktionsdatum[162] [163] [164] Nutzungsdauer[165] [166]		
Enddatum und Ort der letzten Montage (n) [167]	Historie	
Angabe Prüfungsjahr / des Zustandes (Prüfung vor Ort) [168]		
Angabe Wartung / Reparatur (Zeitpunkt und Tätigkeit)		
Klassifizierung (z.B. nach ÖNORM B 1801-1) [169]	Identifikation	

[146] Platform CB'23 2022.
[147] Heinrich, Lang 2019.
[148] ÖNORM EN ISO 12006-2.
[149] ISO 7817-1:2024.
[150] Dervishaj et al. 2023.
[151] Madaster Austria GmbH 04.03.2024.
[152] Richter, Liedtke 2021.
[153] Platform CB'23 2022.
[154] Heinrich, Lang 2019.
[155] GS1 Austria.
[156] Europäisches Parlament, Rat der europäischen Union 2024.
[157] Richter, Liedtke 2021.
[158] Platform CB'23 2022.
[159] Heinrich, Lang 2019.
[160] GS1 Austria.
[161] Platform CB'23 2022.
[162] Richter, Liedtke 2021.
[163] GS1 Austria.
[164] Dervishaj et al. 2023.
[165] Europäisches Parlament, Rat der europäischen Union 2024.
[166] Richter, Liedtke 2021.
[167] Europäisches Parlament, Rat der europäischen Union 2024.
[168] Platform CB'23 2022.
[169] Madaster Austria GmbH 04.03.2024.

Art der Metadaten	Gliederung 2. Ebene	Gliederung 1. Ebene
ID [170]		
Lage im Gebäude[171] [172]		
Kennzeichnung der ökologischen Nachhaltigkeit[173]	Nachhaltigkeit	
Bauphysikalische Kennwerte je nach Objekt (Brandschutz, Wärmedämmung, Festigkeit) [174] [175] [176] [177]	Allgemeine physische Merkmale	**Physische Merkmale**
Lasttragend[178] [179] [180]		
Innenliegend[181] [182]		
Länge / Breite / Höhe / Stärke [183] [184] [185] [186] [187] [188]	Geometrische Informationen	
Materialkategorie[189] [190] [191]	Material	
Material-Unterkategorie / Material-Spezifikation [192]		
Komponentenreinheit [193]		
Art der Verbindung / Zugänglichkeit der Verbindung / Abhängigkeit / Produktkante [194] [195] [196]		

[170] Ebd.
[171] Dervishaj et al. 2023.
[172] Heinrich, Lang 2019.
[173] Europäisches Parlament, Rat der europäischen Union 2024.
[174] Dervishaj et al. 2023.
[175] Heinrich, Lang 2019.
[176] ÖNORM EN ISO 12006-2.
[177] ISO 7817-1:2024.
[178] Dervishaj et al. 2023.
[179] Richter, Liedtke 2021.
[180] ISO 7817-1:2024.
[181] Dervishaj et al. 2023.
[182] Richter, Liedtke 2021.
[183] Europäisches Parlament, Rat der europäischen Union 2024.
[184] Dervishaj et al. 2023.
[185] Heinrich, Lang 2019.
[186] ISO 7817-1:2024.
[187] Platform CB'23 2022.
[188] GS1 Austria.
[189] Madaster Austria GmbH 04.03.2024.
[190] Alaux et al. 2024.
[191] ÖNORM EN ISO 12006-2.
[192] Alaux et al. 2024.
[193] Heinrich, Lang 2019.
[194] Madaster Austria GmbH 04.03.2024.
[195] Richter, Liedtke 2021.
[196] Platform CB'23 2022.

Art der Metadaten	Gliederung 2. Ebene	Gliederung 1. Ebene
Anweisungen für Reparatur[197]	Bauprozess-orientierte Informationen	
Anweisungen für Demontage[198] [199] [200]		
Anweisungen für Wiederverwendung[201]		

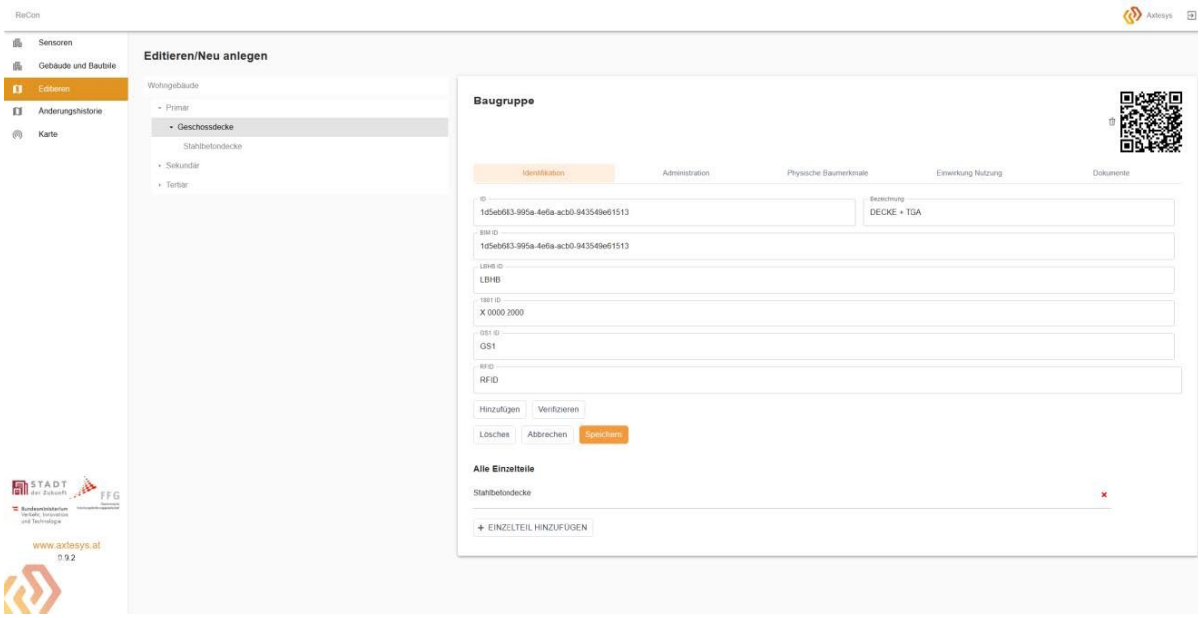
Ergänzend wurde im Kontext der Metadaten das Konzept der „Basisdaten“ entwickelt. Dies sind Mindestdaten, die für eine Kreislaufführung über die gesamte Lebensdauer der Bauobjekte hinweg (digital und physisch) verfügbar sein sollen. Hierzu sind diese digital abzubilden und direkt auf Einzelteilen, Einzelbauteilen und Baukomponenten (z.B. mittels QR-Code) aufzubringen. Die Art der jeweiligen Basisdaten hängt von den Bauobjekten ab, beispielsweise sind Herstellerinformationen, Produktionsdatum sowie Material-Spezifikationen anzugeben.

Bauteildaten-Dashboard

Für eine Benutzung und einen Zugang zu den oben dargestellten Metadaten sieht das Forschungsteam ein System vor, welches die Objekte mit ihren Identifikatoren und Metadaten anhand einer sinnvollen Struktur (oben dargestellte Gebäudegliederung) darstellt siehe Abbildung 76. Im Hinblick auf unterschiedliche Nutzer*innen müssen die Daten zudem für unterschiedliche Bedürfnisse auffindbar sein und gefiltert werden können. Außerdem ist die Möglichkeit der Neuerfassung und Datenergänzung wesentlich. Mit diesem Anspruch wurde das nachfolgend dargestellte Bauteildaten-Dashboard entwickelt.

[197] Europäisches Parlament, Rat der europäischen Union 2024.
[198] Ebd.
[199] ÖNORM EN ISO 12006-2.
[200] Heinrich, Lang 2019.
[201] Europäisches Parlament, Rat der europäischen Union 2024.

Abbildung 76: Bauteildaten-Dashboard [axtesys GmbH]



Die Benutzeroberfläche des Dashboards visualisiert in diagrammatischer Positionierung der Texte bzw. Objektnamen die hierarchische Struktur des Gebäudes, einschließlich der zugehörigen Elementdaten und spezifischer Informationen zu den einzelnen Bauobjekten. In einem Editiermodus können diese Daten manuell ergänzt, bearbeitet oder angepasst werden. Auf übergeordneten Hierarchiestufen besteht die Möglichkeit, Sub-Elemente flexibel hinzuzufügen, wodurch versucht wird, eine Abbildung komplexer Bauteilzusammenhänge zu ermöglichen.

Das Design des Dashboards wurde im Rahmen einer webbasierten Applikation umgesetzt und kontinuierlich erweitert. Der Fokus der Entwicklung lag auf den zentralen Anwendungsbereichen Planung, Wartung, Austausch sowie Einbau- und Bestandsprüfung. Im Verlauf des Projekts wurden wiederholt Usertests unter den Projektmitgliedern durchgeführt. In enger Abstimmung mit dem *Institut für Architekturtechnologie* (IAT) konnten dabei identifizierte Probleme adressiert und Verbesserungsvorschläge implementiert werden. Die wichtigsten Erkenntnisse aus den Usertests lassen sich in die drei nachfolgenden Bereiche zusammenfassen.

Komplexität und Umfang der Bauobjekte und Metadaten

Die hierarchische Strukturierung der Gebäudedaten konnte beispielhaft erfolgreich abgebildet werden. Eine vollständige Erfassung aller möglichen Bau-Situationen erwies sich jedoch als zu herausfordernd, da die Vielzahl der möglichen Sonderfälle, bei der Herstellung aber auch während dem Betrieb eines Gebäudes, zu einer erheblichen Komplexitätssteigerung führen würde (z.B. Umbau und damit eine nachträgliche Teilung eines Raumes in zwei neue Einheiten).

Ein weiteres Thema stellte die Menge an Objekten innerhalb eines Gebäudes dar. Eine vollständige manuelle Erfassung war im Rahmen des Projekts nur exemplarisch möglich. Die Abbildung der zugehörigen Metadaten wurde deshalb auch durch die angedachte Verlinkung zu externen Ressourcen gelöst.

Dateneingabe und -integration

Die manuelle Eingabe bzw. das Einspielen von Daten für ein gesamtes Gebäude stellen einen erheblichen Aufwand dar. Zwar sind die erforderlichen Informationen (beim Neubau) in der Regel vorhanden, jedoch über unterschiedliche Quellen verteilt. Für einen realen Einsatz wäre es daher essenziell, bestehende Datenquellen (z.B. BIM) effizient miteinander zu verknüpfen und Benutzer*innen bei der Dateneingabe aktiv zu unterstützen. Ein vielversprechender Ansatz hierfür ist der automatisierte Abgleich von Metadaten über externe Referenzen. Damit ließe sich der Eingabeaufwand deutlich reduzieren und zugleich die Datenqualität verbessern. Im Design wurde versucht, diesem Umstand durch verschiedene Strukturierungsansätze gerecht zu werden.

Nutzungsspezifisches Design

Die Anforderungen an die Daten und deren Darstellung variieren stark in Abhängigkeit vom jeweiligen Anwendungsfall und User. Während in der Planungsphase andere Informationen im Vordergrund stehen als bei Wartung oder Rückbau, kann die zugrundeliegende Datenstruktur im System unverändert bleiben.

Dieses Spannungsfeld wurde im Design durch die Entwicklung einer mobilen Applikation (für den Vor-Ort-Einsatz) sowie eines webbasierten Dashboards (für die Remote-Verwaltung) adressiert. Die Usertests zeigten jedoch, dass eine stärkere Anpassung der Benutzeroberfläche an den jeweiligen Use-Case sinnvoll wäre – insbesondere im Hinblick auf die Relevanz, Tiefe und Strukturierung der angezeigten Informationen (siehe auch Kapitel Nutzungsszenarien).

Für eine Verknüpfung der Bauobjekte mit dem Dashboard wurde eine physische Kennzeichnung im Gebäude mittels QR-Codes und RFID-Chips angedacht. Diese ermöglicht eine eindeutige Identifikation sowie die Verlinkung zum entsprechenden digitalen Datensatz in der Datenbank. Im digitalen Dashboard wurde hierzu die Funktionalität zur Generierung und Speicherung von QR-Codes implementiert.

Zusätzlich wurde eine Schnittstelle zur Anbindung von RFID-Komponenten auf elektronischer Ebene realisiert, wodurch sowohl das Auslesen als auch das Einspielen von Identifikationen ermöglicht wird. Dies ist nachfolgend angeführt.

5.3.2. Elektronische Ebene

Für eine Nutzung des Bauteildatensystems wurde ein Konzept entwickelt, bei denen sich RFID-Chips und QR-Codes auf oder seitens der Architektur, in vordefinierten Elementen bzw. in Räumen befinden. Wobei die Anzahl der RIFD-Chips hinsichtlich einer nachhaltigen Strategie und Systemvereinfachung bestmöglich zu reduzieren ist. Dieses Konzept umfasst die folgenden drei Ebenen:

- **Raum:** Pro Raum wird ein RFID-Chip an einer leicht auffindbaren Position angebracht, z.B. bei der Tür in Augenhöhe oder als Teil des Lichtschalters. Dieser Chip dient als zentraler Speicher für den Raum. Die Informationen auf dem Chip beinhaltet eine Verknüpfung zum Dashboard sowie Informationen über die Hauptobjekte des Raums. Weiters wird die Lage aller weiteren RFID-Chips angegeben. Die Objekte im Raum besitzen eigene Identifikatoren in Form von QR-Codes oder RFID-Chips.
- **Aufbauten** (mehrere Bauobjekte): Für jeden Bauteilaufbau (z.B. Geschossdecke, Fassade) befindet sich ein RFID-Chip an der Schnittstelle zwischen kurzlebigen und langlebigen

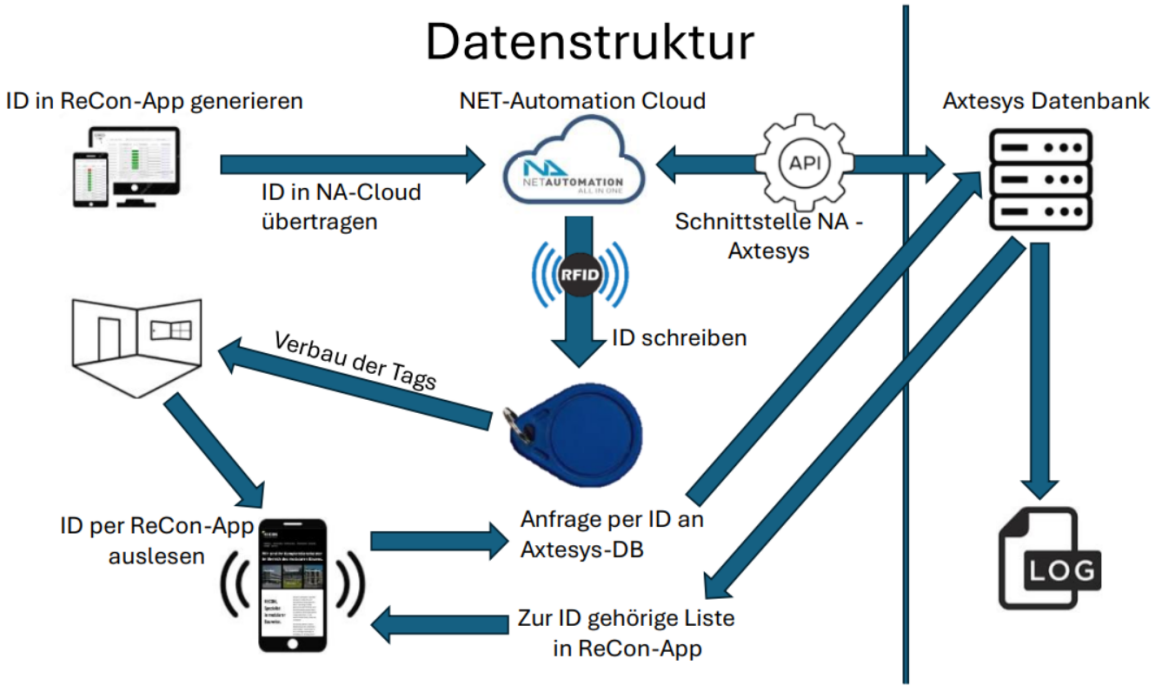
Objekten, somit in der Klettverbindung. Bei den oben dargestellten Anwendungssituationen („Geschossdecke in Betonbauweise“ und „Geschossdecke in Holzbauweise“) würde sich ein RFID-Chip somit in der Klettkomponente ausgewählter Abhängungen befinden und Informationen über den Bodenaufbau, die Leitungen sowie die Klettverbindung selbst geben. Alternativ können ausgewählte Objekte wie z.B. eine Stahlbetonplatte RFID-Chips erhalten, die z.B. einbetoniert werden. Eine optimale Einbautiefe von ca. 3 cm unter der Betonoberfläche wurde mittels Versuchen mit RFID-Chips hinter unterschiedlichen Beton-Dicken definiert. Bei anderen Objekten (z.B. Holz) können sie situationsspezifisch integriert und z.B. eingefräst oder aufgeklebt werden.

- **Einzelobjekte**: Alle Objekte mit Relevanz für eine direkte Wiederverwendung (Einzelteile, Einzelbauteile und Baukomponenten) werden mit QR-Codes versehen. Dadurch werden wie oben angeführt Basisdaten, somit wesentliche Daten für eine Kreislaufführung, direkt auf den Objekten dauerhaft gespeichert.

Das System ermöglicht die eindeutige Identifikation von Räumen sowie die Verwaltung der damit verbundenen Baumaterialien, Inventar und Zusatzinformationen. Hierbei kommt eine mobile Anwendung (ReCon-App), eine Cloud, elektronische Hardware (RFID-Lesegerät) und das oben dargestellte Bauteildaten-Dashboard zum Einsatz (siehe Abbildung 77). Die zentrale Funktion des Systems basiert auf der Generierung und Verknüpfung einer eindeutigen ID, die als Schlüssel für die Kommunikation zwischen den beteiligten Komponenten dient:

- Generierung der ID in der ReCon-App: In der ReCon-App wird eine eindeutige ID erstellt, die zur Identifikation eines spezifischen Raumes dient.
- Diese ID wird in der Cloud gespeichert und mittels einer API an das Bauteildaten-Dashboard übermittelt.
- Speicherung der ID auf einem RFID-Tag: Die generierte ID wird mithilfe der elektronischen Hardware auf einen RFID-Tag geschrieben.
- Dieser RFID-Tag wird anschließend in dem entsprechenden Raum angebracht, z. B. in/an der Wand, am Boden oder an einem unauffälligen Ort.
- Verknüpfung der ID mit Rauminformationen
- Die Bauobjekte des Raumes (z. B. Eichenholzboden, Stahlbetonwände) sowie Teile des Inventars (z. B. Möbel oder technische Geräte) werden dem Bauteildaten-Dashboard anhand einzelner Kennungen / RFID-Chips hinzugefügt.
- Diese Informationen werden dort mit der zuvor generierten ID verknüpft. Zusätzlich können durch die ReCon-App weitere Informationen, wie die Adresse oder die Raumnummer oder andere Details, ergänzt werden.
- Abruf der Informationen mittels ReCon-App
- Ein Mobilgerät mit der ReCon-App kann die ID des RFID-Tags in einem Raum auslesen: Die App sendet eine Anfrage mit der ausgelesenen ID an das Bauteildaten-Dashboard. Als Antwort erhält der Nutzer / die Nutzerin die mit der ID verknüpften Informationen, wie Baumaterialien, Inventar und Zusatzdaten.
- Logging und Nachverfolgbarkeit: Sämtliche Zugriffe und Änderungen an den gespeicherten Daten werden im Bauteildaten-Dashboard protokolliert. Diese Logs sorgen für eine transparente Nachverfolgbarkeit und gewährleisten eine lückenlose Dokumentation.

Abbildung 77: Datenstruktur Visualisierung [NET-Automation]



Elektronische Hardware

Das RFID-Lesegerät ist ein mobiles Gerät welches bei der Nutzung im Gebäude mitgeführt wird. Das Gerät erlaubt nicht nur das Auslesen, sondern auch das Beschreiben von RFID-Tags, was eine hohe Flexibilität in der Anwendung bietet. Hierzu wurde eine Frequenz von 13,56 MHz gewählt. Diese Frequenz gehört zur HF-Kategorie (High Frequency) und ist weit verbreitet, da sie sich gut für Nahbereichsanwendungen eignet.

Ein entscheidender Vorteil von RFID liegt in der Möglichkeit, Daten drahtlos über kurze Distanzen zu übertragen, ohne dass eine direkte Sichtverbindung zwischen Lesegerät und Tag („RFID-Chip“) erforderlich ist. Dadurch können Prozesse effizienter gestaltet und manuelle Eingriffe reduziert werden. Hierzu bestehen im Kontext der Projektes an die RFID-Tags folgende Anforderungen:

- **Einbausituation**: Die Tags sollten möglichst außerhalb metallischer Gehäuse oder Einbauten installiert werden, um die Funktionsfähigkeit der RFID-Kommunikation nicht zu beeinträchtigen.
- **Frequenz:** Die Tags müssen den gleichen MHz Bereich aufweisen wie der Reader
- **Speichergröße**:
    - Tags mit 4 – 6 Bytes (IDs) liegen zwischen 4 und 8 kB. 8 kB Speicher, dies entspricht ca. 4 Schreibmaschinenseiten, bestehenden aus 30 Zeilen à 60 Zeichen. Dies reicht für Basisdaten eines Objektes und einen Link zum Bauteildaten-Dashboard.
    - Im Projekt wurden Tests mit der MIFARE® 4K NFC-Karte durchgeführt, welche einen Speicher von 4 Kilobyte (4.096 Bytes) besitzt. Das bedeutet, dass auf dieser Karte theoretisch etwa 4.000 Zeichen gespeichert werden können. Dies reicht für

Basisdaten mehrerer Objekte und einen Link zum Bauteildaten-Dashboard. Besonders hervorzuheben ist, dass es bei diesem Produkt möglich war, im einbetonierten Zustand (in einem Betonblock), Informationen auf den Tag zu schreiben und auszulesen (siehe Abbildung 78 und Abbildung 79).

Abbildung 78: Erfolgreicher Schreibvorgang [NET-Automation]

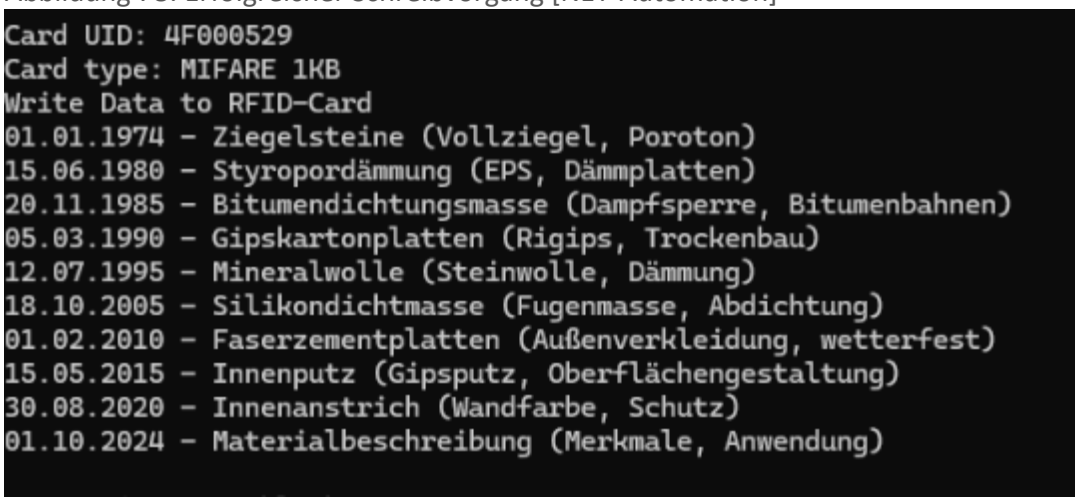
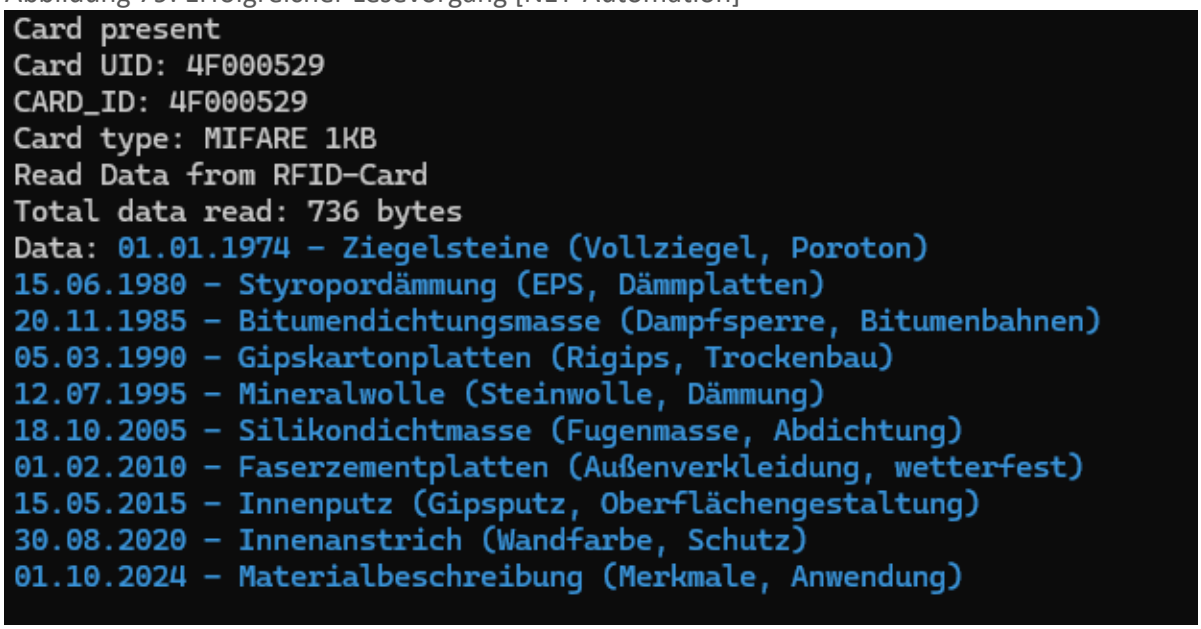


Abbildung 79: Erfolgreicher Lesevorgang [NET-Automation]

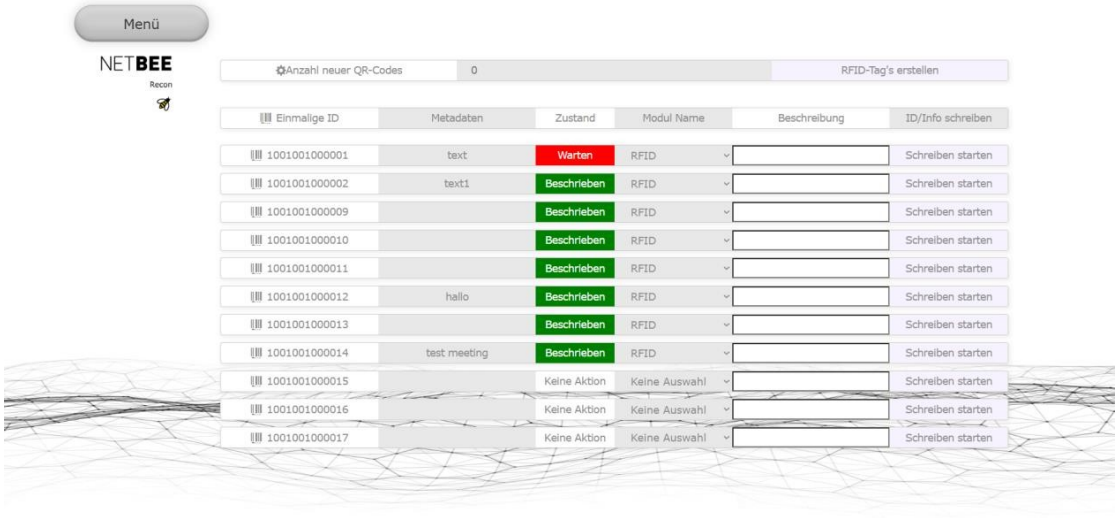


ReCon-App

Die ReCon-App dient als Plattform zur effizienten Verwaltung von RFID-Tags (siehe auch Abbildung 80). Über die Benutzeroberfläche können die IDs der beschriebenen Tags mit einer entsprechenden Liste von Baumaterialien oder Gegenständen verknüpft werden. Zusätzlich ermöglicht die

Anwendung eine schnelle und unkomplizierte Bearbeitung sowie das Abrufen und Aktualisieren der zugeordneten Daten, wodurch die Organisation und Nachverfolgbarkeit gewährleistet werden.

Abbildung 80: ReCon-App, Übersicht über RFID-Chips [NET-Automation]



5.3.3. Nutzungsszenarien

Für eine Kreislaufwirtschaft ist es von hoher Relevanz, welcher Akteur welche Informationen (welche Metadaten) auf welche Art und Weise benötigt oder erstellt. Für die Bearbeitung dieses Themas wurden die Nutzer*innen „Planung mit Reuse-Bauteilen“ und „Wartung und Reparatur“ ausgewählt und verschiedene Szenarien definiert. Diese Szenarien betreffen unterschiedliche Situationen der Nutzung von Informationen anhand dem oben dargestellten digitalen Bauteildaten-Dashboard sowie „vor Ort“ anhand elektronischer Komponenten.

Nutzer*in „Planung mit Reuse-Bauobjekten“

Dieser Nutzer oder Nutzerin bezieht bei der Planung neuer Gebäude oder Gebäudeteile wiederverwendbare Bauelemente aus anderen bestehenden Gebäuden (mit absehbarem Abbruchszeitpunkt) oder Objekte in einem Lager ein. Es werden somit Informationen über die Quantität und Qualität der potentiellen Materialien benötigt, die zu Beginn des Neubaus zur Verfügung stehen werden.[202]

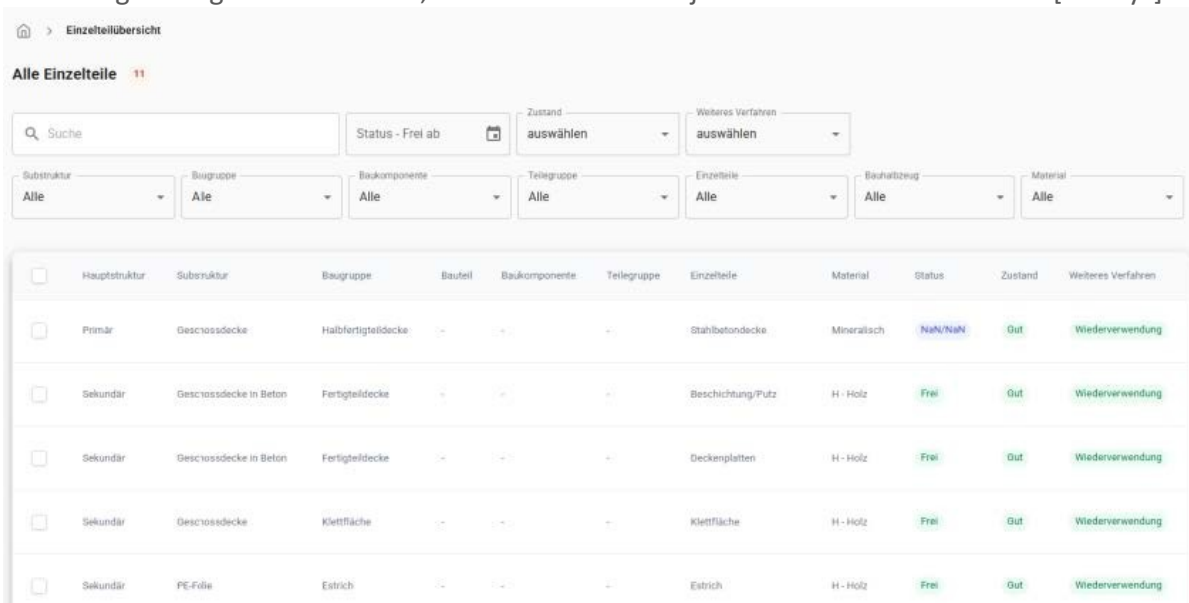
Primäre Nutzer*innen der Planung sind Planungsbüros, (Rück-)Baufirmen oder Privatpersonen, mit der erweiterten Möglichkeit, aktive Bauteilaustauschinitiativen einzubeziehen. Der Prozess greift auf alle (relevanten) Hierarchieebenen zu, von „Einzelteilen“ bis „Materialität“. Eine Suchfunktion ermöglicht es, Daten wie Materialität, Gliederung der Bauteile oder auch die mögliche Verfügbarkeit der einzelnen Elemente abzurufen und in nachfolgenden Planungsschritten oder als Zwischenschritt für die Registrierung in einer Bauteilaustauschinitiative einzusetzen. In diesem Prozess werden die Daten nur ausgelesen und in weiteren Planungsschritten implementiert. Hierzu können auch Abmessungen von 3D-Objekten herausgelesen und in die jeweilige Planungssoftware eingefügt werden.

[202] Vgl. Raudaschl, Dengg, Juhart 2023, 2.

Beispiel: Allgemeine Suche

Ein Planungsbüro kennt die Größen und Eigenschaften verschiedener Bauelemente die für die Realisierung eines kommenden Projekts benötigt werden. Sie werden darüber informiert, dass der Status eines Gebäudes oder einiger potentiell passender Bauobjekte auf „verfügbar“ geändert wurde. Das Büro besitzt Zugriff auf die Gebäudedatenbank und öffnet eine Übersicht über alle aufgelisteten Elemente, die zur Wiederverwendung zur Verfügung stehen, siehe Abbildung 81. Die Elemente werden in der neuen Planung verwendet, während sie sich noch im bestehenden Gebäude befinden.

Abbildung 81: Digitale Datenbank, Übersicht der Bauobjekte mit Filter-Suchfunktion [axtesys]



Bei diesem Szenario profitiert das Büro von der Möglichkeit, verfügbare Elemente nach ihren (Material-)Eigenschaften und Funktionen zu gruppieren, nach Namen und Größe zu filtern, eine Reservierung mit ungefährem Wiederverwendungszeitpunkt vorzunehmen und in weiteren Schritten zu kaufen. Es wird die gesamte Datenbank mit den für die Planung benötigten Informationen genutzt, ohne physische Eigenschaften vor Ort erheben zu müssen. Planende Akteure erhalten dadurch eine fundierte Grundlage, um frühzeitig Entscheidungen über den potenziellen Wiedereinsatz zu treffen: Sind genügend Komponenten in geeigneter Qualität und Menge vorhanden? Oder sind diese bereits für andere Vorhaben reserviert beziehungsweise aufgrund ihres Zustands nicht mehr verwendbar?

Durch die übergeordnete Verknüpfung mehrerer Gebäude oder Gebäudebestände kann perspektivisch zudem eine umfassende Materialdatenbank aufgebaut werden, die als Ressourcenspeicher für zukunftsfähiges Planen und Bauen dient.

Beispiel: Konkretere Suche

Die Planerin oder der Planer sucht z.B. nach einem Fenster für eine definierte Öffnung in einer bestimmten Größe oder nach einem Parkett für eine bestimmte Fläche und Anwendung. Es wird eine Übersicht der verfügbaren Bauobjekte mit einer Filterfunktion nach Größe, Fläche oder Material angeboten. Dabei ist es essenziell, Informationen zum Zustand der Elemente sowie zu deren

verbleibender Lebensdauer zu berücksichtigen. Das ausgewählte Objekt wird, während es sich noch im bestehenden Gebäude befindet, reserviert und in die Architekturplanung aufgenommen.

Damit Gebäudeelemente unter einem bestimmten Namen gefunden werden können, muss die Gliederung / Filterung eines Gebäudes und des Dashboards in die verschiedenen funktionalen und strukturellen Komponenten, Elemente und Materialien möglich sein. So wird beispielweise eher nach „Holzboden“ oder „Parkett“ als nach „Holzmaterial“ gesucht, ebenso wie eher nach „Fenster“ als nach „Fensterrahmen“ gesucht.

Neben der Darstellung des aktuellen Zustands ist insbesondere auch ersichtlich, ab wann ein Bauteil voraussichtlich verfügbar sein wird, etwa im Zuge eines geplanten Rückbaus oder Umbaus. Informationen zum Alter der Bauteile sowie zu produktspezifischen Lebensdauern (z. B. laut Herstellerangaben) unterstützen eine realistische Einschätzung der weiteren Nutzbarkeit. Ergänzend bieten die hinterlegten Metadaten eine zusätzliche Prüfbasis, um spezifische Material- oder Performanceeigenschaften mit den Anforderungen des neuen Projekts abzugleichen.

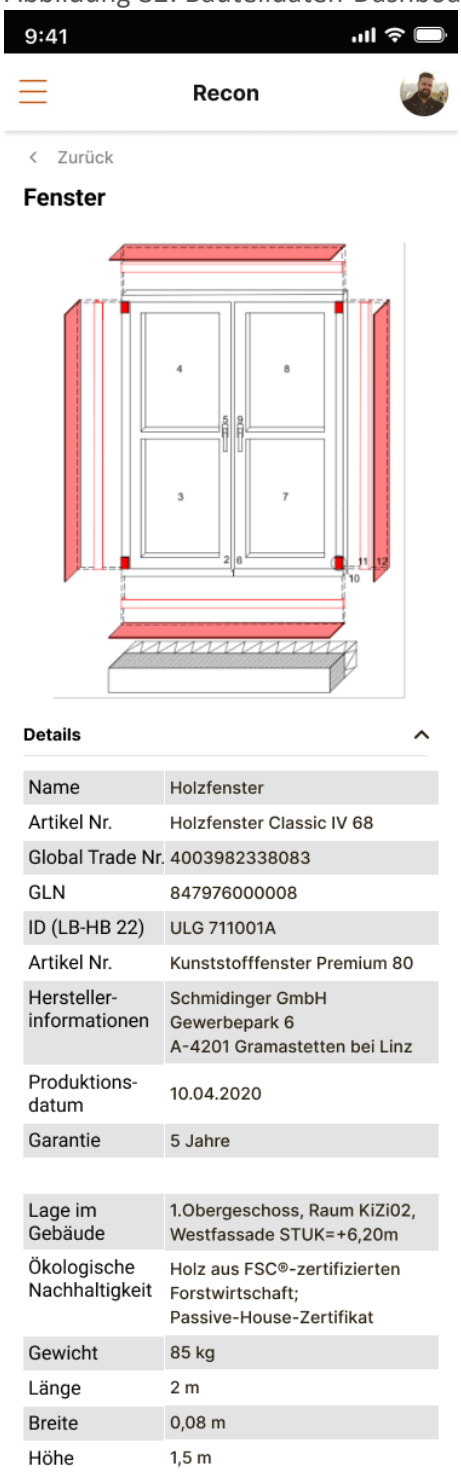
Da diese Suche sehr spezifisch ist, kann es zudem vorkommen, dass die Planerin oder der Planer das Objekt vor Ort untersuchen möchte, wofür es leicht auffindbar sein muss. Dies betrifft die Lagerstätte oder den eingebauten Zustand. Da z.B. ein Fenster im eingebauten Zustand Teil der Gebäudehülle ist, kann die Untersuchung von außen und / oder von innen erfolgen. In diesem Zusammenhang ist eine benutzerfreundliche Lokalisierung nach Stockwerk, Raum-Name und -nummer mit optionaler Höhenangabe in Bezug auf die zugehörige Fußbodenoberkante des Stockwerks möglich (menschlicher Maßstab, keine zusätzlichen Hilfsmittel erforderlich). Sobald man sich in dem entsprechenden Raum befindet, könnten die visuell/direkt zugänglichen (nicht vollständig eingebauten) Elemente mit erkennbaren QR-Codes versehen sein, die in der durchschnittlichen Sichthöhe des Menschen angebracht sind, was jedoch unerwünschte Auswirkungen auf die Ästhetik des Innenraums hätte. An einem Fenster könnte ein QR-Code an einer optisch weniger störenden Stelle, z.B. an der Innenseite des Rahmens angebracht werden, nur zugänglich, wenn der Fensterflügel geöffnet ist. Für die Parkettfläche eines Raumes könnte ein QR-Code unauffällig in einer Bodendose integriert werden. Bei Technischer Gebäudeausrüstung ist zudem eine sichtbare Anbringung des QR-Codes an einer Leitung denkbar, da diese üblicherweise in Installationsschächten, abgehängten Decken, oder in Technikräumen mit geringeren ästhetischen Anforderungen verläuft.

Beispiel: Vor-Ort

Ein Bauelement (mit eindeutiger Kennzeichnung) wird bei einer öffentlichen Veranstaltung, wo abbruchreife Gebäude besucht und Bauteile reserviert werden können entdeckt und als potenzielles Element für die Wiederverwendung in künftigen Projekten erkannt.

Dies können ein Planer oder eine Planerin, aber auch einfach eine interessierte Person, welche die Elemente in Projekte einbeziehen möchte. Der QR-Code kann mit Smartphone gescannt werden, um auf grundlegende Informationen zugreifen (siehe Abbildung 82) und um zu reservieren, sollten sie in Zukunft verfügbar sein. Alternativ kann eine Anfrage um Benachrichtigung gestellt werden, wenn das Element verfügbar wird.

Abbildung 82: Bauteildaten-Dashboard-App, grundlegende Informationen [axtesys]



Nutzer*in „Wartung und Reparatur“

Im Einklang mit dem Ziel, keine neuen Produkte zu verwenden, sondern bestehende weiter zu nutzen, solange ihre Funktionalität, Sicherheit und Nutzbarkeit gewährleistet sind, müssen Komponenten oder Produktteile gewartet oder repariert werden. Um ihre Funktionalität zu erhalten und ihre maximale (technische) Nutzungsdauer zu erreichen. In diesem Kontext umfasst dieses Szenario Aktivitäten im Zusammenhang mit der Inspektion, Wartung und Reparatur von

Komponenten, entsprechend den Modulen B2 und B3 der Nutzungsphase der ISO 21930.[203] Dies betrifft nicht nur Expert*innen, sondern auch z. B. Hausbesitzer*innen, welche es vorziehen, Arbeiten selbst auszuführen und dabei ein Protokoll über die ausgeführten Arbeiten zu führen.

Beispiel: Inspektion, regelmäßig

Bei einer regelmäßigen Inspektion werden an der Decke Wasserflecken festgestellt, was auf einen Dichtungsfehler bei einem Rohr hindeuten kann. Ein ähnliches Problem kann an anderen Stellen mit demselben Einbaudatum und desselben Herstellers auftreten.

Aus Sicht der inspizierenden Person wäre eine bevorzugte Platzierung des RFID-Chips oder QR-Codes für dieses Szenario z.B. am Montagemittel des Rohres oder auf der Unterseite des Rohres selbst. Sollte sich das Rohr in einer abgehängten Decke befinden, und dort die Feuchtestellen entdeckt werden, kann die Platzierung des QR-Codes oder RFID-Chips an oder in der abgehängten Decke erfolgen – z.B. im Bereich einer Revisionsklappe. So kann der Zugriff auf die Produktdaten und auf das Dashboard erfolgen. Ebenfalls möglich ist das digitale Hinzufügen eines Hinweises auf notwendige Wartungsarbeiten und die Anwendung dieses Hinweises auf ähnliche Leitungen in dem Gebäude (durch z.B. eine automatische Auswahl ähnlicher Komponenten).

Während der Nutzungsphase des Gebäudes besteht somit die Möglichkeit, den Zustand einzelner Komponenten systematisch zu erfassen sowie Inspektionen zu dokumentieren. Mithilfe geeigneter Lesegeräte – beispielsweise RFID-Scanner in Kombination mit einer mobilen Applikation – können die in RFID-Chips gespeicherten Informationen ausgelesen werden. Scanner mit integrierter Kamera ermöglichen zudem das parallele Erfassen von QR-Codes über dieselbe Anwendung. Die ausgelesenen Daten können lokal bearbeitet oder – bei bestehender Internetverbindung – direkt mit dem zentralen Dashboard synchronisiert werden.

Beispiel: Wartung

Holzböden müssen in bestimmten Zeitabständen nass gereinigt, imprägniert, abgeschliffen, oder mit einem Anstrich, womöglich einer bestimmten Farbe behandelt werden, wobei die Plattform die Eigentümerin / den Eigentümer automatisch und rechtzeitig benachrichtigt.

Je nach Umfang des Eingriffs kann sich die Wartung auf die Materialebene des Bauteils (Holz) oder auf das gesamte Objekt beziehen. Beispielsweise müssen zum Abschleifen und Streichen die Sockelleiste entfernt werden. Abgeschlossene Arbeiten werden über den QR-Code oder RFID-Chip in der Datenbank vermerkt.

Wartungsarbeiten lassen sich über die Anwendung dokumentieren und fortlaufend aktualisieren. Darüber hinaus kann über diese App fortlaufend der Zustand der Bauteile hinsichtlich einer potenziellen Wiederverwendung oder eines geplanten Rückbaus bewertet und erfasst werden. Dies ermöglicht eine fundierte Entscheidungsgrundlage für zirkuläre Bauprozesse.

Beispiel: Reparatur, klein

Die Reparatur befasst sich mit dem Ausfall einer wesentlichen Funktion oder einer Komponente des Objektes, deren Behebung mit geringem bis mittleren Aufwand verbunden ist. Nach der Reparatur wird die Verwendbarkeit beziehungsweise die Gebrauchstauglichkeit des Bauteils oder der Komponente, ohne Erweiterung dieser, wiederhergestellt. Die durchgeführte Reparatur wird in der

[203] Vgl. ISO 21930, 18.

Datenbank, einschließlich der verwendeten Teile oder Komponenten und der durchgeführten Aufgaben, erfasst.

Beispielsweise wird ein gesprungenes Glas an einem Fenster identifiziert. Die Person sucht nach einem QR-Code in der Nähe der Scheibe und öffnet in der App das Objekt, siehe Abbildung 83. Worauf ein Reparatur in Auftrag gegeben werden kann. Siehe Abbildung 84

Im Falle eines komplexen Fensters oder einer verglasten Gebäudefassade könnte es zudem von Vorteil sein, wenn Scheiben eine eigene eindeutige Kennung für eine nahtlose Reproduktion hätten, so dass es sich um einen „Austausch" handelt. Die Notwendigkeit einer solchen detaillierten Kennzeichnung hängt jedoch von der Größe des Gebäudes und der Komplexität des Elements ab und könnte unter Berücksichtigung des menschlichen Maßstabs und der Zugänglichkeit weiter analysiert werden. Eine Idee von unsichtbaren QR-Codes, die in das Material eingearbeitet werden (z.B. Digital Watermarks[204]), könnte sich dementsprechend auf Prozesse beziehen, die für die Herstellung relevant sind, ohne dass Besitzer*innen oder Handwerker*innen einbezogen werden müssen.

Nach der Reparatur und im Fall eines Komponentenaustauschs werden neue Objekte im System angelegt, mit einem QR-Code versehen oder in bestehende RFID-Datenträger eingespielt.

[204] AIM – European Brands Association 2020.

Abbildung 83: Bauteildaten-Dashboard-App, grundlegende Informationen [axtesys]

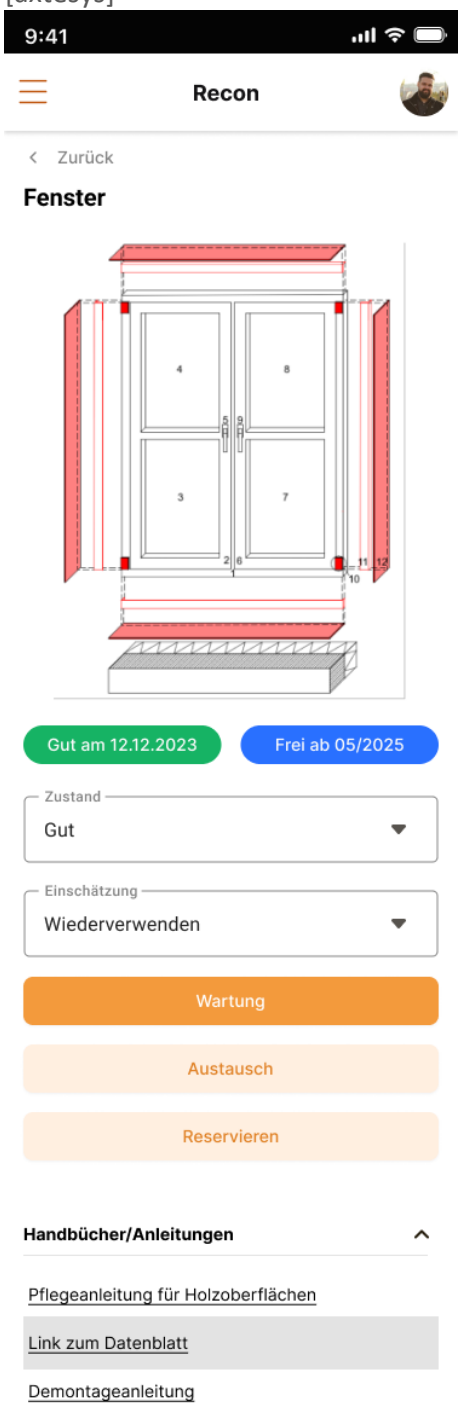
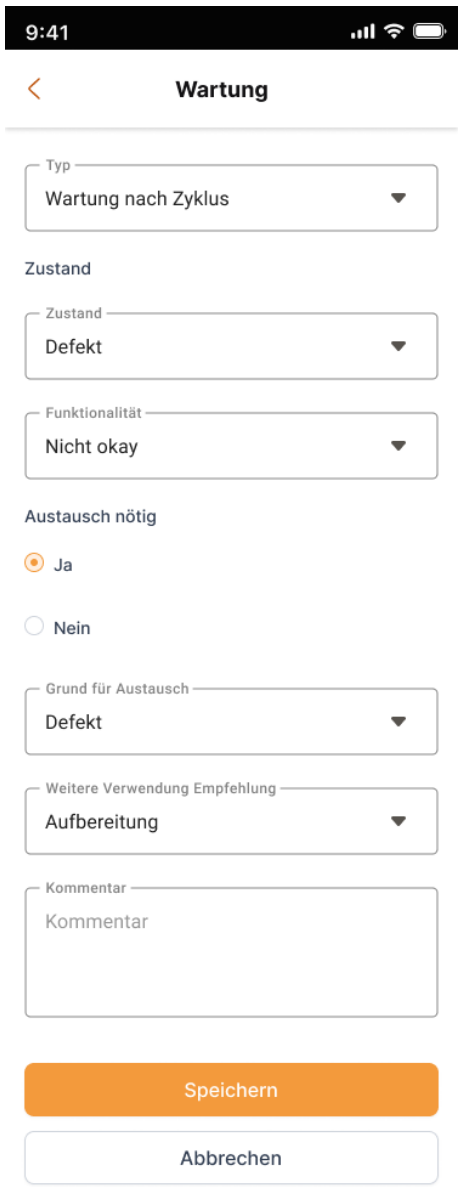


Abbildung 84: Bauteildaten-Dashboard-App, Reparaturauftrag [axtesys]



6 Schlussfolgerungen

Die industrielle Forschung „ReCon“ bietet Erkenntnisse im Kontext von konstruktiv technischer und räumlicher Flexibilität, sowie eines fortlaufenden Bauteildaten-Managements. Dies erfolgt anhand der Kernelemente der „Rückbaubarkeit“ durch die Kletttechnologie sowie der „Information“ über verbaute Elemente und Objekte. Die gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse eröffnen für das Projektteam eine Grundlage in neuen Forschungsbereichen. Es wird angestrebt, diese in unterschiedlichen Folgeprojekten weiterzuführen.

6.1. Projekterkenntnisse

Im Rahmen des Projekts konnten zentrale Erkenntnisse in den Bereichen „Verbindungssystem I“, „Verbindungssystem II“ sowie „Bauteildatensystem“ gewonnen werden.

6.1.1. Verbindungssystem I

Die Untersuchung im Bereich Verbindungssystems I (Kleben von Klettkomponenten auf Beton und Holz) zeigt, dass industrielle Klettkomponenten grundsätzlich in der Baubranche anwendbar sind. Was durch aktuelle Produktentwicklungen (z.B. „RigiMove“ von *SAINT-GOBAIN RIGIPS GmbH*)[205] unterstrichen wird. Ein hohes Potential besteht vor allem in linearen Bereichen mit hohem Installationsgrad wie in Gängen oder in Installationsschächten. Wie auch bei Bauteilen aus Beton, da hier vergleichbare Montageprozesse (Bohren und Schrauben) sehr aufwändig sind. Bei Bauteilen aus Holz ermöglicht die Klettverbindung schnellere und beschädigungsfreie Befestigungsprozesse.

Die Nutzungsdauer (und mögliche technische Lebensdauer) des Gesamt-Klettverbindungssystems wird grundsätzlich als hoch eingeschätzt (Beton- und Holzbauteile 150 Jahre[206], Kleben auf Beton 60 Jahre[207], Kleben auf Holz 150 Jahre[208], Klettprodukte und Objekte des Ausbaus (Wärmedämmverbundsystem, Gipskartonplatten) 60 Jahre [209] [210] [211]). Da industrielle Klettprodukte jedoch noch nicht so lange im Bauwesen eingesetzt werden, kann keine genaue Zahl genannt werden.

Beton- und Holzbauteile wo die Klettverbindung angewandt werden kann sind Deckenplatten (Massiv oder z.B. Hohldielen), aber auch Außenwände (z.B. Rahmen- oder Massivbauweise), Innenwände sowie Stützen und Träger. Das Aufbringen der Klettkomponenten-Bahnen erfolgt durch Kleben im Rahmen der Vorfertigung (Neubau) oder auf der Baustelle (Neubau oder Sanierung).

Im Rahmen der Versuche konnte ein duktiles Tragverhalten der Klettverbindung festgestellt werden. Die großen Verformungen die der Klett aufnehmen kann sind für bautechnische Anwendungen ideal,

[205] Vgl. SAINT-GOBAIN RIGIPS GmbH 2024.
[206] Vgl. Kerz et al. 2008, 8–9.
[207] Vgl. Ebd., 9.
[208] Vgl. Ebd., 11–22.
[209] Vgl. Gottlieb Binder GmbH & Co. KG 2023.
[210] Vgl. Kerz et al. 2008, 12–13.
[211] Vgl. Ebd., 73–78.

da dadurch ein Ankündigen des Versagens gewährleistet ist und in vielen Anwendungsfällen eine Lastumlagerung ermöglicht wird.

Es konnte festgestellt werden, dass je nach Klettprodukt sowohl die Orientierung der beiden Klettkomponenten zueinander als auch die Temperatur einen Einfluss auf die Haftzugfestigkeit haben (können). Zudem wurde bestätigt, dass (größere) Exzentrizitäten der Lasteinleitung auf Grund der einseitigen Belastung zu einer Reduktion der Haftzugfestigkeit (bezogen auf die gesamte Klettfläche) führen. Darüber hinaus ist ein Einfluss der Luftfeuchtigkeit, der Produktionscharge und des Alters des Produktes (z.B. lange Lagerzeiten) denkbar, konnte im Projekt jedoch nicht untersucht werden.

6.1.2. Verbindungssystems II

Im Bereich Verbindungssystems II (Klettkomponenten aus Rohbaustoffen oder Papierwerkstoffen) konnte aufgezeigt werden, dass sich Oberflächen von Beton und Holz, sowie Papierwerkstoffe so gestalten lassen, dass diese (mit speziell entwickelten Verbindungspartnern) eine Klettverbindung ermöglichen. Diese neuartigen Verbindungssysteme besitzen ein großes Potenzial für eine zerstörungsfrei rückbaubare Bauweise und stellen eine vielversprechende Grundlage für die Weiterentwicklung im Sinne des zirkulären Bauens dar.

Die Lebensdauer der Klettkomponenten aus Rohbaustoffen wird (bei einem entsprechenden Schutz der Klettelemente) als hoch eingeschätzt und mit 150 Jahren angenommen, was der Nutzungsdauer der Beton- und Holzbauteile entspricht.[212]

Klettbeton-Bauteile sind im Rahmen der Vorfertigung als Halbfertigteil oder als Fertigteil herzustellen. Dies umfasst die Einzelbauteile Deckenplatten, Außenwände, Innenwände sowie Stützen und Träger. Im Rahmen von Herstellungsversuchen wurde festgestellt, dass Beton-Klettkomponenten mit runden und eckigen Pilzkopfelementen wie auch mit T-förmigen Nuten hergestellt werden können. Neben der Herstellung bestehen wesentliche Aspekte in der Anlieferung der Bauteile auf die Baustelle, einer dortigen Lagerung und in der Montage, wobei die kleinteiligen Klettelemente vor Beschädigungen zu schützen sind. Hierzu können diese versenkt hergestellt, ausgespart oder durch eine zusätzliche Konstruktion geschützt werden.

Im Rahmen von Herstellungsversuchen wurde festgestellt, dass Beton-Klettkomponenten mit runden und eckigen Pilzkopfelementen wie auch mit T-förmigen Nuten hergestellt werden können. Je nach Schalungsmaterial und resultierendem Herstellungsverfahren kommt es zu Vor- und Nachteilen sowie unterschiedlicher Qualität der Klettelemente.

Als Klettholz-Bauteile bieten sich Deckenplatten, Außenwände, Innenwände sowie Stützen und Träger an. Hierzu werden diese im Rahmen der Vorfertigung durch ein subtraktives Verfahren (Schneiden, Fräsen) oder durch ein additives Verfahren (Auf- oder Einleimen) bearbeitet. Wie bei Klettbeton ist erneut die Anlieferung der Bauteile auf die Baustelle, eine potentielle Lagerung und die Montage wesentlich, wobei die kleinteiligen Klettelemente vor Beschädigungen zu schützen sind.

Mittels Herstellungsversuchen konnten eckigen Pilzkopfelemente und V-förmige Nuten durch Schneiden mittels schräggestelltem Sägeblatt hergestellt werden. Runde Pilzköpfte wurden durch

[212] Vgl. Kerz et al. 2008, 8–9.

das Einbringen von „LignoLoc® Holznägeln“ hergestellt. Beide Verfahren waren, aufgrund der guten Bearbeitbarkeit von Holz, sehr einfach durchzuführen und führten zu guten Ergebnissen.

Zur Erforschung der geometrischen und materialtechnischen Bedingungen der Gegenstücke von Klettbeton und Klettholz eignet sich der 3D-Druck, welcher hinsichtlich Variationen in Skalierung, Geometrie (X-Pilzköpfe und O-Pilzköpfe) und Materialität viele Vorteile bietet.

Als Klettpapier konnte ein System entwickelt und hergestellt werden, welches gefaltete bzw. gebogenen Pilzköpfe umfasst, wie auch ein Gegenstück, bestehend aus Schlitzen die schmäler sind als die Dicke der Pilzköpfe. Hierzu wurden die Pilzköpfe entweder gefalzt oder mit einer Zange geformt, wobei die Methode mittels Falzung für eine großtechnische maschinelle Produktion gut geeignet wäre.

Alle im Projekt entwickelten Klettsysteme weisen Haftzugfestigkeiten auf, die mit handelsüblichen Klettprodukten vergleichbar sind.

6.1.3. Bauteildatensystemen I und II

Es konnte eine Gebäudegliederung entwickelt werden, welche alle wesentlichen Objekte eines Gebäudes (z.B. Material, Einzelteil, Baukomponente) umfasst. Damit soll eine Verschränkung der (BIM-) Planung mit dem gebauten Objekt ermöglicht werden wie auch der Zugriff auf noch in Gebäuden gebundenen oder gerade rückgebauten Objekten ermöglicht werden. Mit dieser Gliederung wird eine Definition von Bau-Objekten vorgeschlagen, welche den Austausch und Diskussionen rund um die Kreislaufwirtschaft vereinfachen soll.

Im Hinblick auf unterschiedliche Nutzer*innen wurde ein Bauteildaten-Dashboard entwickelt, welches in diagrammatischer Positionierung der Texte bzw. Objektnamen die hierarchische Struktur des Gebäudes darstellt, einschließlich der zugehörigen Elementdaten und spezifischer Informationen zu einzelnen Bauobjekten. In einem Editiermodus können die Daten manuell ergänzt, bearbeitet oder angepasst werden. Auf übergeordneten Hierarchiestufen besteht die Möglichkeit, Sub-Elemente flexibel hinzuzufügen, wodurch versucht wird, eine Abbildung komplexer Bauteilzusammenhänge zu ermöglichen.

Für eine Nutzung des Dashboards wurde ein Konzept entwickelt und auf komponentenebene umgesetzt, bei denen sich RFID-Chips und QR-Codes auf oder in vordefinierten Elementen befinden. Hierbei wird pro Raum ein RFID-Chip an einer leicht auffindbaren Position angebracht, welcher eine Verknüpfung zum Dashboard sowie Informationen über die Hauptobjekte des Raums und der weiteren RFID-Chips enthält. Ergänzend wird ein RFID-Chip für jeden Bauteilaufbau (z.B. Geschossdecke, Fassade) angedacht, welcher sich an der Schnittstelle zwischen kurzlebigen und langlebigen Objekten befindet und Informationen zu den Objekten des Aufbaus liefert. Einzelobjekte werden für eine direkte Wiederverwendung (Einzelteile, Einzelbauteile und Baukomponenten) mit QR-Codes versehen, welche Basisdaten (wesentliche Daten für eine Kreislaufführung), direkt auf den Objekten physisch dauerhaft speichern.

Während die Lesbarkeit der RFID-Tags durch Materialeinflüsse wie Metall oder dicke Holzkonstruktionen eingeschränkt sein kann, ermöglicht eine durchdachte Positionierung der Tags sowie die Integration ergänzender Technologien wie QR-Codes eine stabile Nutzung. Gleichzeitig erfordert die begrenzte Speicherkapazität der RFID-Tags die Nutzung des oben genannten

Bauteildaten-Dashboards. Einer externen Datenbank, die die Informationen über die gesamte Lebensdauer des Systems hinweg zuverlässig speichert und verwaltet.

Es wird deutlich, dass die Implementierung und Nutzung von RFID-Technologie nicht nur von den richtigen technischen Entscheidungen abhängen, sondern auch von der sorgfältigen Berücksichtigung individueller baulicher und materialtechnischer Anforderungen. Der Verbau der RFID-Tags muss an jedes Gebäude und jede Baustelle angepasst werden, um die Lesbarkeit und Zuverlässigkeit des Systems zu gewährleisten.

Zudem zeigt sich, dass eine Vielzahl unterschiedlicher Ansätze im Umgang mit digitalen Bauwerks- und Bauteildaten existiert. Dabei sind nutzerzentrierte Lösungen erforderlich, da nicht alle Akteur*innen im Bauprozess denselben Zugriff auf Gebäudedaten benötigen. Hieraus ergibt sich ein breites Innovationsfeld – insbesondere hinsichtlich Rückbauplanung, Datenarchivierung und der Verknüpfung physischer Bauteile mit digitalen Informationen über QR-Codes oder RFID-Technologien.

6.2. Relevante Zielgruppen und Weiterverwendungsmöglichkeiten

Die Projektergebnisse sind für mehrere Zielgruppen von Interesse:

- Klettverschluss-Hersteller, denen sich ein neuer, bislang unerschlossener Anwendungsbereich in der Bauindustrie eröffnet – mit entsprechendem wirtschaftlichem Potenzial.
- Unternehmen im Bereich Fertigteilbau, Innenausbau sowie TGA. Insbesondere solche, die an reversiblen Konstruktionen interessiert sind. Die Integration von Klettverbindungen könnte hier zur Entwicklung zerstörungsfrei demontierbarer Bauteile führen.
- Forschungseinrichtungen, Planungsbüros, Rückbauunternehmen, wie auch Unternehmen im Bereich der Digitalisierung oder Elektronik, die sich mit zirkulären Baukonzepten, materialgerechtem Rückbau und digital gestützter Bauprozesse befassen.

6.3. Rechtliche Herausforderungen

Die entwickelten Konzepte unterliegen – je nach Anwendung – unterschiedlichen bauaufsichtlichen Anforderungen. Während bei kleinteiligen Anwendungen (z. B. im Innenausbau) ggf. keine gesonderte Zulassung notwendig ist, müssen bei tragenden oder sicherheitsrelevanten Bauteilen spezifische Prüfverfahren stattfinden. Eine universell gültige bauaufsichtliche Zulassung für eine allgemeine Anwendung der Klettverbindung ist zwar nicht nötig, bei unterschiedlichen Anwendungen sind jedoch Anforderungen an Brandverhalten, UV- und Feuchtebeständigkeit sowie Langzeitverhalten der Materialien zu berücksichtigen.

6.4. Verwertung und Verbreitung der Ergebnisse

Ein Teil der Forschungsergebnisse wurde bereits in zwei peer-reviewed Fachpublikationen veröffentlicht (*VIBRArch 2024: 4th Valencia International Biennial of Research in Architecture* und

Sustainable Built Environment Conference in Zürich (SBE 2025)), was die Relevanz und Aktualität des Themas unterstreicht. Auch wurde das Thema „Klettpapier“ in einer Bachelorarbeit bearbeitet. Weitere Veröffentlichungen betreffen das *GAM - Graz Architecture Magazine* und die Zeitschrift *architektur.aktuell* mit der Ausgabe 12/2024.

Zudem wurde das Projekt beim *Sustainability Award 2024* in der Kategorie Forschung mit Gold ausgezeichnet und werden Projektinhalte aktuell als Teil der Ausstellung „MORE THAN RECYCLING. DIE AUSSTELLUNG ZUR KREISLAUFWIRTSCHAFT“ im *Technischen Museum Wien* ausgestellt.

Weitere Publikationen und Folgeprojekte sind in Bearbeitung. Das Thema des „kreislauffähigen Bauens“ befindet sich aktuell in einem starken Aufschwung, zahlreiche Plattformen, Standards, Technologien und Anwendungen werden parallel entwickelt. Die Ergebnisse des Projekts positionieren sich in diesem dynamischen Feld und eröffnen weitreichende Möglichkeiten für zukünftige Anwendungen und Kooperationen – sowohl im wissenschaftlichen als auch im wirtschaftlichen Bereich.

7 Ausblick und Empfehlungen

Die im Projekt entwickelten Ansätze zu reversiblen Klettverbindungssystemen und zum Bauteil-Datensystem eröffnen ein breites Feld für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsschritte.

Die Ergebnisse zum Konzept **Verbindungssystems I (Kleben von Klettkomponenten auf Beton und Holz)** zeigen auf, dass im Kontext der Anwendung industrieller Klettkomponenten im Bauwesen weiterer Forschungsbedarf besteht. Dies betrifft im Wesentlichen das Verhalten der Verbindung unter klimatischen Wechselbeanspruchungen, wie auch Einflüsse auf die Haftzugfestigkeit (z.B. Orientierung, Exzentrizität bei der Lasteinleitung, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Produktionscharge, Alter des Produktes).

Ergänzend könnte die Anwendung von Klettkomponenten im Holzbau als Dampfbremse untersucht werden. Wodurch Themen der Bauphysik wie auch der Montage von Baukomponenten ohne Durchdringung dieser Ebene abgedeckt würden. Dies eröffnet Potenzial für die Weiterentwicklung langlebiger und zerstörungsfrei rückbaubarer Wandschichten im Holzbau. Hierbei ist eine enge Kooperation mit industriellen Partnern zu empfehlen, da Produktentwicklungen vorrangig auf industrieller Seite stattfinden, sowie Fachkenntnisse zu u.a. Herstellungsprozessen, Materialien und dem Verhalten der Verbindung vorhanden sind.

Das Konzept **Verbindungssystem II (Klettkomponenten aus Rohbaustoffen oder Papierwerkstoffen)** weist ein hohes Innovationspotenzial auf, sowohl hinsichtlich gezielter Optimierungen als auch im Hinblick auf die Anwendungen in der Architektur und der Bauindustrie. Wobei in zukünftigen Arbeiten die Herstellung, geometrische und materialtechnische Aspekte, auf Rohbauseite und beim Gegenstück, zu thematisieren wären:

- **Herstellung**: Die im vorliegenden Projekt angewandten Verfahren dienten der Überprüfung der Machbarkeit und weisen noch keine Optimierungen hinsichtlich Ablauf, Technologien oder ökologischer Aspekte auf. Dies ist in Folgeprojekten zu adressieren, wobei insbesondere die Skalierbarkeit und die serielle Fertigung maßgebend sind. Im Kontext von Klettbeton wäre hierzu die Anwendung von Silikon-Kautschukschalungen denkbar**.** Wenn wiederverwendbar gestaltet, könnten solche Silikon-Kautschukschalungen mit gängigen Schalungen und Prozessen kombiniert werden.
- **Geometrie**: Das Klettsystem und seine Eigenschaften sind, neben materialtechnischen Aspekten, primär von der Geometrie der Klettelemente abhängig. In diesem Kontext ist die Geometrie des Verbindungspartners von Klettbeton und Klettholz wie auch die Herstellungsmethode (Spritzguss, Stanzen) weiterzuentwickeln, um u.a. das Verhältnis von Schließkraft zu Haftzugfestigkeit zu optimieren.
- **Material**: Eine Optimierung der Betonmischung im Kontext der Herstellung ermöglicht eine bessere Herstellbarkeit (z.B. durch höhere Fließfähigkeit) wie auch Festigkeit der Klettelemente. Die Auswahl des Holzes wäre auf industrielle Herstellprozesse abzustimmen (Integration in bestehende Holzprodukte).

Im Bereich **Bauteildatensystem** besteht Forschungsbedarf zur Weiterentwicklung und Konkretisierung des Systems im Kontext unterschiedlicher Nutzer*innen. Sowie in der Integration digitaler Bauteilinformationen in bestehende Planungsumgebungen. Die systematische Einbindung von Material- und Lebenszyklusdaten in gängige BIM-Planungstools wie Archicad (*Graphisoft® SE*)

oder Revit (*Autodesk®*) sollte weiterverfolgt werden, um Informationsketten durchgängig von der Planung bis zur Rückbauphase digital abbilden zu können. Ein weiterer Schritt dieser Entwicklung wäre in die Richtung intelligenter Gebäude, z.B. könnte ein zentrales Element bzw. Computer das Verhalten des Gebäudes, die Zubauten und Ausbauten durch Entfernung oder Zugabe von Bauteilen mit RFID-Chips selber erkennen und verwalten.

Darüber hinaus besteht hohes Potential in der Erforschung der Integration eindeutiger Identifikatoren (RFID-Chips, QR-Codes) und Basisdaten in Bauteile. Zur langfristigen Archivierung und Weiterverwertung von Gebäude- und Bauteildaten, wie auch zur Optimierung digitaler Planungsprozesse unter Berücksichtigung zukünftiger Rückbauszenarien.

8 Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Cleaneo Klett Surface 14
Abbildung 2: RigiMove; 1 Rigips Habito N+F raumhoch mit seitlicher Nut- und Feder; 2.1 Teleskopierbares Metallmodul 75 mm, I-Modul (Mittelelement); 2.2 Teleskopierbares Metallmodul 75 mm, C-Modul (Randelement); 3 Rigips Anschlussdichtung; 4 Klettband; 5 Dämmstoff: ISOVER Akustic TP1, 60 mm; 6 Vorkomprimiertes Fugendichtband; 7 Adfors-Glasfasertapete Novelio Nature 15
Abbildung 3: Klett-TGA - Kleben auf Ziegel 16
Abbildung 4: Klett-TGA - Kleben auf Holz 16
Abbildung 5: Klettbeton 16
Abbildung 6: Struktur „Materialpassport“ 21
Abbildung 7: Prozess QR-Code Gravur auf Holz 23
Abbildung 8: Forschungsfeld [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz] 24
Abbildung 9: Andrücken der Klettverbindung (Durchmesser 50mm) [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz] 29
Abbildung 10: Zugversuch (Durmesser 100mm) [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz] 29
Abbildung 11: Dauerlastversuche Serie 1 [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz] 31
Abbildung 12: Dummy-Versuchskörper ohne Klett [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz] 31
Abbildung 13: Teilweise Öffnung der Klettverbindung bei Versuchskörpern unter Dauerlast [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz] 32
Abbildung 14: Zusatzgewichte zur Beschwerung der Versuchskörper bzw. des Prüfgestells [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz] 32
Abbildung 15: Versuchsaufbau der ohne Last gealterten Versuche und Referenzversuche [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz] 33
Abbildung 16: Versuchsaufbau der ohne Last gealterten Versuche und Referenzversuche [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz] 33
Abbildung 17: Dauerlastversuche Serie 2 [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz] 34
Abbildung 18: Versuche „Exzentrizität“ [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz] 35
Abbildung 19: Versuche „Randfehler“ [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz] 35
Abbildung 20: Versuche „Orientierung“ [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz] 35
Abbildung 21: Versuche „Orientierung“ [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz] 35
Abbildung 22: eingebauter Versuchskörper [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz] 36
Abbildung 23: Versuchskörper während der Prüfung [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz] 36

Abbildung 24: Fräsen von Wachs unter Wasser [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz] 37
Abbildung 25: Auflösen der Wachsschalung mit Temperatur [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz] 37
Abbildung 26: Herstellung Klettbeton mit Polystyrol-Schalung [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz] 37
Abbildung 27: Auflösen der Polystyrol-Schalung mit Aceton [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz] 37
Abbildung 28: Messverfahren für Papier-Klettsystem: (a) Festigkeit des Klettsystems und (b) Schälkraft [Institut für Biobasierte Produkte und Papiertechnik (BPTI), TU Graz] 38
Abbildung 29: Biegeweiche Klettkomponenten (IAT), TU Graz 39
Abbildung 30: Haftzugversuche der Kombination Klettbeton mit 3D-gedruckten Pilzköpfen [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz] 41
Abbildung 31: Schälzugversuche der Kombination Klettholz mit 3D-gedruckten Pilzköpfen [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz] 41
Abbildung 32: Papierkomponente Nut-Geometrien [BPTI, TU Graz] 42
Abbildung 33: Basismodul mit RFID-Reader, sowie 2 RFID-Tags (in Anhänger- und Kartenform) [NET] 43
Abbildung 34: Test Holz 45mm mit 2 RFID-Tags (in Anhänger- und Kartenform) [NET] 44
Abbildung 35: MIFARE® 1K NFC-Plastikkarte in eine Beton [NET] 44
Abbildung 36: Geschossdecke in Betonbauweise [IAT, TU Graz] 46
Abbildung 37: Geschossdecke in Holzbauweise [IAT, TU Graz] 46
Abbildung 38: DecoGrip 53
Abbildung 39: Betonbauteil, Klebeschicht, industrielle Klettkomponente und TGA-Element (IAT) 55
Abbildung 40: Holzbauteil, Klebeschicht, industrielle Klettkomponente und TGA-Element (IAT) 55
Abbildung 41: Versuchsergebnisse der Vorversuche inkl. 5%-Fraktile [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz] 57
Abbildung 42: Zugversuch Durmesser 100mm (Resttragfähigkeit 350N) [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz] 58
Abbildung 43: Gegenüberstellung aller gemessenen Haftzugfestigkeiten in Versuchsserie 1 [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz] 59
Abbildung 44: Klettverbindung bei Erreichen der Haftzugfestigkeit [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz] 59
Abbildung 45: Klettverbindung bei Erreichen der Haftzugfestigkeit, Detail [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz] 60
Abbildung 46: Bewegung der Klettverbindung während der Klimazyklen [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz] 60
Abbildung 47: Bewegung (Öffnung) der Klettverbindungen während der Klimazyklen [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz] 61
Abbildung 48: Ergebnisse Bauanwendungsversuche [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz] 64

Abbildung 49: Ergebnisse Zusammenhang Temperatur-Tragfähigkeit[Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz] 65
Abbildung 50: Konzept „Klettbeton“ (Neubau) 68
Abbildung 51: Konzept „Klettholz“ (Neubau) 68
Abbildung 52: Pilzkopf-Klettelemente auf schwarzer Bindemittelschicht 69
Abbildung 53: Haken-Klettkomponente mit T-förmigen Klettelementen 69
Abbildung 54: Gewählte Geometrien der Herstellversuche „Klettbeton“, Runde Pilzkopfelemente (links), Eckige Pilzkopfelemente (Mitte), T-förmige Nuten (rechts) [LKI, TU Graz] 70
Abbildung 55: Arbeitsschritte für die Herstellung von runden Pilzkopfelementen [LKI, TU Graz] 71
Abbildung 56: Versuchskörper „Klettbeton“ aus runden Pilzkopfelementen [IAT, TU Graz] 72
Abbildung 57: Arbeitsschritte für die Herstellung von eckigen Pilzkopfelementen [LKI, TU Graz] 73
Abbildung 58: Versuchskörper „Klettbeton“ aus eckigen Pilzkopfelementen [LKI, TU Graz] 73
Abbildung 59: Arbeitsschritte für die Herstellung von T-förmigen Nuten [LKI, TU Graz] 74
Abbildung 60: Verklebter Fräskopf (T-Nuten) [LKI, TU Graz] 75
Abbildung 61: Unterwasser Fräsen (T-Nuten) [LKI, TU Graz] 75
Abbildung 62: Versuchskörper „Klettbeton“ aus T-förmigen Nuten (Wachsschalung) [IAT, TU Graz] . 76
Abbildung 63: „Klettholz“ aus V-förmigen Nuten [IAT, TU Graz] 78
Abbildung 64: „Klettholz“ aus eckigen Pilzkopfelementen [IAT, TU Graz] 78
Abbildung 65: Holznagel Lignoloc, 58 mm [IAT, TU Graz] 79
Abbildung 66: Klettholz mit runden Pilzkopfelementen [IAT, TU Graz] 79
Abbildung 67: Detailansicht Verbindungspartner „Pilzkopf-rund“ im Verbund mit Klettbeton [IAT, TU Graz] 80
Abbildung 68: 3D-gedruckte Verbindungspartner mit X-förmigen und runden Pilzköpfen, Materialkombination: Grundplatte und Stiel 95A (rot), Pilzkopf-Kopf 82A (orange) [IAT, TU Graz] 80
Abbildung 69: Versuche zum Schließen der Verbindung, X-förmige Pilzköpfe mit Klettbeton mit runden Pilzköpfen [LKI, TU Graz] 81
Abbildung 70: Versuche zum Schließen der Verbindung, O-förmige Pilzköpfe mit Klettbeton mit runden Pilzköpfen [LKI, TU Graz] 81
Abbildung 71: Versuchsergebnisse der Haftzugversuche der Pilzreihen [LKI, TU Graz] 82
Abbildung 72: Schälzugkräfte der Pilzreihen [LKI, TU Graz] 83
Abbildung 73: Klettholz mit Papierkomponente [Institut für Biobasierte Produkte und Papiertechnik (BPTI), TU Graz] 84
Abbildung 74: Herstellung Klettpapier [Institut für Biobasierte Produkte und Papiertechnik (BPTI), TU Graz] 85
Abbildung 75: Alterung eines 2x1-Klettsystems nach DIN ISO 5630-3 (rechts) im Vergleich zu einem nicht-gealterten System (links). Die Fehlerbalken repräsentieren ein 95%-Konfidenzintervall von 10 Messungen. [Institut für Biobasierte Produkte und Papiertechnik (BPTI), TU Graz] 85
Abbildung 76: Bauteildaten-Dashboard [axtesys GmbH] 96
Abbildung 77: Datenstruktur Visualisierung [NET-Automation] 99
Abbildung 78: Erfolgreicher Schreibvorgang [NET-Automation] 100
Abbildung 79: Erfolgreicher Lesevorgang [NET-Automation] 100

Abbildung 80: ReCon-App, Übersicht über RFID-Chips [NET-Automation] 101
Abbildung 81: Digitale Datenbank, Übersicht der Bauobjekte mit Filter-Suchfunktion [axtesys] 102
Abbildung 82: Bauteildaten-Dashboard-App, grundlegende Informationen [axtesys] 104
Abbildung 83: Bauteildaten-Dashboard-App, grundlegende Informationen [axtesys] 107
Abbildung 84: Bauteildaten-Dashboard-App, Reparaturauftrag [axtesys] 107

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Potentialabschätzung [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz] 28
Tabelle 2: Pilzkopf-Geometrien für Versuche [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz] 39
Tabelle 3: Nutzungsdauern von Betonbauteilen 51
Tabelle 4: Nutzungsdauern von Fügemethoden mit Beton 51
Tabelle 5: Nutzungsdauern von Holzbauteilen 52
Tabelle 6: Haftzugfestigkeiten nach Dauerlast und künstlicher Alterung [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz] 62
Tabelle 7: Ergebnisse der Haftzugversuche der Dauerlastversuche ohne Klimazyklen [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz] 63
Tabelle 8: Verbindungsflächen Klettprodukte [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz] 66
Tabelle 9: Gebäudegliederung [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz] 89
Tabelle 10: Metadaten für Einzelteile, Einzelbauteile und Baukomponenten [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz] 93

Abkürzungsverzeichnis

Abk.	Abkürzung
BGBl.	Bundesgesetzblatt
Art.	Artikel
u.v.m.	und viele mehr
usw.	und so weiter
bzw.	Beziehungsweise
BIM	Building Information Modeling
z.B.	zum Beispiel
kN	Kilonewton
N	Newton
mm	Millimeter
cm	Zentimeter

m	Meter

Literaturverzeichnis

AIM – European Brands Association 2020
AIM – European Brands Association, Pioneering Digital Watermarks. For smart Packaging Recycling in the EU. Brüssel *2020,* 1–45.

Nicolas Alaux et al., Assessing the prospective environmental impacts and circularity potentials of building stocks: An open-source model from Austria (PULSE-AT) - Supporting Information S3. Journal of Industrial Ecology. doi 10.1111/jiec.13558.

APLIX GROUP, Textile hook and loop. aplix® 840. https://www.aplix.com/en/product-needs/textile-hook-and-loop [06.11.2023].

APLIX S.A., DecoGrip. https://www.aplix.com/sites/default/files/2022-07/Website%20illustration_DECOGRIP_German%202022.jpg.

Austrian Standards Institut. ÖNORM B-1801-1 *2022-03,* Bauprojekt- und Objektmanagement. Teil 1: Objekterrichtung 91.010.10; 91.040.01;93.080.01. Wien.

Austrian Standards Institute. ÖNORM EN 15416-1 *2017-06-15,* Klebstoffe für tragende Holzbauteile ausgenommen Phenolharzklebstoffe und Aminoplaste - Prüfverfahren. Teil 1: Langzeit-Zugprüfung senkrecht zur Klebfuge bei verschiedenen Klimabedingungen mit Prüfkörpern senkrecht zur Klebstofffuge (Glashaus-Prüfung) 83.180. Wien.

Austrian Standards International. ÖNORM EN ISO 12006-2 *2020-08-01,* Hochbau — Organisation des Austausches von Informationen über die Durchführung von Hoch- und Tiefbauten. Teil 2: Struktur für die Klassifizierung 91.010.01. Wien.

Austrian Standards International. ISO 7817-1:2024 *2024-11-15,* Bauwerksinformationsmodellierung -. Informationsbedarfstiefe – Teil 1: Konzepte und Grundsätze.

Werner Beckmann, Was ist ein QR-Code und ist seine Verwendung sicher? https://nordvpn.com/de/blog/qr-code-sicherheit/.

Brune, Kai, Stefan Dieckhoff, Holger Fricke, Andreas Groß, Katharina Haag, Andreas Hartwig, Welchy Leite Cavalcanti, Bernd Mayer, Michael Noeske, and Ralph Wilken, Kreislaufwirtschaft und Klebtechnik. Eine Studie des Fraunhofer IFAM.

Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) , 2017.

Byers et al.
Brandon Byers et al., Using engraved QR Codes to connect building components to materials passports for circular construction, 2022 European Conference on Computing in Construction.

DENSO WAVE INCORPORATED, Information capacity and versions of the QR Code. https://www.qrcode.com/en/about/version.html.

Arlind Dervishaj et al., Modelling Precast Concrete for a Circular Economy in the Built Environment. Level of Information Need guidelines for digital design and collaboration. Digital Design Reconsidered , 2023.

DGNB GmbH, GEBÄUDERESSOURCENPASS - VERSION 1.2.1 - Januar 2025.

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN 276 *2018,* Kosten im Bauwesen. Berlin.

Marlene Doobe, Kunststoffe Erfolgreich Kleben. Grundlagen, Klebstofftechnologien, Best-Practice-Beispiele. Wiesbaden 2018.

Sophie Dourlens-Quaranta et al., Study on the development of a European Union framework for digital building logbooks. Final report. Luxembourg , 2021.

Europäische Kommission, Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft. Für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa.

FDT FlachdachTechnologie GmbH & Co. KG, Rhepanol hfk, die Dachbahn für jede Verlegeart. https://www.fdt.de/produkte/rhepanol-dachbahnsystem/rhepanol-hfk-dachbahnen [08.04.2025].

Framework for materials passports *05-2017*
Framework for materials passports , 05-2017.

Gottlieb Binder GmbH & Co. KG, Klettoplast®. https://converting-tasm.pl/wp-content/uploads/2020/02/rzepy-przemyslowe-klettoplast-400x300.jpg.

Gottlieb Binder GmbH & Co. KG, Anwendungen Industriebedarf. Was unterschiedlichste Wirtschaftszweige verbindet. https://www.binder.de/de/anwendungen/industriebedarf/ [06.11.2023].

Gottlieb Binder GmbH & Co. KG, Spezialprodukte. Produkteigenschaften. https://www.binder.de/de/produkte/spezial/ [06.11.2023].

Jürgen Graf et al., Kreislaufeffektive Bauwende – Auf dem Weg zu einer neuen Tektonik. Bautechnik 99, 76–84. doi 10.1002/bate.202100111.

GS1 Austria, GS1 Application Identifier. https://ref.gs1.org/ai/?lang=de [16.04.2025].

Matthias Heinrich und Werner Lang, Materials passports - best practice. München 2019.

Hoosain et al. 2021
Mohamed Sameer Hoosain et al., Material Passports and Circular Economy. In: Lerwen Liu und Seeram Ramakrishna (Hrsg.), An Introduction to Circular Economy. Singapore 2021, 131–158.

Instrumente zur Wiederverwendung von Bauteilen und hochwertigen Verwertung von Baustoffen *2015*
Instrumente zur Wiederverwendung von Bauteilen und hochwertigen Verwertung von Baustoffen. Dessau-Roßlau , 2015.

ISO. ISO 21930 *2017-07,* Sustainability in buildings and civil engineering works — Core rules for environmental product declarations of construction products and services.

Kerz et al. 2008
Nicolas Kerz et al., Nutzungsdauerangaben von ausgewählten Bauteilen und Bauteilschichten des Hochbaus für den Leitfaden "Nachhaltiges Bauen". Berlin *2008*.

Knauf Digital GmbH, Cleaneo Klett Surface. Hocheffizienter Filzabsorber für das System Cleaneo Klett. https://knauf.com/de-DE/p/produkt/cleaneo-klett-surface-29610_0010 [08.04.2025].

Georg Krüger, Klettverschlüsse. Materialien, Herstellung, Prüfung, Anwendungen. Hanser eLibrary. München 2013.

L19 Knauf Thermax Luftkanal mit innenliegendem Blechkanal - L90. Konstruktion, Abmessungen, Anwendungsbereich, Klassifizierung, Ausführungen. https://www.yumpu.com/de/document/read/23890381/l19-knauf-thermax-luftkanal-mit-innenliegendem-blechkanal-l-90 [25.09.2023].

Lüftungskanal Abmessungen und Gewichte. Nicht gedämmt / mit 40 mm Dämmung. https://library.walraven.com/repository/rnd/documents/Air-Duct-Dimensions-and-Weights-data-sheet-DE.pdf [25.09.2023].

Madaster Austria GmbH, Aktuelle Excel-Template. gemäß ÖNORM B 1801-1, 2022. https://docs.madaster.com/at/de/ [11.03.2024].

Madaster Austria GmbH, BIM-Handbuch. Für Revit & Archicad 04.03.2024.

Madaster Germany GmbH, Unsere Vision. https://madaster.de/vision/.

Madaster Germany GmbH, Benutzerhandbuch. Berlin 12.01.2024.

José Luis Moro, Baukonstruktion - vom Prinzip zum Detail. Grundlagen. Springer eBook Collection 1. Berlin 2019.

José Luis Moro et al., Baukonstruktion - vom Prinzip zum Detail. Konzeption. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg 2019.

Österreich auf dem Weg zu einer nachhaltigen und zirkulären Gesellschaft *2022* Österreich auf dem Weg zu einer nachhaltigen und zirkulären Gesellschaft. Die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie. Wien , 2022.

Österreichisches Normungsinstitut. ÖNORM EN 13733 *2002-09-01,* Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Prüfverfahren. Bestimmung der Dauerhaftigkeit von Klebstoffen für konstruktive Zwecke 83.180; 91.080.40. Wien.

Wolfram Pistohl, Handbuch der Gebäudetechnik. Planungsgrundlagen und Beispiele 1. 7. Aufl. Köln 2009.

Platform CB’23, Passports for the Construction Sector. Total - Building construction - Shortlist. https://paspoorten.platformcb23.nl/en/download [24.02.2025].

Francesco Pomponi und Alice Moncaster, Circular economy for the built environment: A research framework. Journal of Cleaner Production 143, 710–718. doi 10.1016/j.jclepro.2016.12.055.

QR Planet GmbH, Was ist der Unterschied zwischen statischen und dynamischen QR Codes? https://qr1.at/help/article/was-ist-der-unterschied-zwischen-statischen-und-dynamischen-qr-codes.

QR Planet GmbH, Wie sicher sind QR Codes? https://qr1.at/help/article/wie-sicher-sind-qr-codes.

M. Raudaschl et al., Piezo-Klett. Entwicklung piezoelektrischer Klettanwendung zur Energieversorgung aktiver Sensorik im Bauwesen , 2023.

Matthias Raudaschl, Klettbeton. Analyse und Herstellung verbindungsfähiger Betonstrukturen am Vorbild der Klettverbindung. Dissertation Graz , 2020.

Matthias Raudaschl, Ernst Dengg und Joachim Juhart, City Remixed. Handlungsfelder für die Implementierung einer Kreislaufwirtschaft im Bauwesen Graz , 2023.

Caspar Richter und Stephan Liedtke, BKI IFC Bildkommentar nach DIN 276. Ausgewählte IFC 4 Begriffe für die BIM-Planungsarbeit gegliedert nach DIN 276. BKI Kostenplanung. Stuttgart/Köln 2021.

Roger Riewe et al., Entwicklung von KlettBefestigungssystemen für die Technische Gebäudeausrüstung. Klett-TGA , 2018.

ROEHSE-HOLDING-GMBH
ROEHSE-HOLDING-GMBH, Trennwandsystem mit Wandelementen.

Anja Rosen, Urban Mining Index. Entwicklung einer Systematik zur quantitativen Bewertung der Kreislaufkonsistenz von Baukonstruktionen in der Neubauplanung. Dissertation , 2021.

SAINT-GOBAIN RIGIPS GmbH, RigiMove. Die wiederverwendbare Trockenbauwand. Eine Vorabinformation anlässlich der SAINT-GOBAIN Roadshow 2024. https://sgia.showpad.com/share/2JQ2MATBDYUxmIobidQoh [08.04.2025].

Leonhard Schönfelder et al., A steel element reuse ontology for building audits in circular construction. Developments in the Built Environment 21, 100638. doi 10.1016/j.dibe.2025.100638.

Sandra Schuster und Sonja Geier, circularWOOD. Paradigmenwechsel für eine Kreislaufwirtschaft im Holzbau. Bonn , 2023.

Dirk Schwede und Elke Störl, Methode zur Analyse der Rezyklierbarkeit von Baukonstruktionen. Stuttgart , 2016.

Kateryna Sigalov und Markus König, Recognition of process patterns for BIM-based construction schedules. Advanced Engineering Informatics 33, 456–472. doi 10.1016/j.aei.2016.12.003.

Jochen Stark und Bernd Wicht, Dauerhaftigkeit von Beton. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg 2013.

Tachauer E., Provencher R., Banker S., Provost G
Tachauer E., Provencher R., Banker S., Provost G, Fastening with wide fastening membrane.

United Nations Environment Programme, Global Status Report for buildings and construction. Beyond foundations: Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector , 2023.

United Nations Environment Programme, Global Resources Outlook 2024. Bend the Trend – Pathways to a liveable planet as resource use spikes , 2024.

Uponor, Klett Nassbausystem. https://www.uponor.at/produkte/fu%C3%9Fbodenheizung-und-kuehlung/klett-nassbausystem [08.04.2025].

Ali Vahidi et al., RFID-based material passport system in a recycled concrete circular chain. Journal of Cleaner Production 442, 140973. doi 10.1016/j.jclepro.2024.140973.

Mike van Vliet, Jip van Grinsven und Jom Teunizen, Circular buildings. Disassembly potential measurement method , Mai, 2021.

R. S. Vasilyev et al., BIM and QR-codes interaction on a construction site. Journal of Physics: Conference Series 1425, 12089. doi 10.1088/1742-6596/1425/1/012089.

VERORDNUNG (EU) 2024/3110 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 27. November 2024 zur Festlegung harmonisierter Vorschriften für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 305/2011. 2024/3110.

Jeroen de Vries et al., Towards Gigayear Storage Using a Silicon-Nitride/Tungsten Based Medium , 2013.

Walter Wiedenbauer, Ewald Rauter, Andreas Weier, Ferdinand Oswald, Tim Lüking, Katharina Maria Hengel, Katharina Volgger, Patrick Colin, Alan Reynolds, Michael Martinelli, Roger Riewe Walter Wiedenbauer, Ewald Rauter, Andreas Weier, Ferdinand Oswald, Tim Lüking, Katharina Maria Hengel, Katharina Volgger, Patrick Colin, Alan Reynolds, Michael Martinelli, Roger Riewe, Fassadensystem.

Konrad Weller, Industrielles Bauen. Architektur. 2. Aufl. Stuttgart 1986.