

TimberLoop

AP 3 Teilbericht: Kreislaufkonzepte für tragende Holzbauteile



Kreislaufkonzepte für tragende Holzbauteile

TimberLoop - Teilbericht zum AP3

Projektnr.: 900315

HFA-Nr.: 52500

Gefördert durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH

Autoren

Dipl.-Ing. Kaspar Albrecht

Dipl.-Ing. Andreas Foller

Dr. Andreas Neumüller

Beteiligte Firmen

Ing. Georg Schuh

materialnomaden GmbH

Rubner Holding AG

Stora Enso Wood Products GmbH

DI Thomas Romm ZT

WIEHAG Timber Construction GmbH

 **Waldfonds
Republik Österreich**

Eine Initiative des Bundesministeriums
für Land- und Forstwirtschaft, Regionen
und Wasserwirtschaft

 **FFG**
Forschung wirkt.

Wien, April 2025

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung.....	3
1.1	Von der linearen Kaskadennutzung zur Kreislaufwirtschaft.....	3
1.2	Kreislaufwirtschaftsstrategien im Bauwesen.....	5
1.3	Altholzsortimente aus tragenden Konstruktionen.....	6
1.4	Festigkeitssortierung von alten Holzbauteilen	8
2	Rückbau-Audit.....	10
3	Kreislaufkonzepte für tragende Holzbauteile	17
3.1	Re-Use - Wiederverwendung.....	17
3.2	Repair - Reparatur.....	21
3.3	Remanufacture – Wiederaufbereitung	23
4	Literaturverzeichnis	26
5	Abbildungsverzeichnis	28
6	Anhang.....	29

1 Einleitung

Im Rahmen des Forschungsprojekts TimberLoop wurden Kreislaufkonzepte für tragende Holzbauteile entwickelt. Das Hauptziel bestand darin, Hindernisse und Chancen für die Kreislaufführung von tragenden Holzbauteilen zu identifizieren und gleichzeitig Rahmenbedingungen festzulegen, die eine technische Umsetzung ermöglichen.

Die drei entwickelten Konzepte entsprechen den Grundsätzen aus dem R-System der Kreislaufwirtschaft von Potting et. al [1] sowie der aktuellen österreichischen Kreislaufwirtschaftsstrategie [2] und lassen sich in Bezug auf Holzbauteile wie folgt definieren:

- **"Re-Use"** - Wiederverwendung von Bauteilen ohne Funktionsverlust
- **"Repair"** - Reparatur beschädigter Bauteile zur Wiederherstellung ihrer Funktion und nachträglicher Wiederverwendung
- **„Remanufacture“** - Aufbereitung von alten Bauteilen zur Herstellung neuer Bauteile

Die Methoden und Strategien zur Umsetzung der drei Kreislaufkonzepte basieren auf den Erkenntnissen einer Literaturrecherche sowie eigenen Forschungsergebnissen zur Qualität von tragenden Holzbauteilen aus rückgebauten Gebäuden [3]. Der Fokus der Untersuchungen lag auf der technischen Umsetzbarkeit und der industriellen Skalierbarkeit der Konzepte.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen den drei untersuchten Kreislaufkonzepten liegt in ihrem Umsetzungsaufwand und der dafür benötigten Infrastruktur. Während bei der direkten Wiederverwendung („Re-Use“) der größte Aufwand, abgesehen vom Aus- und Einbau, in der theoretischen Bemessung und Konzeption liegt, sind bei den Konzepten "Repair" und "Remanufacture" die Herausforderungen vor allem mit der praktischen Umsetzung der Reparatur bzw. Wiederaufbereitung sowie einer funktionierenden Logistikkette verbunden.

1.1 Von der linearen Kaskadennutzung zur Kreislaufwirtschaft

Im Vergleich zu anderen Baumaterialien wird Holz aus dem konstruktiven Bereich nach Ablauf des ersten Lebenszyklus nur selten wiederverwendet. Stattdessen wird es als Rohstoff in der Span- und Faserplattenindustrie eingesetzt oder wird direkt energetisch genutzt. Bei der stofflichen Verwendung von Altholz als Recyclingholz für Plattenwerkstoffe gilt in Österreich als Rechtsrahmen die Recyclingholzverordnung [4]. Die tragenden Bauteile, welche sich für ein Recycling in der Holzwerkstoffindustrie eignen, werden zunächst sortiert und aufbereitet, bevor sie anschließend zu Holzwerkstoffen weiterverarbeitet werden. Insbesondere bei der Produktion von Faser- und Spanprodukten existieren bereits etablierte Herstellungsprozesse, die die Integration von Altholz ohne technische Limitierungen ermöglichen. Im ökologisch gesehen ungünstigsten Szenario werden alte Holzbauteile jedoch direkt nach dem Rückbau thermisch verwertet.

Die kaskadische Nutzung von Holzbauteilen in Form eines linearen Prozessmodells (Abbildung 1) sollte der direkten thermischen Verwertung vorgezogen werden. Im Gegensatz zu einem geschlossenen Materialkreislauf hat sie jedoch den Nachteil, dass mit jedem Verarbeitungsschritt der Wert und die Funktionalität der Bauprodukte abnehmen, während gleichzeitig zusätzliche Treibhausgasemissionen entstehen. Diese negativen Effekte sollen durch die entwickelten Kreislaufkonzepte für tragende Holzbauteile bestmöglich minimiert werden.

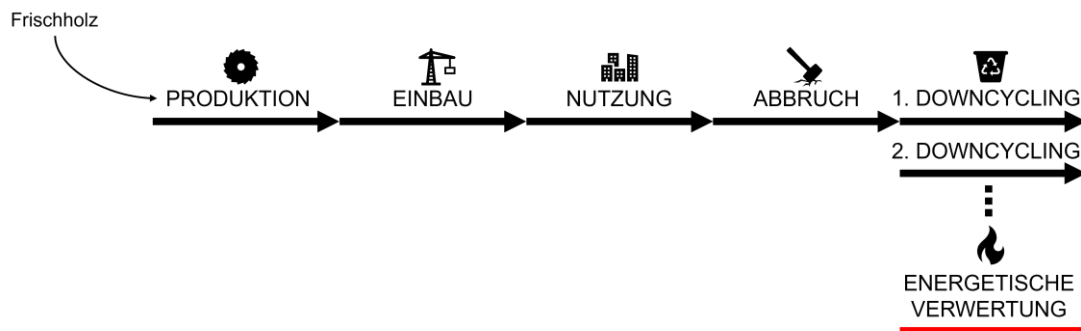


Abbildung 1: Lineares Prozessmodell für tragende Holzbauteile

Das übergeordnete Ziel der entwickelten Kreislaufkonzepte ist es, die Lebensdauer von rückgebauten Holzbauteilen zu verlängern, wobei die ursprüngliche Funktionalität weitgehend erhalten bleiben und der Materialverlust minimiert werden soll. Dies wird erreicht, indem das klassische lineare Prozessmodell von tragenden Holzbauteilen durch die Entwicklung neuer Prozesse in ein Kreislaufmodell transformiert wird (Abbildung 2).

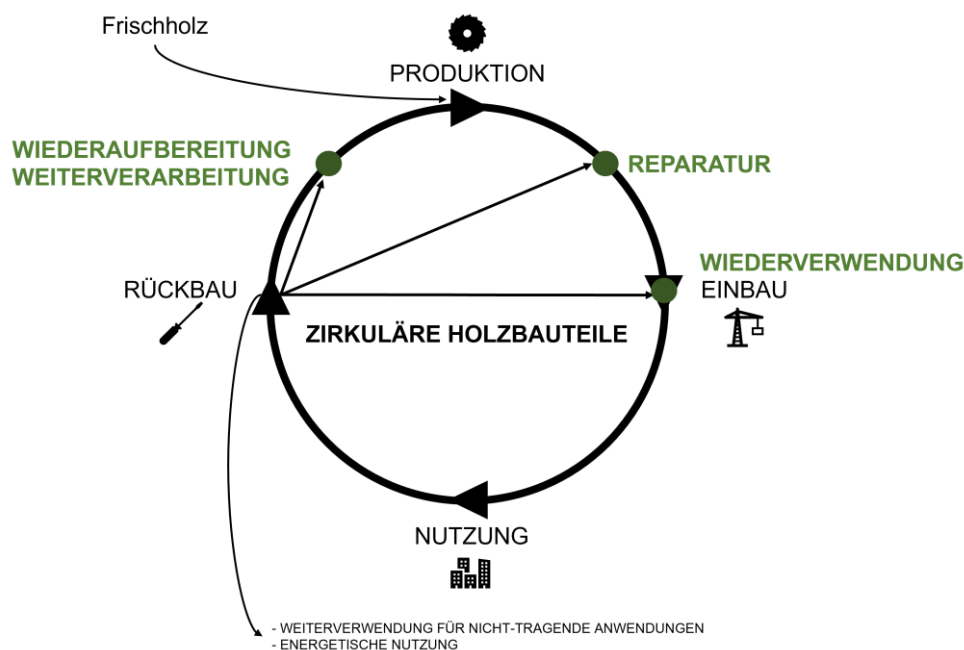


Abbildung 2: Zirkuläres Prozessmodell für tragende Holzbauteile

Das Konzept des "Re-Use" ist mit den geringsten Materialverlusten verbunden und erfordert vergleichsweise nur einen geringen Arbeitsaufwand. Daher bietet es großes Potenzial zur Ressourcenschonung und Energieeinsparung. Allerdings setzt diese Herangehensweise voraus, dass die Bauteile von hoher Qualität sind und ohne Beschädigungen demontiert und wiederverwendet werden können. Zusätzlich müssen die Bauteile für die direkte Wiederverwendung vor der erneuten Installation neu bemessen werden, um die statische Tragfähigkeit zu gewährleisten.

Beim "Repair"-Konzept steht eine gezielte Instandsetzung im Vordergrund, wobei dieses nur begrenzte Möglichkeiten bietet, da die Sanierung nur dann erfolgen kann, wenn der vorliegende Zustand des Bauteils nach der ersten Anwendung dies zulässt und eine vollkommene technische Verwendbarkeit für einen weiteren Lebenszyklus gegeben ist. Im Gegensatz dazu bietet das "Remanufacture"-Konzept weitaus mehr Spielraum. Hierbei werden die Holzbauteile weiterverarbeitet, um neue Bauprodukte herzustellen, die nicht unbedingt dieselbe Funktion oder Abmessung wie das ursprüngliche Bauteil haben müssen. Dies ermöglicht eine flexible und ressourceneffiziente Weiterverwendung, da die reparierten Bauteile in neue Produkte integriert werden können, die besser den aktuellen Anforderungen an Design und Funktion gerecht werden. Zusammengefasst erfordert die Umsetzung von Kreislaufkonzepten für tragende Bauteile eine gut funktionierende Logistikkette sowie die entsprechende Infrastruktur für die Aufbereitung der rückgebauten Bauteile. Besonders wichtig ist zudem der Nachweis für den Hersteller, dass die rückgebauten Bauteile keine Festigkeitsverluste durch ihre vorherige Nutzung aufweisen und frei von Schadstoffen sind.

1.2 Kreislaufwirtschaftsstrategien im Bauwesen

Im Bauwesen lassen sich zwei grundlegende Ansätze zur Umsetzung von Kreislaufwirtschaftsstrategien unterscheiden: vorgelagerte und nachgelagerte Strategien. Vorgelagerte Strategien zielen darauf ab, Bauteile so zu entwerfen, dass sie nach ihrem ersten Lebenszyklus optimal wiederverwendet werden können. Sie leisten somit einen potenziellen zukünftigen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft. Nachgelagerte Strategien hingegen befassen sich mit der Wiederverwendung bestehender Bauteile oder deren Weiterverarbeitung zu neuen Produkten mit gleichbleibender Funktion und tragen damit unmittelbar zur Kreislaufwirtschaft bei. Beide Ansätze sind eng miteinander verknüpft: Erkenntnisse aus nachgelagerten Strategien helfen, spezifische Hindernisse für die Wiederverwendbarkeit alter Bauteile zu identifizieren. Dieses Wissen kann in die Gestaltung neuer Bauteile einfließen, um ihre Kreislauffähigkeit gezielt zu verbessern [5].

Die im Rahmen der Untersuchungen entwickelten Konzepte, beziehen sich auf nachgelagerte Strategien und fokussieren sich auf die strukturerhaltende Verwertung von rückgebautem Altholz aus Österreich. Schon heute fallen erhebliche Mengen an Altholz an, und es ist zu erwarten, dass diese in den kommenden Jahrzehnten weiter zunehmen werden [6]. Die Wiederverwertung rückgebauter Holzbauteile im Sinne der Kreislaufwirtschaft bringt sowohl

ökologische als auch ökonomische Vorteile mit sich. Durch die funktions- und werterhaltende Nutzung von Altholz lassen sich wertvolle Rohstoffe sowie ein Teil der Energie einsparen, die für die Herstellung neuer Produkte erforderlich wäre. Zudem kann Altholz als zusätzlicher Rohstoffstrom das begrenzte Angebot an Frischholz ergänzen und zur Deckung der steigenden Nachfrage nach Holzbauteilen beitragen. Aus ökologischer Sicht gewinnt dies insbesondere vor dem Hintergrund des zunehmenden Drucks auf eine effiziente Ressourcennutzung sowie der Notwendigkeit zum Schutz natürlicher Ressourcen an Bedeutung.

1.3 Altholzsortimente aus tragenden Konstruktionen

Die Altholzsortimente mit dem größten Potenzial für eine direkte Wiederverwendung oder Aufbereitung zur Herstellung neuer Produkte stammen in der Regel aus großvolumigen tragenden Bauteilen des Bausektors. In Österreich wurden in historischen Gebäuden insbesondere Kanthölzer für Dachstühle eingesetzt, während in Zwischendecken häufig Dippelbäume verbaut wurden. Die Altersspanne der verbauten Holzbauteile reicht mehrere hunderte Jahre zurück. Zum Zeitpunkt der Errichtung dieser Gebäude existierten noch keine standardisierten Regelungen zur Sortierung von Holz nach mechanischen Eigenschaften, und die Nachfrage nach Holz für konstruktive Zwecke war wesentlich geringer als heute. Vor diesem Hintergrund ist anzunehmen, dass die Altholzbestände aus sorgfältig ausgewähltem Bauholz mit überdurchschnittlich guten mechanischen Eigenschaften bestehen, was ihre Wiederverwendbarkeit in tragenden Anwendungen begünstigt.

Neben den traditionellen Holzbauteilen aus alten Wohnhäusern, wie Kanthölzern und Dippelbäumen, fallen in den letzten Jahrzehnten zunehmend verklebte Holzbauelemente, wie keilgezinktes Bauholz und Brettschichtholzträger, als Altholz an. Diese verklebten Bauteile stammen häufig aus größeren Ingenieurholzbauten und weisen ein Alter von bis zu etwa 60 Jahren auf. Brettsperrholz, das derzeit ein erhebliches Wachstum verzeichnet und zunehmend in Neubauten verwendet wird, wurde in dieser Untersuchung jedoch nicht berücksichtigt, da es voraussichtlich erst in den kommenden Jahrzehnten in größeren Mengen als Altholz verfügbar sein wird, wenn das Ende der Nutzungsdauer der ersten Bauteile erreicht ist.

Für die Anwendung von Kreislaufkonzepten bei verklebten Holzbauteilen ist es entscheidend, neben der Holzqualität auch den Zustand der Verklebung zu berücksichtigen, da die Qualität der Verklebung maßgeblich die Kreislauffähigkeit der Bauteile beeinflusst. Je nach Herstellungszeitpunkt wurden bei Altholz unterschiedliche Klebstoffsysteme verwendet, die die Wiederverwendbarkeit der Bauteile signifikant beeinflussen. Phenol-Resorzin- und Melamin-Harnstoffharze begünstigen aufgrund ihrer hohen Feuchtebeständigkeit die Wiederverwendbarkeit alter Holzbauteile, während reine Harnstoffharze, die heutzutage nicht mehr für tragende Holzbauteile eingesetzt werden, eine Herausforderung darstellen. Diese Klebstoffe sind empfindlicher gegenüber Feuchte, was zu Delaminierungen führen kann und somit die Tragfähigkeit und Wiederverwendbarkeit der Bauteile erheblich einschränkt. Die

mechanischen Eigenschaften von Altholz werden maßgeblich durch die Art der Verklebung, die Einwirkung von Umwelteinflüssen sowie die ursprüngliche Verwendung des Holzes bestimmt.

Der wesentliche Unterschied zwischen Altholz und Frischholz liegt in der Holzalterung. Unter Holzalterung versteht man die Veränderung der Holzeigenschaften über einen längeren Zeitraum aufgrund natürlicher oder künstlicher Einflüsse. Diese Veränderungen können die physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Holzes deutlich beeinflussen. Grundsätzlich lassen sich vier Hauptfaktoren identifizieren, die die Änderung der Holzeigenschaften während der langjährigen Nutzung bedingen [7]:

- Außergewöhnliche Klimabedingungen
- Außergewöhnliche mechanische Belastungen
- Effekte von aggressiven Medien
- Natürliche Alterung

Bei der Anwendung von Kreislaufkonzepten ist es entscheidend, diese Faktoren im Detail zu untersuchen, um Festigkeitsverluste durch Alterungseffekte des Holzes zu vermeiden. Die Untersuchung gestaltet sich jedoch als herausfordernd, da eine Vielzahl überlagernder Einflussgrößen wie Dichte, Jahringbreite, Faserwinkel und Holzfeuchte berücksichtigt werden müssen. Diese Faktoren interagieren miteinander, was eine isolierte Betrachtung erschwert, und eine differenzierte Analyse erfordert, um deren Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften des Holzes präzise zu bestimmen [8]. Für präzise Aussagen über die Veränderungen der mechanischen Eigenschaften von Altholz sind neben einer umfangreichen Stichprobengröße detaillierte Informationen über die Herkunft und Nutzung des untersuchten Probenmaterials erforderlich [8]. In verschiedenen Forschungsprojekten wurde bereits untersucht, ob die rein natürliche Alterung eine Reduktion der mechanischen Eigenschaften von Holz bewirkt. Der Großteil der Ergebnisse legt nahe, dass sich die mechanischen Eigenschaften von Holz durch die natürliche Alterung in der Regel nicht wesentlich verringern. Gemäß einigen Forschungsberichten ist am ehesten eine Abminderung der Schlagbiegefestigkeit zu erwarten [7–9]. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse ist grundsätzlich anzunehmen, dass alte Holzbauteile den gleichen Belastungen standhalten können wie zu ihrem ursprünglichen Installations- und Nutzungszeitpunkt, vorausgesetzt, alle anderen Faktoren, die die Holzeigenschaften während der Nutzung beeinflussen könnten, sind ausgeschlossen. Während Effekte von aggressiven Medien meist durch eine optische Begutachtung erkannt werden können, sind mechanische Vorbelastungen und schwankende Klimabedingungen nicht eindeutig quantifizierbar und in der Praxis nie gänzlich auszuschließen. Daher muss deren Einfluss auf die Bauteilqualität individuell bewertet werden. Dies unterstreicht die Notwendigkeit einer regelmäßigen Instandhaltung und gegebenenfalls Sanierungsmaßnahmen, um sicherzustellen, dass Bauteile nach ihrer ersten Nutzungsphase wieder in den Materialkreislauf integriert werden können.

Eine fundierte Einschätzung über die Wiederverwendbarkeit von tragenden Holzbauteilen kann demnach nur getroffen werden, wenn die Bauteile gründlich auf ihren aktuellen Zustand überprüft werden und bestenfalls die detaillierten Nutzungsbedingungen der Vergangenheit bekannt und schriftlich dokumentiert sind. Dauerhafte hohe mechanische Belastungen während der Nutzungsphase können zu Veränderungen im Langzeitverhalten wie Krieeffekten führen. Daher ist es selbst bei sachgemäß verwendeten Bauteilen unerlässlich, vor der Anwendung eines Kreislaufkonzepts die mechanische Tragfähigkeit der entsprechenden Bauteile zu überprüfen. In der Praxis sind Holzbauteile allerdings oft nur einem geringen Anteil ihrer Maximallast ausgesetzt, sodass Schäden durch Überschreiten der zulässigen Spannungen selten auftreten. Ein Überschreiten der zulässigen Spannungen kommt vor allem in Verbindung mit Schwindrissen oder zu hoher Zugbelastung quer zur Faser bei gebogenen Bauteilen vor. Kriechverformung und Spannungsrelaxation sind wichtige Faktoren bei der Materialwahl, wobei bei Massivholz unter normalen Belastungen keine dauerhafte Festigkeitsminderung auftritt, sondern nur bei extrem hohen Lasten [7].

Die Implementierung von Kreislaufkonzepten erfordert neben einer fachgerechten Demontage und Qualitätsbewertung der einzelnen Bauteile auch eine erneute statische Bemessung. Diese ist notwendig, um die erforderliche Tragfähigkeit nach dem ersten Lebenszyklus sicherzustellen und gleichzeitig die rechtlichen Anforderungen zu erfüllen.

1.4 Festigkeitssortierung von alten Holzbauteilen

Für Holzbauteile die vor 1997 gefertigt wurden, galt in Österreich eine Sortiervorschrift gemäß ÖNORM B4100-2 [10], welche nur eine einzige Sortierklasse - „Gutes Bauholz“ - zur Klassifizierung der Festigkeit vorsah [11]. Diese Sortiervorschrift fand zwischen 1951 und 1997 Anwendung. Seit 1997 ermöglicht die Übernahme der deutschen Sortiernorm DIN 4074-1 in die ÖNORM DIN 4074-1 eine differenziertere visuelle Sortierung in die drei Sortierklassen „S7“, „S10“ und „S13“ [12]. Ein Vergleich mit der alten ÖNORM B4100-2 zeigt, dass die alte Sortierklasse „Gutes Bauholz“ etwa zwischen den aktuellen Sortierklassen „S10“ und „S13“ angesiedelt ist. Insbesondere die Anforderungen an die Astmaße der Güteklasse „Gutes Bauholz“ entsprechen denen der heutigen Sortierklasse „S10“.

Ältere Bauwerke, die vor 1951 errichtet wurden, unterlagen grundsätzlich keiner geregelten Sortiervorschrift. Stattdessen waren die Auswahl und Verarbeitung des Holzes in der Regel auf handwerkliche Expertise gestützt. Insbesondere bei tragenden Holzkonstruktionen wurde Wert auf qualitativ hochwertiges Holz gelegt, auch wenn dies nicht durch normierte Sortierverfahren überprüft wurde. Daher können alte Holzbauteile aus rückgebauten Gebäuden aufgrund dieser früheren Auswahlmethoden grundsätzlich gut für die Wiederverwendung geeignet sein, sofern sie während der Nutzung keine Qualitätsverluste durch äußere Einflüsse erlitten haben.

Mit dem Inkrafttreten der harmonisierten Norm EN 14081-1 ist seit 2006 die visuelle und maschinelle Festigkeitssortierung europaweit einheitlich geregelt, wobei bei der visuellen Sortierung auf die national gültigen Sortiervorschriften Bezug genommen wird [13].

Die Sortierung von Altholz stellt eine komplexe Herausforderung dar, da neben den Kriterien der Frischholzsortierung auch zusätzliche, bisher nicht normativ geregelte Merkmale berücksichtigt werden müssen. Die Methoden der aktuell gültigen Normen DIN 4074-1 und EN 14081-1 zur Sortierung von Frischholz können grundsätzlich auch auf Altholz angewendet werden, um festigkeitsrelevante Faktoren wie Äste und andere Holzmerkmale, die auch bei Frischholz vorkommen, zu bewerten. Allerdings werden zusätzliche Einflussfaktoren wie fehlende Querschnitte durch frühere Verbindungselemente, mechanische Beschädigungen wie Risse und Quetschungen sowie Einschlüsse von Störstoffen wie Nägeln und Schrauben nicht von den aktuellen Normen abgedeckt [9]. Darüber hinaus ist Fäule im Anfangsstadium bei Altholz nicht immer direkt erkennbar, kann jedoch erheblichen Einfluss auf die Festigkeit und Stabilität der Bauteile haben. Alle genannten Faktoren können die Festigkeit und Eignung von Altholz erheblich beeinträchtigen. Daher sind häufig eine detaillierte visuelle Inspektion sowie zusätzliche Prüfungen notwendig, um die Materialqualität zuverlässig zu bewerten. Die Beurteilung von Altholz stellt somit eine individuelle Herausforderung dar, die spezifische Ansätze und Methoden erfordert. Im Idealfall lassen sich alte Einstufungen in Sortier- oder Festigkeitsklassen (Abbildung 3) aus vorhandenen Dokumenten entnehmen oder es finden sich direkt am Bauteil Informationen (z.B. auf einer Plakette). Diese bieten eine Grundlage für die Einschätzung der Materialqualität und erleichtern die erneute Sortierung. Zukünftige gesetzliche Regelungen zur Festigkeitssortierung von Altholz sollten einen klaren rechtlichen Rahmen schaffen, um eine normgerechte und transparente Einstufung zu gewährleisten.



Abbildung 3: Zeitliche Entwicklung von Festigkeitseinstufungen für Bauholz in Österreich

2 Rückbau-Audit

Für eine funktionierende Kreislaufführung und die Anwendung von Kreislaufkonzepten im Holzbau muss jedes rückgebaute Bauteil spezifische Eigenschaften aufweisen, um den Anforderungen eines neuen Verwendungszwecks gerecht zu werden. Der erste Schritt zur Beurteilung des IST-Zustands im Bestand bildet ein Rückbau-Audit, das eine systematische Prüfung und Klassifizierung von Bauteilen für die weitere Nutzung im Rahmen eines Kreislaufkonzepts ermöglicht. Diese Methodik schließt oft die Lücke, die durch fehlende technische Dokumentationen bei älteren Bauwerken besteht, da der Zustand der potenziell wiederverwendbaren Bauteile analysiert und neu bewertet wird. Werden die im Audit untersuchten Stichproben als repräsentativ für eine Bauteilkategorie anerkannt, können die Bauteile gruppenweise beurteilt werden. Diese Gruppenbewertung setzt jedoch häufig voraus, dass ausreichend Informationen über die Herkunft und Eigenschaften der rückgebauten Bauteile vorhanden sind, idealerweise unterstützt durch technische Dokumentationen. Wenn entsprechende Dokumentationen fehlen oder nicht für eine Beurteilung ausreichen, muss jedes Bauteil individuell bewertet werden. Dies führt zu einem erhöhten Arbeitsaufwand, stellt jedoch sicher, dass lediglich geeignete Bauteile, die den festgelegten Anforderungen entsprechen, für ein entsprechendes Kreislaufkonzept ausgewählt werden.

Abbildung 4 visualisiert die einzelnen Prozessschritte vom Beginn des Rückbau-Audit bis zur Auswertung und Entscheidung über ein geeignetes Kreislaufkonzept.

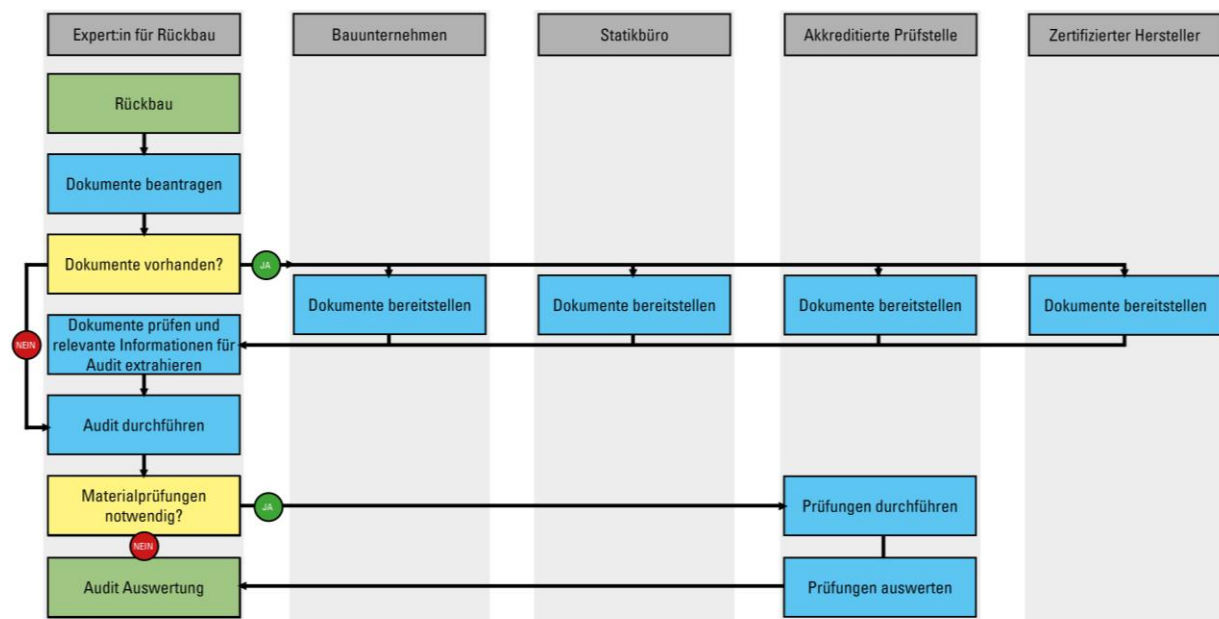


Abbildung 4: Prozessflussdiagramm zur Durchführung der Kreislaufkonzepte

Das Rückbau-Audit wird vor einem geplanten Rückbau vor Ort durchgeführt und dient zunächst dazu, die Mengen sowie den Zustand der verbauten Holzbauteile, die aus dem Baukörper entfernt werden sollen, zu erfassen. Die standardisierte Auswertung des Rückbau-Audit im Anschluss ermöglicht es, den begutachteten Bauteilen geeignete Kreislaufkonzepte zuzuweisen. Des Weiteren können auf Basis der Auswertung direkt Prozessschritte abgeleitet werden, welche durchzuführen sind, um die Bauteile optimal für das zugewiesene Kreislaufkonzept vorbereiten zu können. Eine fachkundige Person für Rückbau fungiert als erste Anlaufstelle und koordiniert die Arbeitsabläufe sowie die Vernetzung der beteiligten Akteure.

Bevor das eigentliche Rückbau-Audit durchgeführt wird, können bereits im Vorfeld Hintergrundinformationen zum Gebäude sowie zu den verbauten Bauteilen gesammelt und analysiert werden. Auf Grundlage der vorab gesammelten Informationen wird weiters auf Gebäudeebene ermittelt, welche Mengen an unterschiedlichen Holzbauteilen beim entsprechenden Rückbau anfallen und in welche Bauteilkategorien diese eingeteilt werden können. Idealerweise können die Informationen zu den Mengen und Kategorien der anfallenden Holzbauteile aus bestehenden Gebäude- oder Statikplänen entnommen werden. Falls solche Informationen nicht verfügbar sind, müssen im ersten Schritt des Audits die vorliegenden Mengen an verbauten Holzbauteilen anhand der Stückzahlen und Dimensionen vor Ort abgeschätzt werden. Im Zuge des Audits werden auch allgemeine Informationen zum Gebäude wie das Alter, die Art der Tragekonstruktion und die Nutzungskategorie festgehalten. Dies erleichtert die Identifizierung potenzieller Qualitätsverluste einzelner Bauteile und deren Ursache.

Im zweiten Schritt des Audits, der bauteilorientierten Begehung, wird die Qualität der verschiedenen Bauteilkategorien detailliert erfasst. Bei unverklebten Massivholzprodukten wie Kanthölzern und Brettern kann die visuelle Sortierung nach DIN 4074-1 im Rahmen des Rückbau-Audits erfolgen. Zusätzlich müssen die Bauteile auf veränderliche Merkmale überprüft werden, die durch Nutzung und Alterung entstanden sein könnten, wie etwa Trocknungsrisse, Insektenbefall oder Holzfäule. Bei verklebten Holzbauteilen kann der Schichtaufbau beurteilt werden. Bei neueren Bauprodukten besteht unter Umständen die Möglichkeit, die verwendeten Festigkeitsklassen der Träger zu identifizieren, was eine präzisere Bewertung der Tragfähigkeit ermöglicht.

Bei verklebten Produkten ist besonders die Qualität der Verklebung von großer Bedeutung. Untersuchungen haben gezeigt, dass kleinere Delaminierungen in Randbereichen nicht zwangsläufig ein Hindernis für die Weiterverarbeitung darstellen.

Die Ergebnisauswertung des Rückbau-Audits umfasst neben der Mengenerfassung und Kategorisierung der Bauteile sieben quantifizierbare Faktoren, die den Zustand der untersuchten Bauteile detailliert beschreiben. Diese Parameter bilden die Grundlage für die Analyse und ermöglichen eine gezielte Klassifizierung der Bauteile in die verschiedenen Kreislaufkonzepte:

- Holzfeuchte
- Verbindungsmittel
- Fäule
- Risse
- Festigkeitseinstufung
- Verklebungsqualität
- Schadstoffe

2.1.1 Holzfeuchte

Die Holzfeuchte spielt eine entscheidende Rolle bei der Beurteilung des Zustands von Holzbauteilen im Bestand. Holzabbauende Pilze benötigen für ihr Wachstum eine erhöhte Holzfeuchte, und zudem nehmen die mechanischen Eigenschaften von Holz mit steigender Feuchtigkeit ab. Daher ist es beim Rückbau von Holzbauteilen wichtig, Holzfeuchtemessungen durchzuführen, um sicherzustellen, dass die vorliegende Holzfeuchte der untersuchten Bauteile keinen negativen Einfluss auf eine potenzielle Wiederverwendung oder Weiterverarbeitung hat. Als Bewertungsgrundlage dienen die Grenzwerte der ÖNORM B 2320. Gemäß dieser Norm darf die Holzfeuchtigkeit von Konstruktionshölzern, die verbaut oder verkleidet werden, 18 % nicht übersteigen. Falls Konstruktionshölzer nicht oder nur einseitig verbaut bzw. verkleidet werden, gilt eine maximale zulässige Holzfeuchtigkeit von 20 % [14].

Bei überhöhten Holzfeuchtwerten in einzelnen Bereichen oder Fäulnisschäden können in einzelnen Fällen die betroffenen Bereiche abgetrennt werden, während der verbleibende Teil des Bauteils weiterhin für das Kreislaufkonzept "Remanufacture" in Frage kommt. Dies gilt, sofern alle anderen Anforderungen erfüllt sind. Wenn die Fäulnisschäden jedoch weitreichend sind, müssen diese Bauteile von einer Wiederverwendung für tragende Anwendungen ausgeschlossen werden (siehe Kapitel 2.1.3).

Rückgebaute Bauteile sind vor einer erneuten Nutzung oder Aufbereitung witterungsgeschützt und trocken zu lagern, um eine Befeuchtung auszuschließen.

2.1.2 Verbindungsmittel

Am Bauteil befestigte Verbindungsmittel können die Wiederverwendbarkeit von Holzbauteilen erheblich einschränken. Aufgrund von schwer lösbaren Verbindungen erfordert eine Demontage oft grobe mechanische Eingriffe, die zu Beschädigungen führen können. Zudem entstehen durch die Entfernung von Verbindungsmitteln fehlende Querschnitte in den Holzbauteilen. Die beschädigten Abschnitte müssen vom Rest der Holzbauteile abgetrennt werden, um Festigkeitsverluste auszuschließen. Fehlende Querschnitte und Ausbrüche sind bei der Sortierung und Bemessung von alten Bauteilen zu berücksichtigen.

In den meisten Fällen konzentrieren sich großflächige Verbindungsmittel auf die Oberfläche und die seitlichen Anschlussstellen, was bedeutet, dass Beschädigungen meist oberflächlich und auf Randbereiche beschränkt sind. Bei Brettschichtholzträgern sind aufgrund technischer Fortschritte und rechtlicher Rahmenbedingungen zunehmend Querszugverstärkungen vorzufinden. Da die Verstärkungen nahezu den gesamten Querschnitt des Trägers durchdringen und in regelmäßigen Abständen angeordnet sind, ist in den meisten Fällen eine Umsetzung des Kreislaufkonzepts „Remanufacture“ aus wirtschaftlichen und technologischen Gründen nicht praktikabel.

Bei den Kreislaufkonzepten "Re-Use" und "Repair" stellen verbleibende Verbindungsmittel in Bauteilen kein unmittelbares Hindernis dar, solange diese weiterhin ihre Funktion erfüllen. Aufgrund der Vielzahl an Verbindungsmitteln in modernen Tragekonstruktionen ist bei größeren Bauteilen eine bauteilspezifische Untersuchung vor Ort erforderlich, um präzise beurteilen zu können, inwieweit die Verbindungsmittel eine Wiederverwendung oder Weiterverarbeitung beeinträchtigen könnten.

2.1.3 Fäule

Während Bläue- und Schimmelpilze grundsätzlich keine Festigkeitsveränderungen im Holz hervorrufen und lediglich optische Veränderungen herbeiführen, kommt es bei Fäule durch holzabbauende Pilze zu signifikanten Festigkeitseinbußen. Daher schließt Fäule durch holzabbauende Pilze in Holzbauteilen grundsätzlich eine Wiederverwendung und Weiterverarbeitung aus. Wie in Kapitel 2.1.1 erwähnt, ist es bei rückgebauten Holzbauteilen mit offensichtlichen Fäulnisschäden entscheidend, die Ausbreitung der Fäule zu untersuchen. Beschränkt sich der Schaden lediglich auf abgegrenzte Bereiche, kann das befallene Holz möglicherweise entfernt werden, sodass das verbleibende Bauteil weiterhin für eine Weiterverarbeitung infrage kommt.

Bei umfassenden Fäulnisschäden ist ein erheblicher Festigkeitsverlust zu erwarten, sodass solche Bauteile für Kreislaufkonzepte im tragenden Bereich ausgeschlossen werden müssen. Gemäß ÖNORM B 3802-4 ist bei einem Befall durch den Echten Hausschwamm stark geschädigtes Holz in Längsrichtung mindestens 1 Meter über den sichtbaren Befall hinaus zu entfernen. Bei allen anderen holzzerstörenden Pilzen (Nassfäulepilzen) sind es 0,3 Meter [15]. Ist die Schädigung hingegen so gering, dass die Tragfähigkeit nicht wesentlich beeinträchtigt wird, reicht es aus, die betroffenen Bereiche bis auf das gesunde Holz mechanisch zu entfernen.

Vor einer Weiterverarbeitung sollte unbedingt geprüft werden, wie der Befall entstanden ist, um nicht sichtbare Schäden an weiteren Stellen auszuschließen. Zudem muss sichergestellt werden, dass es nicht erneut zu einer Durchfeuchtung der Holzbauteile kommt.

2.1.4 Risse

Risse in alten Holzbauteilen deuten häufig auf ein inkonsistentes Umgebungsklima oder außergewöhnliche mechanische Belastungen hin. Je größer und tiefer die Risse sind, desto weniger geeignet sind die Bauteile für die direkte Wiederverwendung. Hierbei ist zwischen oberflächlichen Schwindrissen und tiefgehenden Rissen zu unterscheiden. Besonderes Augenmerk sollte bei höheren Bauteilen wie Brettschichtholzträger auf Quersgrisse in der Zugzone gelegt werden, um Schäden durch mechanische Belastungen auszuschließen.

Oberflächliche Risse können in allen Kreislaufkonzepten toleriert werden, sofern diese die Festigkeit der Bauteile nicht beeinträchtigen. Die Risstiefe darf gemäß ÖNORM B 2215 maximal 1/6 der Bauteilbreite je Seite betragen [16]. Treten jedoch tiefgehende Risse auf, ist eine Wiederverwendung im Rahmen des „Re-Use“-Konzepts ausgeschlossen, da diese meist aufgrund von mechanischen Überbelastungen entstehen und somit ein Festigkeitsverlust zu erwarten ist.

In bestimmten Fällen können durch einzelne Risse hervorgerufene Festigkeitsverluste, mittels Rissanierungen im Sinne des Konzepts „Repair“ mit fugenfüllenden Klebstoffen behoben werden. Sollte auch dies nicht mehr möglich sein, können die betroffenen Bauteile nur noch im Rahmen des „Remanufacture“-Konzepts Anwendung finden, indem Bereiche mit Rissen vom restlichen Bauteil abgetrennt werden.

2.1.5 Festigkeitssortierung

Die Beurteilung der Festigkeitsklasse kann durch eine Einstufung gemäß ÖNORM DIN 4074-1 erfolgen, sofern die Bauteile gut sichtbar verbaut sind und alle festigkeitsrelevanten Merkmale erfasst werden können. Andernfalls ist eine Ersteinschätzung vor Ort basierend auf sichtbaren Merkmalen möglich, gefolgt von einer detaillierteren Nachsortierung nach dem Ausbau der Bauteile.

Festigkeitsmindernde Merkmale, die erst durch die Nutzung und Alterung von Bauteilen entstanden sind, müssen ergänzend zur Sortierung gemäß DIN 4074-1 in die Beurteilung einfließen. Dazu gehören beispielsweise mechanische Beschädigungen oder Krümmungen, die während der Nutzung entstanden sind. Bei sichtbaren Krümmungen ist zudem festzustellen, ob diese auf Feuchteunterschiede im Holz oder mechanische Überbelastungen zurückzuführen sind.

Bei jüngeren Bauprodukten lassen sich alte Festigkeitseinstufungen häufig anhand von Merkmalen wie Plaketten, Aufklebern oder Stempeln erkennen. Mit der Einführung des digitalen Produktpasses im Rahmen der Ökodesign-Verordnung wird es künftig zudem möglich sein, Informationen zu Zusammensetzung und Herkunft von Bauteilen jederzeit digital abzurufen.

2.1.6 Verklebungsqualität

Die Beurteilung der vorliegenden Verklebungsqualität von alten Bauteilen stellt eine besondere Herausforderung dar, da diese oft durch Alterungsprozesse und Umwelteinflüsse beeinträchtigt sein kann. Bisher existieren jedoch keine standardisierten Methoden zur objektiven Bewertung der Verklebungsqualität von gealterten Klebefugen. Daher ist die individuelle Einschätzung durch fachkundige Personen unerlässlich, um die Tragfähigkeit und Sicherheit der Bauteile bei der Anwendung eines Kreislaufkonzepts zu gewährleisten. Die Verklebungsqualität verklebter Bauteile kann durch Stichproben mittels Verklebungsprüfungen gemäß EN 14080, Anhang C und D für orientierende Erkenntnisse überprüft werden [17].

Grundsätzlich müssen für eine direkte Wiederverwendung alle Anforderungen an die Verklebungsqualität erfüllt sein. Im Falle einer Sanierung oder Weiterverarbeitung können nach einer sorgfältigen Einzelbeurteilung gewisse Delaminierungen gegebenenfalls in Kauf genommen werden, sofern diese durch die nachfolgende Reparatur oder Weiterverarbeitung behoben werden können.

2.1.7 Schad- und Störstoffe

Um gesundheitliche Risiken und rechtliche Verstöße bei der Wiederverwendung und Weiterverarbeitung von rückgebauten Bauteilen zu vermeiden, ist es entscheidend, potenzielle Belastungen durch Schadstoffe – wie etwa Imprägnierungen, Schutzanstriche oder der Kontakt mit anderen Baustoffen - sorgfältig zu prüfen und auszuschließen. Die Bauteile müssen den geltenden gesetzlichen Vorgaben entsprechen und dürfen festgelegte Grenzwerte nicht überschreiten.

Falls in der Dokumentation keine Informationen über eine mögliche Schadstoffbelastung vorliegen, muss eine optische Beurteilung durchgeführt werden. Da es vor der Begutachtung oft unklar ist, ob ein Bauteil mit Schadstoffen behaftet ist, sollte während des Audits auf hinweisgebende Oberflächenmerkmale geachtet werden. Bei Verdacht auf Schadstoffbelastung ist es erforderlich, gezielte Stichproben zur Schadstoffanalyse zu entnehmen.

Bauteile, die durch Unterlagen eindeutig als unbehandelt nachgewiesen oder visuell als unbehandelt identifiziert werden können, dürfen ohne weitere chemische Analysen als schadstofffrei betrachtet und direkt in Kreislaufkonzepte integriert werden, vorausgesetzt, eine Belastung durch Einträge während der Nutzung kann ausgeschlossen werden. Besteht der Verdacht auf eine Schadstoffbelastung, ist eine chemische Analyse erforderlich, um die Einhaltung gesetzlicher Grenzwerte sicherzustellen.

Untersuchungen haben gezeigt, dass bei der Weiterverarbeitung von Bauprodukten bereits der übliche oberflächliche Abtrag von wenigen Millimetern in der Regel ausreicht, um schadstoffbelastete Schichten vollständig zu entfernen [18]. Ein zusätzlicher Materialabtrag ist meistens nicht erforderlich. Tiefenprofilanalysen eignen sich dazu, den genauen Eintrag der

Kontaminationen zu bestimmen und so bei der Schadstoffentfernung einen möglichst geringen Materialverlust zu gewährleisten. In Einzelfällen können Kontaminationen von Bauteilen jedoch bis zu 20 Millimeter tief in die Holzsubstanz eindringen. Lässt sich bei Schadstoffverdacht keine Tiefenprofilanalyse durchführen, ist vorsorglich ein Abtrag von mindestens 20 Millimetern zu empfehlen. Ist das Bauteil großflächig und tiefgehend belastet, scheidet es für die Nutzung in tragenden Kreislaufkonzepten aus, wenn nicht gewährleistet werden kann, dass eine spezifische tolerierte Kontamination dauerhaft gebunden bleibt und eine Gefährdung auch langfristig ausgeschlossen ist.

In Österreich regelt die Recyclingholzverordnung die Schadstoffgrenzwerte für die stoffliche Verwendung von Altholz [4]. Diese Verordnung konzentriert sich jedoch auf die Verarbeitung in der Holzwerkstoffindustrie und ist nicht unmittelbar auf die Wiederverwendung von tragenden Bauteilen anwendbar. Aus diesem Grund wird zukünftig eine gesonderte Regelung notwendig sein, die den Umgang mit Bauteilen, die potenziell wiederverwendet oder weiterverarbeitet werden, klar definiert.

Abbildung 5 zeigt die erforderlichen Prozessschritte, um Schadstoffe in den Bauteilen zu identifizieren und - falls möglich - zu entfernen, sodass unbelastetes Material für die weitere Nutzung zur Verfügung steht.

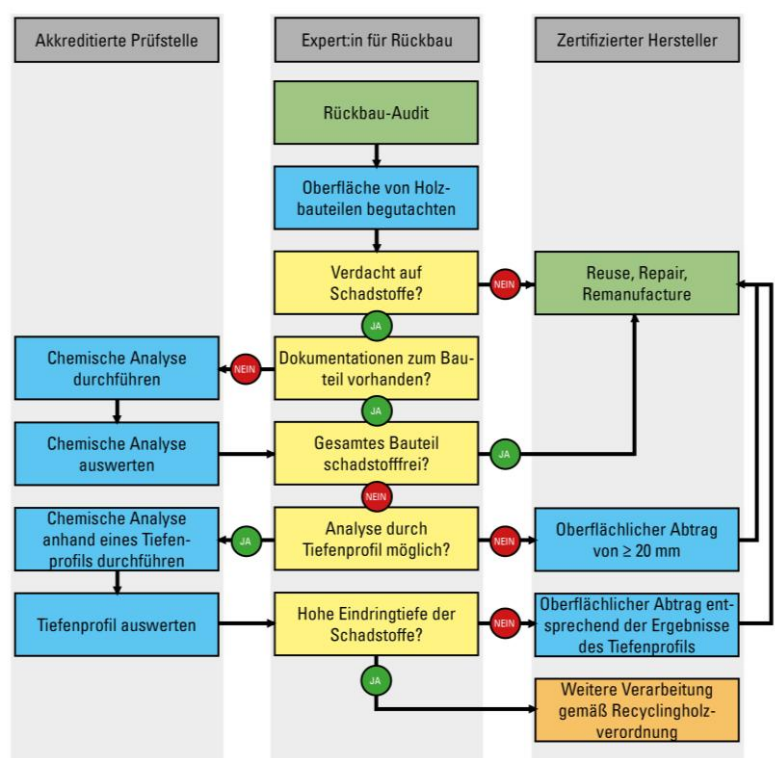


Abbildung 5: Prozessflussdiagramm zur Erkennung und Entfernung von Schad- und Störstoffen

3 Kreislaufkonzepte für tragende Holzbauteile

Nach der Ermittlung geeigneter Kreislaufkonzepte für die verschiedenen Bauteilkategorien, basierend auf den Ergebnissen des Rückbau-Audits, müssen je nach zugewiesenem Konzept unterschiedliche Prozessschritte eingeleitet und die erforderlichen Nachweise erbracht werden. Es ist wichtig, alle Prozessschritte sorgfältig zu dokumentieren, um Transparenz und Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten. Abbildung 6 visualisiert die einzelnen Prozessschritte, die für die Umsetzung der jeweiligen Kreislaufkonzepte erforderlich sind.

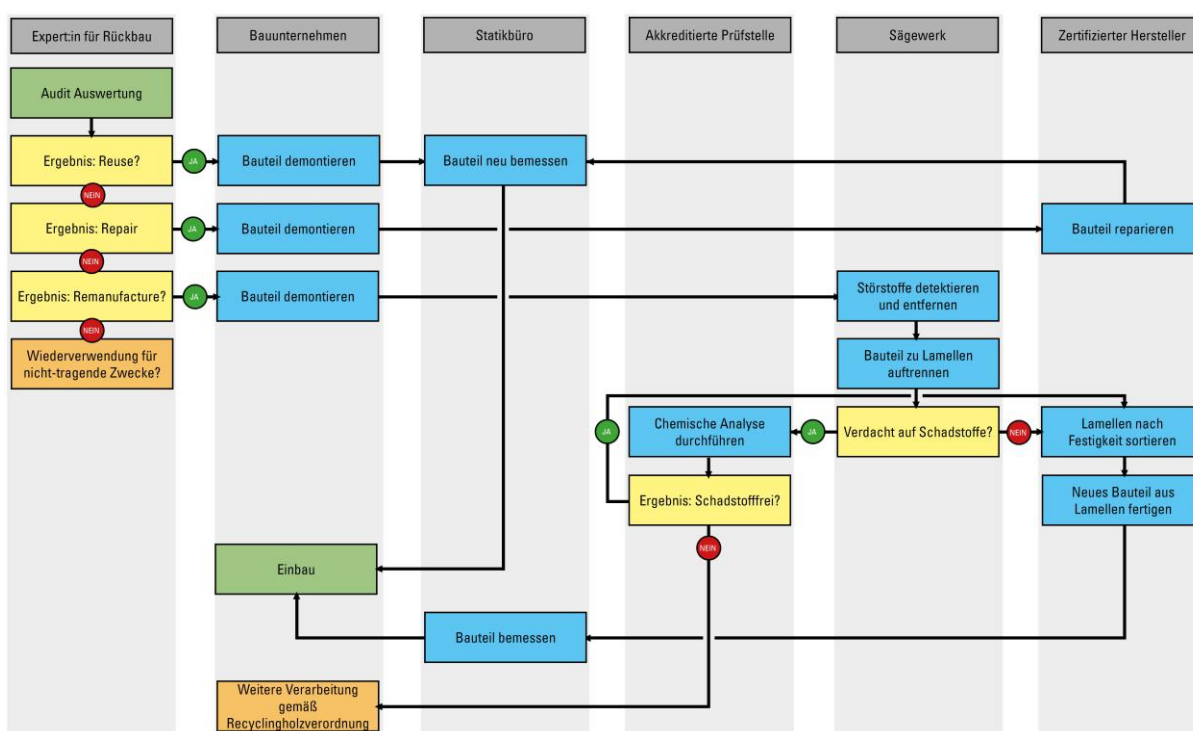


Abbildung 6: Prozessflussdiagramm für die Anwendung der Kreislaufkonzepte

3.1 Re-Use - Wiederverwendung

Bei der direkten Wiederverwendung werden Produkte, für denselben Zweck verwendet, für den sie ursprünglich eingesetzt wurden und bestimmt waren. Um tragende Holzbauteile aus rückgebauten Gebäuden unmittelbar wiederverwenden zu können, müssen gewisse Anforderungen erfüllt sein, um sicherzustellen, dass sich die Tragfähigkeit und ihre allgemeine Leistungsfähigkeit während ihrer ersten Nutzungsdauer nicht reduziert hat.

Das Demontieren der Bauteile muss ohne schwere Beschädigungen realisierbar sein. Diese Anforderung setzt leicht lösbare Verbindungsmittel voraus. Zudem dürfen die Bauteile keine Anzeichen von holzerstörendem Pilz- oder Insektenbefall aufweisen, und die Holzfeuchte darf an keiner Stelle über 18 % betragen [14].

Risse werden nur insoweit toleriert, als sie keinen wesentlichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften haben. Die Risttiefe darf gemäß ÖNORM B 2215 maximal 1/6 der Bauteilbreite je Seite betragen [15].

Um eine schadstofffreie Wiederverwendung des Bauteils zu gewährleisten, müssen alle Grenzwerte gemäß der europäisch gültigen REACH-Verordnung [19] eingehalten werden.

Bei verklebten Bauteilen muss zusätzlich zu den restlichen Anforderungen eine intakte Klebefugenintegrität gegeben sein und es müssen alle Anforderungen an die Verklebungsqualität gemäß EN 14080 bzw. EN 16351 vollumfänglich erfüllt werden [17]. Harnstoffharzverklebte Bauteile sind aufgrund der beschränkten Feuchte- und Temperaturbeständigkeit der Klebefuge von einer direkten Wiederverwendung auszuschließen.

3.1.1 Prozessbeschreibung

Wenn ein Holzbauteil aus einem rückgebauten Gebäude gemäß den im Rückbau-Audit erfassten Parametern für das Kreislaufkonzept der Wiederverwendung (Re-Use) klassifiziert wurde, sind die folgenden Schritte erforderlich, um eine erfolgreiche Umsetzung zu gewährleisten:

1. Ausbau
2. Lagerung
3. Materialprüfungen
4. Statische Bemessung
5. Einbau

3.1.1.1 Ausbau

Das entsprechende Holzbauteil muss sorgfältig ausgebaut werden, um Schäden beim Rückbau zu vermeiden. Besonders gut geeignet für einen schadensfreien Rückbau sind Bauteile mit leicht zu lösenden mechanischen Verbindungen. Sollten dennoch Schäden durch den Ausbau entstehen, müssen diese begutachtet und im Zweifelsfall korrigiert werden. Bei größeren Schäden können die Bauteile nicht mehr im Sinne des Kreislaufkonzepts „Re-Use“ wiederverwendet werden, können aber gegebenenfalls im Zuge des Konzepts „Repair“ oder „Remanufacture“ gezielt aufbereitet werden.

3.1.1.2 Lagerung

Rückgebaute Bauteile müssen witterungsgeschützt und trocken gelagert werden. Während dem gesamten Prozess vom Rückbau bis zum erneuten Einbau darf die Holzfeuchte der Bauteile maximal 18 % betragen [20].

3.1.1.3 Materialprüfungen

Nach dem erfolgreichen Rückbau sind grundsätzlich Materialprüfungen erforderlich, um die Tragfähigkeit und Produktsicherheit der Bauteile für eine Wiederverwendung sicherzustellen.

Liegen jedoch keine direkten Anzeichen für Qualitätsverluste vor und sind zudem detaillierte Informationen zur bisherigen Nutzung verfügbar, die den einwandfreien Zustand der Bauteile belegen, kann im Einzelfall auf Materialprüfungen verzichtet werden.

Bei Unsicherheit über die vorliegende Verklebungsqualität von verklebten Bauprodukten, wie Brettschichtholzträgern, sind nach dem Ausbau aus dem rückgebauten Gebäude Prüfungen erforderlich, um die erforderliche Verklebungsqualität nachzuweisen. Dazu sind Verklebungsprüfungen gemäß EN 14080, Anhang C vorgesehen [17]. Wie bei neuen Produkten müssen dabei Grenzwerte zur maximalen Delaminierung eingehalten werden. Sowohl die Mindestanforderungen an die Einzelfugen als auch der Mittelwert aller Einzelfugen müssen erfüllt sein.

Bereiche der Bauteile, die beim Ausbau ohnehin abgetrennt werden müssen, eignen sich besonders für die Materialprüfungen, da sie durch ihre äußere Position meist den ungünstigsten Fall abbilden. Um die Bauteile für die Wiederverwendung nicht unnötig zu beeinträchtigen, stellt außerdem die Entnahme von Bohrkernen eine geeignete Alternative zu größeren Proben dar.

3.1.1.4 Statische Bemessung

Vor der Wiederverwendung von rückgebauten Bauteilen ist eine statische Bemessung erforderlich, damit sichergestellt und nachgewiesen werden kann, dass das Bauteil auch für den neuen Anwendungszweck alle statischen Anforderungen erfüllt. Aufgrund des Rückbaus und der damit verbundenen Entfernung von Verbindungsmitteln an den Anschlussstellen müssen vor dem erneuten Einbau möglicherweise beschädigte Bereiche des entsprechenden Bauteils abgetrennt werden. Dadurch wird eine neue Berechnung auf der Grundlage des neuen Querschnitts notwendig. Zudem muss das Bauteil gemäß der vorliegenden Sortierung und Festigkeitsklasse neu klassifiziert werden, um eine angemessene statische Bemessung zu ermöglichen.

Bei alten Bauwerken, die noch nach der ÖNORM B4100-2 bemessen wurden, erfolgte die Bemessung nach dem deterministischen Sicherheitskonzept [21]. Dabei wurden die vorhandenen Spannungen aus den Einwirkungen den zulässigen Spannungen gegenübergestellt. Die Grenzwerte basierten damals auf statistischen Mittelwerten.

Heutzutage erfolgt die Bemessung nach dem Eurocode 5, wobei ein semiprobabilistisches System zur Anwendung kommt [22]. Es berücksichtigt Wahrscheinlichkeiten für den Lastauftritt, Lastkombinationen und Materialfestigkeiten und regelt das Zusammenwirken dieser Faktoren über stochastische Methoden und Teilsicherheitsbeiwerte. Ein Nachweis ist erforderlich, dass keiner der maßgebenden Grenzzustände in allen relevanten Bemessungssituationen überschritten wird.

Sofern keine Festigkeitsverluste festgestellt werden und die Verklebungsqualität intakt ist, kann das Bauteil wie bei der Erstnutzung in der gleichen Festigkeitsklasse bemessen werden. Werden Schäden an alten Bauteilen festgestellt, ist mit Einschränkungen oder Minderungen

der Festigkeiten und Steifigkeiten zu rechnen. Bei Bauteilprüfungen einer repräsentativen Stichprobe, die mechanische Einschränkungen aufzeigt, muss mit reduzierten Sicherheitswerten gerechnet werden. Holzbauteile neigen häufig zu Schwindrissen, welche im Laufe der Nutzung durch Trocknungsspannungen entstehen. Diese Risse wirken sich negativ auf die Scher- und Querkzugfestigkeit aus. In der Folge kann eine Herabsetzung dieser Werte oder eine Einschränkung der Anwendung (zum Beispiel die Beschränkung der neuen Anwendung auf druckbeanspruchte Bauteile) erfolgen.

3.1.1.5 Einbau

Der Einbau kann erst stattfinden, wenn alle Schritte zur Sicherstellung der Qualitätsanforderungen für eine Wiederverwendung erfüllt sind. Nach dem das entsprechende Bauteil eingebaut wurde ist die vorliegende Qualität und Erfüllung der Funktion im Bestand zu überprüfen.

3.2 Repair - Reparatur

Einige alte Holzbauteile sind aufgrund geringfügiger Schäden oder einer Vielzahl an Verbindungsmitteln nicht für die direkte Wiederverwendung geeignet. In bestimmten Fällen können jedoch gezielte Instandsetzungsmaßnahmen die ursprüngliche Tragfähigkeit weitgehend wiederherstellen, sodass eine erneute Nutzung ohne umfassende Weiterverarbeitung möglich ist. Beispielsweise lassen sich tiefgehende Risse durch den Einsatz fugenfüllender Klebstoffe strukturell ertüchtigen. Zudem können beschädigte Bereiche, die infolge mechanischer Beanspruchung entstanden sind, gezielt entfernt werden, während das verbleibende Bauteil für eine Wiederverwendung erhalten bleibt.

3.2.1 Prozessbeschreibung

Für rückgebaute Bauteile, die nicht unmittelbar wiederverwendet werden können, jedoch sanierbar sind, gelten im Wesentlichen die gleichen Prozessschritte wie bei der Wiederverwendung. Ergänzend umfasst der Prozess die präzise Identifizierung der beschädigten Bereiche sowie deren gezielte Reparatur.

Dieser Sanierungsprozess beinhaltet mehrere Schritte:

1. Ausbau
2. Lagerung
3. Materialprüfungen
4. Identifizierung und Quantifizierung von beschädigten Stellen
5. Sanierung von Rissen und Entfernung beschädigter Abschnitte
6. Statische Bemessung
7. Einbau

3.2.1.1 Identifizierung von beschädigten Stellen

Bei Holzkonstruktionen aus verklebten Bauprodukten können während der Nutzungsphase in Abhängigkeit wechselnder klimatischer Bedingungen und außerordentlicher mechanischer Belastungen Risse entstehen. Durch Veränderungen am Bauwerk (zusätzliche Nutzlasten, Einbringen von Durchdringungen, geänderte Nutzung, etc.) und häufig in Verbindung mit hohen Schnee- und Windlasten können in Extremfällen auch Materialbrüche auftreten. Ursache für Materialbrüche in Holzkonstruktionen sind Überschreitungen mechanischer Belastungen, welche sich anfänglich durch charakteristische Risse bemerkbar machen. Geeignete Holzbauteile können sowohl im Bestand als auch für eine zukünftige Sekundärnutzung durch Reparaturen aufbereitet werden, um die durch Beschädigungen beeinträchtigte Leistungsfähigkeit wiederherzustellen. Vor Beginn der Reparaturarbeiten ist es entscheidend, die Schäden präzise zu erfassen und zu quantifizieren, um festzustellen, ob eine Reparatur zielführend ist und gezielte und effektive Reparaturmaßnahmen planen zu können.

Risse lassen sich am zuverlässigsten durch eine gründliche visuelle Untersuchung der Oberflächen mithilfe einer Risstiefenmessung identifizieren. Insbesondere bei verklebten Produkten sind Risse in der Regel gut sichtbar und meist von außen eindeutig zu erkennen. Beim Rückbau-Audit können bereits vorliegende Risse mithilfe einer Fühlerlehre auf ihre Risttiefe untersucht werden. Somit kann bereits in einem frühen Stadium abgeschätzt werden, ob eine Reparatur technisch realisierbar und wirtschaftlich sinnvoll ist.

3.2.1.2 Sanierung von Rissen und Entfernung beschädigter Abschnitte

Für leicht zugängliche Risse in tragenden Holzbauteilen besteht die Möglichkeit, diese durch Klebstofffüllungen mit dafür zugelassenen Sanierklebstoffsystemen zu sanieren. Im Rahmen der Kreislaufwirtschaft stellt diese Methode eine nachhaltige Option zur Wiederverwertung von Holzbauteilen dar, indem beschädigte Komponenten repariert statt ersetzt werden. Der Grad der Wiederherstellung der ursprünglichen Leistungsfähigkeit kann jedoch nicht exakt quantifiziert werden und ist maßgeblich abhängig von der Rissgeometrie sowie dem Typ und der Anwendung des eingesetzten Klebstoffs. Es muss auf jeden Fall darauf geachtet werden, wie sehr sich die vorliegende Beschädigung auf die mechanischen Eigenschaften eines Bauteils auswirkt.

Es ist zu beachten, dass der gegenwärtige Stand der Technologie noch nicht die vollständige Automatisierung der Rissanierung von Holzbauteilen ermöglicht. Die derzeit verfügbaren Techniken erfordern aufwendige manuelle Eingriffe und detaillierte Analysen, um die Wirksamkeit der Reparaturen zu gewährleisten. Jede Reparaturmaßnahme sollte daher sorgfältig geplant und umgesetzt werden, um die Nachhaltigkeit und Effizienz im Umgang mit Holzbauteilen zu optimieren.

Bereiche, die von holzerstörendem Pilzbefall betroffen sind, müssen gemäß ÖNORM B 3802-4 grundsätzlich mindestens 0,3 Meter über den sichtbaren Befall hinaus abgetrennt werden. Bei einem Befall durch den Echten Hausschwamm sind es 1 Meter. Ist die Schädigung der Holzbauteile jedoch so gering, dass die Tragfähigkeit nicht wesentlich beeinträchtigt wird, reicht es aus, lediglich die befallenen Stellen bis zum gesunden Holz mechanisch zu entfernen [15]. Auch durch mechanische Einwirkungen beschädigte Bereiche müssen vom restlichen Bauteil abgetrennt werden.

Zusätzlich bietet sich die Möglichkeit durch hochfeste Holzwerkstoffplatten die Tragfähigkeit der beschädigten Bauteile wiederherzustellen. Diese können mithilfe von Schraubpressverklebungen durchgeführt werden.

3.3 Remanufacture – Wiederaufbereitung

Wenn rückgebaute Holzbauteile weder direkt wiederverwendet noch mit vertretbarem technischem und wirtschaftlichem Aufwand saniert werden können, bieten sie unter bestimmten Umständen dennoch Potenzial für die Weiterverarbeitung zu neuem Rohmaterial für tragende Bauteile. Ein wesentlicher Vorteil der Wiederaufbereitung liegt darin, dass beschädigte oder mit Schadstoffen belastete Bereiche vor der Weiterverarbeitung abgetrennt werden können. Das neu gewonnene Rohmaterial kann anschließend im Produktionsprozess neu festigkeitssortiert werden, wodurch gleichwertige Informationen wie bei Frischholz verfügbar sind. Zudem ist die Wiederaufbereitung flexibel, da sie nicht an bestimmte Bauteile mit festgelegten Dimensionen gebunden ist. Durch das Keilzinken von neuen Brettern lassen sich wie bei der Frischholzverarbeitung Endloslamellen herstellen, die mittels Flächenverklebung zu individuellen Bauteilen weiterverarbeitet werden können.

3.3.1 Prozessbeschreibung

Massivholzprodukte können durch das Auftrennen in Bretter als Rohmaterialien für neue Bauprodukte genutzt werden. Bei alten Brettschichtholzträgern besteht die Möglichkeit, Stablamellen herzustellen. Dabei werden die Träger zuerst längs zur Klebefuge in Blöcke und anschließend quer zur Klebefuge in Stablamellen aufgetrennt.

Die Prozessschritte zur Wiederaufbereitung alter Holzbauteile ähneln im Wesentlichen denjenigen bei der Herstellung neuer tragender Holzbauprodukte. Vorab ist es jedoch notwendig, Verbindungsmittel zu entfernen und Schutzanstriche mit chemischen Kontaminationen abzutrennen, um eine schadstofffreie Weiterverarbeitung und Wiederverwendung zu gewährleisten ohne Sicherheitsrisiken einzugehen.

Im Gegensatz zu Frischholz benötigen rückgebaute Bauteile keinen Trocknungsprozess, was den gesamten Prozess effizienter gestaltet und Energieeinsparungen ermöglicht. Um aus phytosanitären Gründen sicher zu gehen, kann es zielführend sein, derartige Sortimente einer kurzzeitigen Temperaturbehandlung durch geeignete Trocknungsverfahren zu unterziehen.

Dafür sollten die Bauteile jedoch vom Ausbau bis zur Weiterverarbeitung durchgehend trocken gelagert werden und eine maximale Holzfeuchte von 18 % nicht überschreiten. Grundsätzlich sind Bretter und Stablamellen aus rückgebauten Holzbauteilen als zusätzliche Rohstoffquelle neben frischem Rundholz zu betrachten. Ab der Festigkeitssortierung können sie nahtlos in die gleiche Prozesskette integriert werden. Fehlende Stellen im Querschnitt, welche durch das Anbringen von Verbindungsmitteln im alten Bauteil entstanden sind können bei der Sortierung gleich wie Äste beurteilt werden:

1. Ausbau
2. Lagerung
3. Materialprüfungen

4. Reinigung und Entfernung von Schad- und Störstoffen
5. Zuschnitt und Hobelung
6. Festigkeitssortierung
7. Keilzinkung und Flächenverklebung
8. Abbund
9. Einbau

3.3.1.1 Ausbau

Die entsprechenden Holzbauteile müssen sorgfältig ausgebaut werden, um Schäden zu vermeiden. Besonders gut geeignet sind Bauteile mit einfach zu lösenden mechanischen Verbindungen.

3.3.1.2 Lagerung

Rückgebaute Bauteile müssen witterungsgeschützt und trocken gelagert werden. Während dem gesamten Prozess vom Rückbau bis zum erneuten Einbau dürfen die Holzbauteile eine Holzfeuchte von 18 % nicht übersteigen. Sollte eine kurzfristige Befeuchtung gegeben sein, müssen die Bauteile entsprechend rückgetrocknet werden [14].

3.3.1.3 Materialprüfungen

Bei verklebten Bauprodukten, wie zum Beispiel Brettschichtholzträgern, sind nach dem erfolgreichen Ausbau aus dem rückgebauten Gebäude Materialprüfungen notwendig, welche die erforderliche Verklebungsqualität gewährleisten. Dazu sind Verklebungsprüfungen gemäß EN 14080, Anhang C vorgesehen [17]. Dabei müssen, wie bei neuen Produkten gewisse Grenzwerte zur maximalen Delaminierung erfüllt werden. Die Mittelwerte an die Gesamtdelaminierung sind einzuhalten, Einzelwerte dürfen in den Randbereichen der rückgebauten Holzbauteile die vorgegebenen Grenzwerte überschreiten, sofern diese Bereiche bei der weiteren Verarbeitung vom restlichen Bauteil abgetrennt werden.

3.3.1.4 Reinigung und Entfernung von Schad- und Störstoffen

Die rückgebauten Bauteile können vor der weiteren Verarbeitung gereinigt werden, um Verschmutzungen zu entfernen. Vor der weiteren Verarbeitung nach dem Rückbau müssen alte Holzbauteile vollständig von Verbindungsmitteln und anderen Fremdkörpern befreit werden. Dieser Schritt ist unerlässlich, um einerseits eine störstofffreie Weiterverarbeitung sicherzustellen und andererseits die Lebensdauer der Maschinen und Anlagen zu erhalten, indem übermäßiger Verschleiß vermieden wird. Insbesondere Metallteile können zu Beschädigungen an Hobelmaschinen und Sägeblättern führen, wenn sie nicht ordnungsgemäß entfernt werden. Es ist auszuschließen, dass die Bauteile Schad- oder Störstoffe enthalten.

3.3.1.5 Zuschnitt und Hobelung

Der genaue Zuschnitt muss auf Grundlage der gegebenen Dimensionen von den rückgebauten Holzbauteilen sorgfältig geplant werden. Bei der Weiterverarbeitung von Brettschichtholz zu Stablamellen hat sich in Untersuchungen gezeigt, dass die mechanischen

Eigenschaften von Stablamellen stark mit der Lamellenbreite zusammenhängen. Dies liegt daran, dass breitere Stablamellen in der Regel aus mehreren einzelnen Stäben bestehen, was zu einer größeren Homogenität bzw. geringeren Streuung führt. Im Gegensatz dazu streuen bei schmaleren Stablamellen mit weniger Stäben die mechanischen Eigenschaften stärker.

3.3.1.6 Festigkeitssortierung

Grundsätzlich können Lamellen aus alten Bauteilen gemäß DIN 4074-1 festigkeitssortiert werden [12]. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass zusätzlich zu den üblichen Kriterien der Frischholzsartierung auch durch Nutzung und Alterung entstandene Merkmale, die die Festigkeit beeinträchtigen könnten, erfasst und quantifiziert werden müssen. Stablamellen aus aufgetrennten Brettschichtholzträgern müssen jedoch nach eigenen Vorgaben klassifiziert werden.

3.3.1.7 Verklebung

Die Verklebung kann genauso erfolgen wie bei der Verarbeitung von Frischholz. Zunächst werden die Lamellen keilgezinkt, um Endloslamellen herzustellen. Diese können dann im nächsten Produktionsschritt flächig miteinander verklebt werden.

4 Literaturverzeichnis

- [1] J. Potting, M. Hekkert, E. Worrell, A. Hanemaaijer, Circular Economy: Measuring Innovation in the product chain. Policy Report, The Hague, 2017.
- [2] Bundesministerium für Klimaschutz, Österreich auf dem Weg zu einer nachhaltigen und zirkulären Gesellschaft. Die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie., 2022.
- [3] K. Albrecht, A. Neumüller, Materialeigenschaften alter tragender Holzbauteile im Hinblick auf ihr Kreislaufpotenzial: Timberloop - Endbericht zum AP3, Wien, 2025.
- [4] Bundesministerium für Land-Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Recyclingholzverordnung StF: BGBl. II Nr. 160/2012: Gesamte Rechtsvorschrift für Recyclingholzverordnung, Fassung vom 02.08.2023, 2023.
- [5] C. Piccardo, M. Hughes, Design strategies to increase the reuse of wood materials in buildings, Journal of Cleaner Production 368 (2022) 133083.
- [6] S. Winter, M. Weigl-Kuska, Triple A Holz: Altholz Aufkommen Austria. Auftragsstudie des Fachverband der Holzindustrie, Wien, 2024.
- [7] P. Niemz, A. Teischinger, D. Sandberg, Springer Handbook of Wood Science and Technology: 6.8 Aging and Corrosion, Springer Cham, 2023.
- [8] K. Kránitz, Effect of natural aging on wood (2014).
- [9] A. Cavalli, D. Cibecchini, M. Togni, H.S. Sousa, A review on the mechanical properties of aged wood and salvaged timber, Constr. Build. Mater. 114 (2016) 681–687.
- [10] Austrian Standards International, ÖNORM B 4100-2: Berechnung und Ausführung der Tragwerke; Holzbau; Holztragwerke, Austrian Standards International, Wien, 1951.
- [11] TU Graz (Ed.), Grazer Holzbau - Fachtagung 1998: aus der Reihe 'Sortierung und Festigkeit'. Tagungsband zur Präsentation des FFF-Sortierprojektes 'S13', 1998.
- [12] Deutsches Institut für Normung, DIN 4074-1: Sortierung von Holz nach Tragfähigkeit - Teil 1: Nadelschnittholz, Beuth Verlag, Berlin, 2012.
- [13] Austrian Standards International, EN 14081-1: Holzbauwerke - Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt - Teil 1: Allgemeine Anforderungen, Austrian Standards International, Wien, 2019.
- [14] Austrian Standards International, ÖNORM B2320: Gebäude aus Holz - Technische Anforderungen, Austrian Standards International, Wien, 2022.
- [15] Austrian Standards International, ÖNORM B 3802-4: Holzschutz im Bauwesen. Teil 4: Bekämpfungs- und Sanierungsmaßnahmen gegen Pilz- und Insektenbefall, Austrian Standards International, Wien.
- [16] Austrian Standards International, ÖNORM B 2215: Holzbauarbeiten - Werkvertragsnorm, Austrian Standards International, Wien, 2017.
- [17] Austrian Standards International, EN 14080: Holzbauwerke - Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen, Austrian Standards International, Wien, 2013.
- [18] C. Fürhapper, Kontaminationen und Schadstoffverteilung in gealterten Holzbauteilen: TimberLoop Teilbericht, Wien, 2025.

-
- [19] Europäisches Parlament, Reach Verordnung (EG) Nr. 1907/2006, 2006.
- [20] Austrian Standards International, EN 15497: Keilgezinktes Vollholz für tragende Zwecke - Leistungsanforderungen und Mindestanforderungen an die Herstellung, Austrian Standards International, Wien, 2014.
- [21] Austrian Standards International, ÖNORM B 4100-2: Holzbau Holztragwerke, Austrian Standards International, Wien, 1981.
- [22] Austrian Standards International, Eurocode 5: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauten; Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Bemessung für den Brandfall, 2011.
- [23] Deutsches Institut für Normung, DIN SPEC 91484: Verfahren zur Erfassung von Bauprodukten als Grundlage für Bewertungen des Anschlussnutzungspotentials vor Abbruch- und Renovierungsarbeiten (Pre-Demolition-Audit), Beuth Verlag, Berlin, 2023.
- [24] Österreichisches Institut für Bautechnik, OIB Richtlinien, Begriffsbestimmungen, OIB-330-003/23. Ausgab: Mai 2023, Wien, 2023.
- [25] Austrian Standards Institute, ÖNORM B 3151 Rückbau von Bauwerken als Standardabbruchmethode (Ausgabe: 01-12-2014).

5 **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Lineares Prozessmodell für tragende Holzbauteile	4
Abbildung 2: Zirkuläres Prozessmodell für tragende Holzbauteile	4
Abbildung 3: Zeitliche Entwicklung von Festigkeitseinstufungen für Bauholz in Österreich	9
Abbildung 4: Prozessflussdiagramm zur Durchführung der Kreislaufkonzepte	10
Abbildung 5: Prozessflussdiagramm zur Erkennung und Entfernung von Schad- und Störstoffen.....	16
Abbildung 6: Prozessflussdiagramm für die Anwendung der Kreislaufkonzepte	17

6 Anhang

Rückbau-Audit (in Anlehnung an die DIN SPEC 91484 [23])

Dieses Dokument dient als Grundlage zur Bewertung alter tragender Holzbauteile im Bestand.

	Eigenschaft	Wert	Zusatzinformation
1. Gebäudeinformationen	1.1. Adresse ^{1.1.}		
	1.2. Gebäudeklasse ^{1.2.}		
	1.3. Errichtungsjahr ^{1.3.} (Umbaujahre)		
	1.3. Nutzungsgeschichte ^{1.4.}		
	1.5. Geplanter Rückbau ^{1.5.}		
	1.6. Vorhandene Dokumente ^{1.6.}		

2. Informationen zur Tragkonstruktion	2.1. Pläne ^{2.1.}		
	2.2. Bemessungsgrundlagen ^{2.2.}		
	2.3. Aufbau der Tragkonstruktion ^{2.3.} (Primäre Tragkonstruktion, Sekundäre Tragkonstruktion)		
	2.4. Bautechnische Nachweise ^{2.4.} (CE-Kennzeichnungen)		

3. Bauteilinformationen (Repräsentative Stichproben ermöglichen eine Gruppenbewertung mehrerer Bauteile. Fehlen ausreichende Informationen, ist eine Einzelbewertung nötig)	3.1. Bauteilbezeichnung^{3.1.}		
	3.2. Menge^{3.2.}		
	3.3. Dimensionen^{3.3.}		
	3.4. Holzart, Holzfeuchte und Kennzeichnungen^{3.4.}		
	3.5. Anschlüsse^{3.5.}		
	3.6. Bindemittel und Oberflächenbehandlung^{3.6.}		
	3.7. Allgemeiner Zustand^{3.7.}		

4. Bewertung des Wiederverwendungspotenzials

(Repräsentative Stichproben ermöglichen eine Gruppenbewertung mehrerer Bauteile. Fehlen ausreichende Informationen, ist eine Einzelbewertung nötig)

4.1. Wiederverwendungspotenzial für eine tragende Funktion

- Hoch
- Mittel
- Niedrig

Geeignete Kreislaufkonzepte:

4.2. Wiederverwendungspotenzial für eine nichttragende Funktion

- Hoch
- Mittel
- Niedrig

Geeignete Kreislaufkonzepte:

4.3. Weiterführende Fachgutachten

Beurteilung der Resttragfähigkeit

Beurteilung vorliegender Rissbildung

Beurteilung des Klebstoffs und der Verklebungsgüte

Beurteilung vorliegender Schadstoffkontaminationen

Erläuterungen zu den aufzunehmenden Parametern

1. Gebäudeinformationen:

- 1.1. Die vollständige Adresse des rückzubauenden Gebäudes ist anzugeben.
- 1.2. Die Gebäudeklasse ist gemäß der Richtlinie OIB-330-003/23 [24] zu benennen.
- 1.3. Bei Änderungen oder Erweiterungen des Baukörpers sind die entsprechenden Maßnahmen sowie das Durchführungsdatum anzugeben.
- 1.4. Die Nutzungsgeschichte ist in Perioden zu gliedern. Für jede Periode sind die vorliegenden Klimabedingungen sowie die Art der Nutzung zu beschreiben.
- 1.5. Falls bereits ein Datum für den geplanten Rückbau festgelegt wurde, ist dieses anzugeben.
- 1.6. Verfügbare weiterführende Dokumente, die Informationen über das Gebäude und die enthaltenen Holzbauteile liefern (z.B. Schad- und Störstofferkundung gemäß ÖNORM B 3151 [25], DIN SPEC 91484 [23]), sind aufzuführen und beizulegen.

2. Informationen zur Tragkonstruktion:

- 2.1. Vorhandene Pläne zur Tragkonstruktion sind aufzuführen und beizulegen. Zusätzlich sind, sofern verfügbar, Unterlagen zum Grundriss und zur Position von Bauelementen anzugeben.
- 2.2. Die statischen Bemessungsgrundlagen sind anzugeben und beizulegen.
- 2.3. Die Tragkonstruktion ist durch die verbauten Bauteile und deren Funktion zu beschreiben.
- 2.4. Vorliegende bautechnische Nachweise und Kennzeichnungen sind aufzuführen und beizulegen.

3. Bauteilinformationen

- 3.1. Die normative Bezeichnung und Spezifikation der vorliegenden Bauteile sind anzuführen.
- 3.2. Die Menge der vorhandenen Bauteile ist sowohl in Stückzahl als auch in Kubikmetern (m³) abzuschätzen und anzugeben.
- 3.3. Die Dimensionen für alle Bauteile sind anzugeben und in Länge, Breite und Höhe zu unterscheiden. Sollten die Bauteile aus einzelnen Elementen bestehen, sind die Dimensionen der einzelnen Elemente zusätzlich anzuführen.
- 3.4. Die Holzart der vorliegenden Bauteile ist zu bestimmen. Für jede Bauteilkategorie ist mindestens eine stichprobenartige Holzfeuchtemessung an einem Bauteil durchzuführen. Etwaige vorhandene Kennzeichnungen, wie Plaketten, Aufkleber oder Stempel sind zusätzlich zu dokumentieren.
- 3.5. Die Art und Funktion der vorliegenden Verbindungsmittel sind anzuführen. Zusätzlich ist anzugeben, durch den Einsatz welcher Werkzeuge diese Verbindungsmittel von den Bauteilen gelöst werden können.
- 3.6. Alle Bindemittel, welche erkennbar sind, müssen durch ihre Art, Erscheinungsbild (Farbe) und ihren Zustand beschrieben werden. Sichtbare Oberflächenbehandlungen sind anzuführen. Es ist anzugeben, ob ein Schadstoffverdacht vorliegt.
- 3.7. Der Gesamtzustand der Bauteile ist anzugeben und durch individuelle Parameter, wie bspw. Risse, Fäule, Krümmungen und mechanische Beschädigungen zu beschreiben.