Bestandsanalyse für die Wiederverwendung von tragenden Stahlbetonbauteilen

Version 1.1 – Dezember 2022

Autoren: Julie Devènes, Maléna Bastien-Masse, Corentin Fivet

EPFL ENAC IA SXL
Smart Living Lab - HBL
Passage du Cardinal 13b
CH - 1700 Fribourg

Structural Xploration Lab
+41 21 696 72 32
corentin.fivet@epfl.ch
https://sxl.epfl.ch

Finanzierung

Diese Arbeit wurde von Immobilien Basel-Stadt (IBS) finanziert.

Um diesen Bericht zu zitieren:

Devènes J., Bastien-Masse M., Fivet C. (2022), "Bestandsanalyse für die Wiederverwendung von tragenden Stahlbetonbauteilen", Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) und Immobilien Basel-Stadt (IBS), Fribourg und Basel. DOI: 10.5281/zenodo.7457954

Abbildung auf der ersten Seite

Wiederverwendung von Ortbetonteilen für das Udden-Projekt in Schweden, 1997.
Bild veröffentlicht in: Eklund, M., Dahlgren, S., Dagersten, A., & Sundbaum, G. (2003). The conditions and constraints for using reused materials in building projects. *Deconstruction and Materials Reuse*, 287, 248–259.

Übersetzung ins Deutsche

Nicole Widmer, EPFL, SXL

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung **4**

1 Einleitung **5**

1.1 Kontext 5

1.2 Zielsetzung 5

1.3 Umfang 5

2 Beurteilung der Wiederverwendbarkeit **7**

2.1 Präambel 7

2.2 Arten von Schäden an Stahlbeton 7

2.2.1 Allgemeines 7

2.2.2 Korrosion der Stahlbewehrung 7

2.2.3 Rissbildung 8

2.2.4 Alkali-Kieselsäure-Reaktion 9

2.2.5 Wasserschäden 9

2.2.6 Betonabplatzungen 9

2.3 Schadensklasse 9

2.4 Nutzungsklasse 11

2.5 Massnahmenklasse 11

2.6 Wiederverwendbarkeitsgrad 12

3 Verfahren für die Bestandsanalyse **16**

3.1 Präambel 16

3.2 Sichtung der vorhandenen Daten 17

3.3 Kategorisierung der Bauteile 17

3.4 Begehungen vor Ort und visuelle Untersuchung 17

3.5 Beurteilung der Schäden 17

3.6 Untersuchungen zur Geometrie 18

3.7 Materialuntersuchungen 18

3.7.1 Zerstörende Untersuchungen 18

3.7.2 Zerstörungsfreie Untersuchungen 19

3.8 Andere Beurteilungen der Bauteile 20

3.8.1 Ästhetik 20

3.8.2 Zugänglichkeit 20

3.8.3 Querschnittswiderstand 20

3.8.4 Volumenmässige Signifikanz 20

3.8.5 Umweltauswirkungen 20

4 Bericht **21**

4.1 Präambel 21

4.2 Bericht zur Bestandsanalyse 21

4.3 Zusammenfassende Tabelle 22

4.3.1 Ausgeschiedene Bauteile 22

4.3.2 Ausgewählte Bauteile 22

4.4 Bauteil-Datenblätter 22

5 Fazit 23
6 Referenzen 24
Anhang 1 - Checkliste 26
Anhang 2 - Vorlage für Datenblätter 27

Zusammenfassung

Heutzutage werden viele Stahlbetonbauten, die meist keine oder nur geringe strukturelle Defekte aufweisen, aus sozioökonomischen Gründen abgerissen. Wenn die Erhaltung eines bestehenden Gebäudes nicht möglich ist, erlaubt die Wiederverwendung der tragenden Bauteile in einem neuen Projekt, die schädlichen Umweltauswirkungen des Rück- und Neubaus zu verringern. Die Bauteile des obsoleten Gebäudes werden dabei sorgfältig demontiert, ohne sie zu Schutt zu zerkleinern. Sie werden gereinigt, möglicherweise repariert oder eingepasst und wiederverwendet, wobei ihre ursprüngliche Geometrie und ihre Eigenschaften so weit wie möglich erhalten bleiben. Die Anwendung dieser alternativen Strategie erfordert Änderungen im Planungsprozess der Abriss- und Neubauprojekte. Als Grundlage dafür muss das obsolete Bauwerk inventarisiert und analysiert werden, um die mechanischen und geometrischen Eigenschaften sowie die Dauerhaftigkeit der Stahlbetonbauteile zu bestimmen und ihre Wiederverwendbarkeit zu beurteilen. Das vorliegende Dokument beschreibt eine Methodik zur Beurteilung der Wiederverwendbarkeit und ein Verfahren für die Bestandsanalyse eines Stahlbetonbauwerk, das demnächst rückgebaut werden soll.

Um den Planern beim Prüfen der verschiedenen Wiederverwendungsmöglichkeiten für ein Bauteil zu helfen, wird zunächst ein Werkzeug zur Beurteilung der Wiederverwendbarkeit vorgestellt. Es basiert auf den vorhandenen Schäden des Bauteils, seiner zukünftigen Nutzung und den für die Instandsetzung der Bauteile erforderlichen Massnahmen. Die Schadensbewertung wird vor dem Rückbau des Spendergebäudes durchgeführt. Die Nutzungsklasse - die die künftige Beanspruchung des Bauteils ausdrückt - und die Massnahmenklasse - die den Unterhalt und die nötigen Anpassungen des Bauteils beschreibt - hängen vom Bau des Empfängergebäudes ab. Nach der Klassifizierung der Schäden, Nutzung und Massnahmen eines Bauteils ergibt sich der Wiederverwendbarkeitsgrad, der eine Empfehlung für die Wiederverwendung und die damit verbundenen Kontrollen im Empfängergebäude ausdrückt. Diese Methodik zur Beurteilung der Wiederverwendbarkeit soll die Subjektivität der Analyse des Wiederverwendungspotenzials von Stahlbetonbauteilen verringern.

In diesem Bericht werden die Schritte zur Durchführung einer vollständigen Bestandsanalyse von Stahlbetonbauwerken und deren Bauteilen beschrieben. Die Bestandsanalyse sammelt alle Informationen, die zur Beurteilung und Planung der zukünftigen Wiederverwendung der Bauteile erforderlich sind: Kategorisierung und Quantifizierung der Bauteile, Einstufung der vorhandenen Schäden, Untersuchungen der Geometrie und der Materialeigenschaften sowie Ermitteln weiterer Merkmale (Ästhetik, Zugänglichkeit, Tragwiderstand, Umweltauswirkungen). Diese systematische Methodik hat zum Ziel, die Subjektivität einer solchen Analyse zu verringern.

Die hier beschriebenen Methodiken und Verfahren ermöglichen es, den Rückbau eines veralteten Stahlbetonbauwerks zu planen und dabei Mittel anzuwenden, die die Wiederverwendung der Bauteile mit dem grössten Potenzial begünstigen. Sie liefern auch die Informationen für die vorläufige Planung eines Empfängerbauwerks. In späteren Planungsphasen können zusätzliche Untersuchungen am Bestand erforderlich sein.

1 Einleitung

1.1 Kontext

Die Bauindustrie ist für einen erheblichen Teil der vom Menschen verursachten Umweltauswirkungen verantwortlich. Die Herstellung von Beton, dem meist verwendeten Baumaterial, ist besonders schädlich für das Klima und die Artenvielfalt. So ist die Herstellung von Zement, einem Hauptbestandteil von Beton, für 6% aller anthropogenen Treibhausgasemissionen (THG) in der Schweiz verantwortlich [1]. Mit einem Anteil von 34% ist Beton auch die grösste Quelle von Bauabfällen in der Schweiz [2]. Betonabfälle entstehen vor allem beim Abbruch, der oftmals aus sozioökonomischen Gründen erfolgt, wenn die Bauteile eines obsolet gewordenen Gebäudes noch in gutem Zustand wären und ihren Zweck noch länger erfüllen könnten. In der Industrie wird der Beton heutzutage meist recycelt, wobei der Schutt in einem energieintensiven Prozess zerkleinert wird, um recyceltes Betongranulat herzustellen, das in neuen Betonmischungen einen Teil des natürlichen Kieses ersetzen kann. Diese so genannten "recycelten" Betonmischungen haben jedoch einen mindestens ebenso grossen Bedarf an Zement, weswegen es dadurch nicht zu einer Verringerung der Treibhausgasemissionen kommt [3]. Eine ökologisch effizientere Strategie ist deswegen die direkte Wiederverwendung von Betonbauteilen.

Die Wiederverwendung von Betonbauteilen obsoleter Gebäude in neuen Projekten ist ein nicht sehr bekannter und selten angewendeter Ansatz, der die Umweltauswirkungen des Betonbaus verringern kann. Bei der Wiederverwendung werden die Bauteile obsoleter Gebäude sorgfältig demontiert, ohne sie zu Schutt zu zerkleinern. Nach dem Rückbau werden die Elemente gesäubert, möglicherweise repariert oder eingepasst und schliesslich ohne grosse Veränderungen in einem neuen Projekt wiederverwendet, wobei ihre Formen und statischen Eigenschaften erhalten bleiben. Durch die Wiederverwendung bleiben nicht nur die graue Energie und die Geschichte der wiederverwendeten Bauteile bewahrt, die Bauindustrie kann dadurch auch ihre Abfallproduktion und den Materialverbrauch reduzieren. Um dies zu erreichen, erfordert die Wiederverwendung eine detaillierte Beurteilung der Bauteile in einer frühen Phase des Rückbauprojekts, einen sorgfältigen, selektiven Rückbauprozess sowie die Abstimmung auf ein Empfängerprojekt, in dem die Bauteile wiederverwendet werden und dessen Planung auf die Besonderheiten der Wiederverwendung zugeschnitten sein sollte.

1.2 Zielsetzung

Dieses Dokument konzentriert sich auf die Analyse bestehender Stahlbetonkonstruktionen, die demnächst rückgebaut werden sollen, um das Wiederverwendungspotenzial der tragenden Bauteile zu beurteilen und aufzuzeigen. Es beschreibt zunächst die **Beurteilung der Wiederverwendbarkeit** von Stahlbetonbauteilen anhand von drei Kriterien: Schäden, Nutzung und Massnahmen. Die Beurteilung der Wiederverwendbarkeit ist ein Werkzeug, das Planern bei der Entscheidung über die beste Verwendung eines wiederverwendeten Stahlbetonbauteils hilft. Anschliessend wird Schritt für Schritt ein Verfahren beschrieben, um die **Bestandsanalyse** von Gebäuden mit Tragwerken aus vorfabrizierten Elementen oder Ortbetonbauteilen durchzuführen. Dazu gehören die Bestandsaufnahme und Kategorisierung der Bauteile, die Schadensbewertung, Untersuchungen zur Geometrie und zu den Materialien sowie andere relevante quantitative und qualitative Informationen zu den Bauteilen. Die in der Bestandsanalyse gesammelten Daten helfen den Planern, die Wiederverwendung der Bauteile im besten Zustand, mit dem grössten Volumenanteil und somit mit dem grössten verkörperten Treibhauspotenzial zu priorisieren. Die Ergebnisse der Bestandsanalyse in Kombination mit der Beurteilung der Wiederverwendbarkeit dienen als Grundlage für das Entwickeln und die Planung einer künftigen Wiederverwendung der Bauteile.

Diese Untersuchungen ermöglichen es, den Rückbau des obsoleten Bauwerks mit Mitteln zu planen, die später die Wiederverwendung der Bauteile begünstigen. Sie reduzieren auch die Unbekannten bei der Planung des neuen Bauwerks mit den in der Analyse beschriebenen Bauteilen. Abbildung 1 veranschaulicht, wie die Bewertungen der Wiederverwendbarkeit und der Ressourcen in die Projektphasen sowohl des veralteten Bauwerks - des Spendergebäudes - als auch des neuen Gebäudes - des Empfängergebäudes - integriert werden.

1.3 Umfang

Die Methodik wurde für Stahlbetontragwerke oder selbsttragende Stahlbetonbauteile wie Fassadenelemente entwickelt. Die folgenden Gebäudeelemente fallen nicht in den Anwendungsbereich des beschriebenen Verfahrens:

- Tragende Bauteile, die nicht aus Beton bestehen;

- Nicht tragende Trennwände, Türen und Fenster;
- Technische Ausstattung für HLKS;
- Jegliche elektrischen Geräte;
- Alle Deckschichten;
- Möbel.

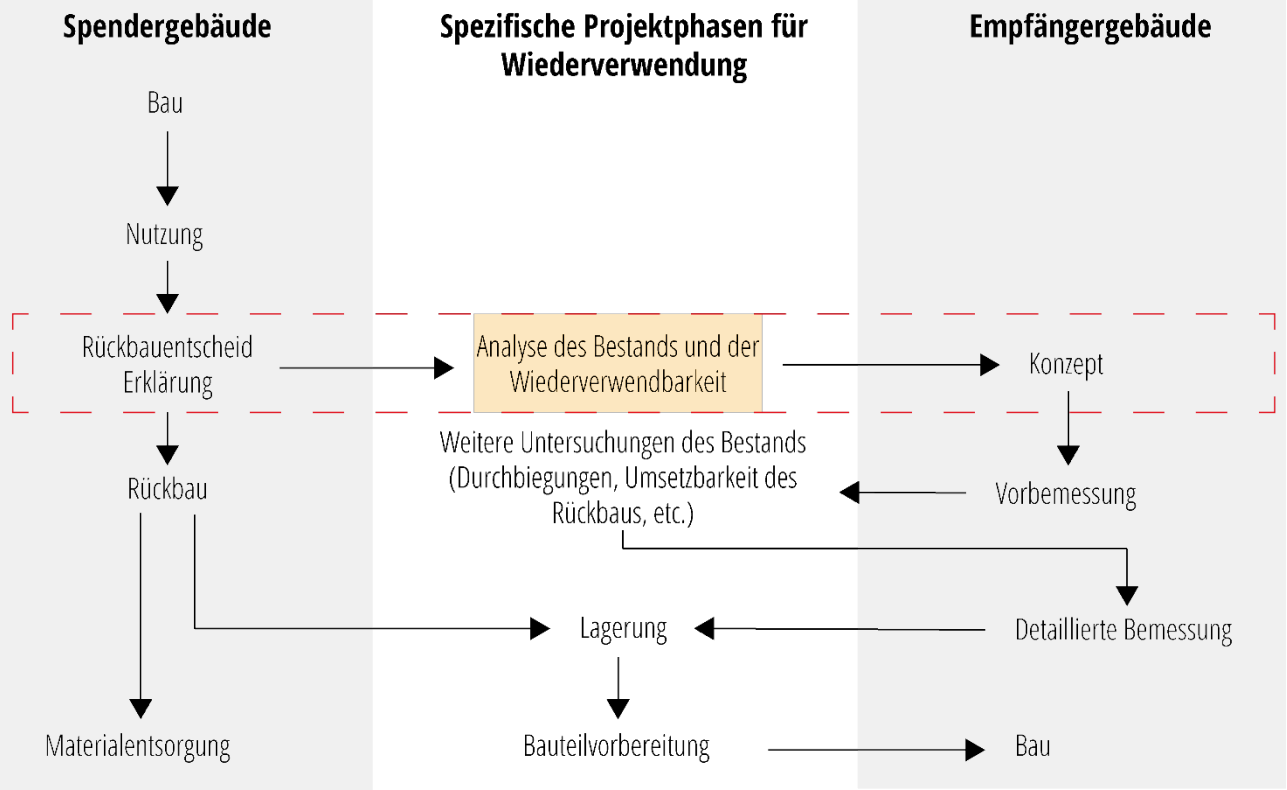

Abbildung 1. Bestandsanalyse und Beurteilung der Wiederverwendbarkeit in den Projektphasen

Die Beurteilung der Wiederverwendbarkeit und die Bestandsanalyse beruhen auf vorhandenen Unterlagen, visuellen Untersuchungen und begrenzten Tests des Spendergebäudes vor dem Rückbau. Folgende Aspekte werden dabei nicht berücksichtigt:

- Belastungsgeschichte des Bauteils: Es wird davon ausgegangen, dass das analysierte Bauwerk den Standardbelastungen für seine aktuelle oder, falls bekannt, frühere Nutzung ausgesetzt war. Aussergewöhnliche Belastungen, denen das Bauwerk oder seine Bauteile zwischen dem Bau und dem Rückbau ausgesetzt waren, werden nicht ausdrücklich berücksichtigt. Es werden lediglich daraus resultierende Schäden erfasst, sofern diese sichtbar sind.
- Durchbiegung des Bauteils: Dauerhafte Durchbiegungen des Bauteils aufgrund von Rissen oder Langzeiteffekten werden nicht berücksichtigt, es sei denn, sie sind deutlich sichtbar. Es wird davon ausgegangen, dass die Durchbiegungen innerhalb des üblichen Bereichs liegen. Diese Annahme sollte jedoch nach dem Rückbau des Bauteils und vor seiner Wiederverwendung überprüft werden.
- Umsetzbarkeit des Rückbaus: Die Machbarkeit der Demontage eines Bauteils aus dem Spendergebäude wird bei der Beurteilung der Wiederverwendbarkeit nicht berücksichtigt.
- Rückbauschäden: Alle Schäden, die während der Demontage aus dem Spenderbauwerk und beim Hantieren mit dem Bauteil auftreten könnten, werden nicht berücksichtigt, da die Analyse bereits vor diesen Schritten erfolgt. Zusätzliche visuelle Inspektionen sollten vorgesehen werden nach der Demontage und vor dem Wiedereinbau in das Empfängerbauwerk.

2 Beurteilung der Wiederverwendbarkeit

2.1 Präambel

Im Bereich bestehender Bauwerke werden bei einer Zustandsanalyse der tragenden und nicht-tragenden Bauteile Schäden sowie schädliche Unregelmässigkeiten erfasst. Diese beeinflussen die Dauerhaftigkeit, die Gebrauchstauglichkeit und die strukturelle Sicherheit der tragenden Bauteile und letztendlich des gesamten Bauwerks. Aus dieser Analyse ergeben sich Empfehlungen für Ertüchtigungsmassnahmen, um das gewünschte Verhalten des Bauwerks sicherzustellen. Die Zustandsanalyse bestehender Bauwerke, insbesondere bestehender Brücken, wird in der Literatur bereits von vielen Autoren behandelt. Es werden Möglichkeiten zur Beurteilung des Zustands von Bauwerken einerseits aufgrund visueller Untersuchungen beschrieben [4–6] und andererseits mit Hilfe von Sensormessungen [7] und unter dem Einsatz neuer Technologien, wie z.B. Drohnen [8–10] oder 3D-Scanner und Virtual Reality [11].

Die visuelle Beurteilung ist eine einfache, effektive und kostengünstige Methode, um schnell eine Einschätzung des individuellen Zustands der Teile eines Bauwerks zu erhalten [12]. Sie kann von jedem Ingenieur durchgeführt werden und beinhaltet daher auch ein hohes Mass an Subjektivität [12–14], was durch Methodiken oder Verfahren teilweise behoben wird [6,11,12,15]. Bei der visuellen Analyse eines bestehenden Bauwerks werden mehrere Faktoren berücksichtigt, um den Zustand der tragenden Bauteile so objektiv wie möglich zu beurteilen. Bertola und Brühwiler [6] beschreiben den Zustand eines Bauteils als das Produkt des Schädigungsgrads und der Risikoklasse, um angemessene Ertüchtigungsmassnahmen zu definieren. Wie in vielen anderen Studien wird der Schädigungsgrad durch das Ausmass und den Schweregrad der Schäden charakterisiert [16,14,11]. Die Risikoklasse wird durch die Auswirkungen des Versagens eines Bauteils auf die Sicherheit der gesamten Tragstruktur bestimmt [16,14].

Wenn ein wiederverwendetes Bauteil in schlechtem Zustand ist oder falsch eingesetzt wird, erhöht dies das Risiko eines unerwünschten Verhaltens des neuen Bauwerks. Daher gibt die Beurteilung der Wiederverwendbarkeit in einer Wiederverwendungsstrategie Anhaltspunkte dafür, wie ein Stahlbetonbauteil am besten wiederverwendet werden kann, um Downcycling zu vermeiden. Dabei werden bereits vorhandene Schäden (Schadensklasse), die beabsichtigte Verwendung im Empfängerbauwerk (Nutzungsklasse) sowie die geplanten Massnahmen an dem Bauteil vor der Wiederverwendung (Massnahmenklasse) berücksichtigt. In den folgenden Abschnitten wird die vorgeschlagene Methodik zur Beurteilung des Zustands von Stahlbetonbauteilen im Hinblick auf ihre Wiederverwendung und zur Ermittlung ihres Wiederverwendbarkeitsgrads beschrieben. Das Vorgehen beruht auf der risikobasierten Methodik von Bertola und Brühwiler [6] für die Zustandsanalyse von Brücken durch visuelle Inspektion. Die Schadensklasse ist dabei der einzige Faktor, der im Verlauf der Bestandsanalyse ermittelt wird (siehe Abschnitt 3), die anderen beiden Faktoren hängen vom Empfängerprojekt ab und dienen als Entscheidungshilfe bei der Wahl einer angemessenen Wiederverwendungsstrategie.

2.2 Arten von Schäden an Stahlbeton

2.2.1 Allgemeines

Schäden an Stahlbeton können auftreten, wenn er bestimmten klimatischen Bedingungen ausgesetzt ist. Diese Schäden beeinträchtigen die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton und können zu Problemen bei der Gebrauchstauglichkeit und der strukturellen Sicherheit führen. Die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton verändert sich mit der Zeit und wird beschrieben durch 1) die Initiierungsphase, in der das Element durch den Verlust des Schutzes und die Einwirkung von Schadstoffen angreifbar wird, und 2) die Schädigungsphase, in der die Tragfähigkeit des Bauteils abnimmt. In den folgenden Abschnitten werden häufige Schäden an Stahlbeton beschrieben, von denen viele bei einer visuellen Untersuchung erkannt werden können.

2.2.2 Korrosion der Stahlbewehrung

Die Korrosion der Stahlbewehrung führt zu Schäden an der Betonoberfläche sowie zur Abnahme des Bewehrungsquerschnitts und somit zu einer Verringerung des Tragwiderstandes. Die folgenden drei Bedingungen müssen erfüllt sein, damit die Korrosion von Bewehrungsstäben ausgelöst wird: (1) Vorhandensein von Sauerstoff, (2) Vorhandensein von Feuchtigkeit und (3) Depassivierung der Bewehrungsstäbe entweder durch die Präsenz von Chloriden oder durch die Karbonatisierung des Betons [17]. Bei Stahlbetonkonstruktionen schützt die Deckbetonschicht die Stahlbewehrung vor äusseren Einflüssen. Das alkalische Milieu des Betons

verhindert die Korrosion der Bewehrungsstäbe, indem sich eine dünne Schutzschicht an der Schnittstelle zwischen den beiden Materialien bildet.

Chloride - z.B. aus Streusalz - können die Bewehrung erreichen, wenn die Deckbetonschicht zu dünn oder beschädigt - beispielsweise gerissen - ist. Sie senken den pH-Wert und wenn eine bestimmte Chloridkonzentration erreicht ist, wird die Schutzschicht der Stahlbewehrung instabil. Die Stahlbewehrung wird dann depassiviert und in Gegenwart von Wasser und Sauerstoff beginnt die Korrosion der Bewehrungsstäbe. Die durch Chloride verursachte Korrosion ist ein lokal begrenzter Korrosionsprozess. Bei einer visuellen Untersuchung kann dieser Prozess durch das Auftreten von örtlich begrenzten Korrosionsflecken auf der Betonoberfläche, durch lokale Abplatzungen des Deckbetons sowie lokale Korrosion der Stahlbewehrung festgestellt werden.

Karbonatisierung ist die chemische Reaktion zwischen dem in der Luft enthaltenen Kohlendioxid (CO_2) und dem in den Porenlösungen des Betons gelösten Calciumhydroxid ($Ca(OH)_2$). Dabei entsteht festes Calciumcarbonat ($CaCO_3$), das den betroffenen Beton tendenziell fester macht, aber den pH-Wert der Porenlösungen sinken lässt. Wenn die Karbonatisierungstiefe grösser ist als die Betonüberdeckung der Bewehrung, wird diese depassiviert und in Gegenwart von Sauerstoff und Wasser beginnt die Korrosion. Die durch Betonkarbonatisierung verursachte Korrosion ist ein allgemeiner Korrosionsprozess. Bei einer visuellen Untersuchung kann dieser Prozess wie auf Abbildung 2(a) durch Betonabplatzungen auf einer relativ grossen Fläche festgestellt werden sowie durch allgemeine Korrosion der Stahlbewehrung.

In Gebäuden, mit Ausnahme von Parkhäusern, sind keine Chloride vorhanden. Ausserdem ist die Luftfeuchtigkeit in Gebäuden im Allgemeinen gering. Daher ist es ungewöhnlich, dass Korrosion der Stahlbewehrung innerhalb von Gebäuden auftritt. Doch in jedem Fall gibt es heutzutage Methoden zur Bestimmung der Chloridkonzentration, der Karbonatisierungstiefe und des damit verbundenen Korrosionsrisikos bzw. des Korrosionsfortschritts der Bewehrungsstäbe [18].

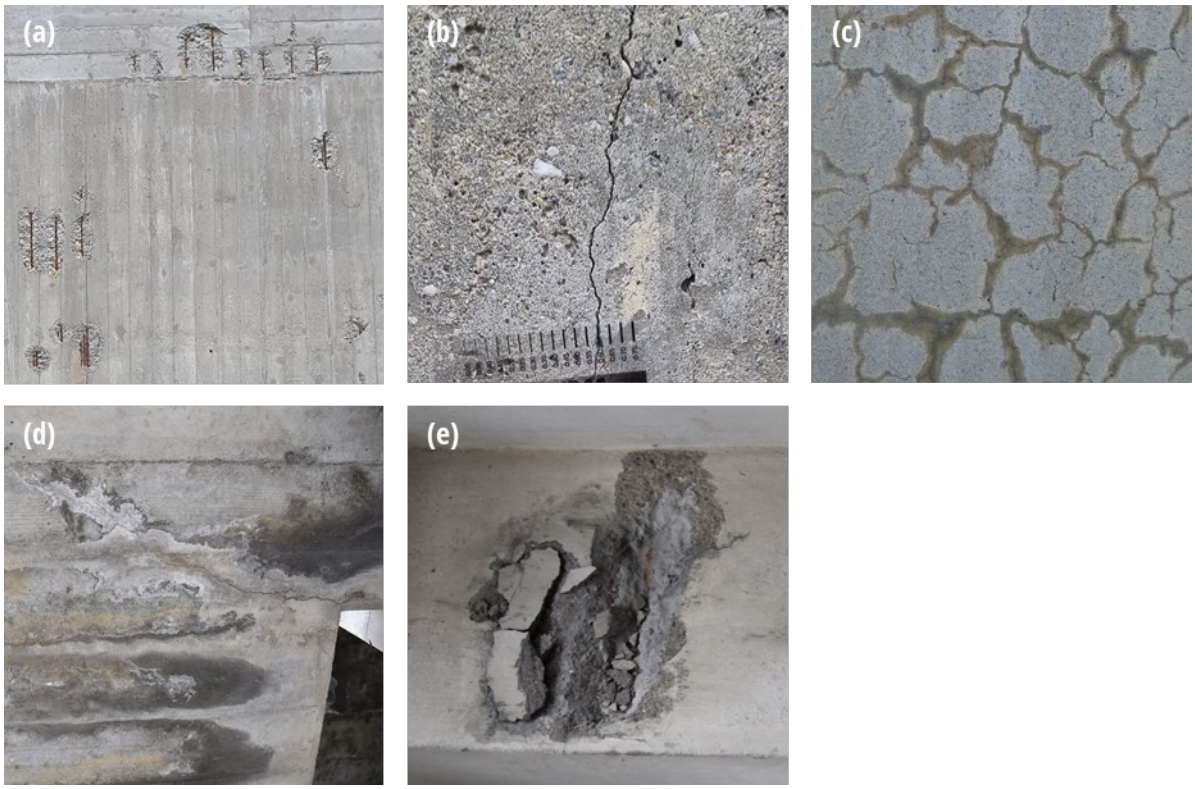

Abbildung 2. Stahlbetonschäden: (a) Korrosion der Stahlbewehrung; (b) Rissbildung; (c) Rissmuster aufgrund einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion (Foto von Shinkolobwe, CC BY-SA 4.0 via Wikimedia Commons); (d) Wasserschäden; (e) Betonabplatzungen.

2.2.3 Rissbildung

Rissbildungen im Beton kommen im Gebrauch häufig vor und werden normalerweise durch Biegerisse mit einer Öffnung von bis zu 0.3 mm charakterisiert. Es gibt jedoch auch anormale Risse, die auf verschiedene Ursachen zurückzuführen sind, wie z.B. aussergewöhnliche Belastungen, schlechte konstruktive Planung oder Ausführung, Zwängungen aufgrund von Beanspruchungen oder Temperaturänderungen, Alkali-Kieselsäure-Reaktion usw. Diese Risse können sich auf die Tragsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit auswirken, insbesondere

durch den Verlust der Steifigkeit. Sie beeinträchtigen auch die Dauerhaftigkeit der Bauteile, da sie das Eindringen von Schadstoffen (Wasser, Chloriden) erleichtern und somit den Beginn der Korrosion der Stahlbewehrung begünstigen. Bei der visuellen Untersuchung sollte auf eine grosse Anzahl von Rissen oder grosse Rissöffnungen geachtet werden (siehe Abbildung 2(b)).

2.2.4 Alkali-Kieselsäure-Reaktion

Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion ist ein langsamer Degradationsprozess, der auf die chemische Reaktion zwischen einem "reaktiven" Teil der Gesteinskörnung und den in der Porenlösung des Betons vorhandenen Alkalien zurückzuführen ist. Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion tritt dann auf, wenn die folgenden drei Bedingungen erfüllt sind: (1) Vorhandensein einer reaktiven Gesteinskörnung, (2) Vorhandensein von Feuchtigkeit, (3) ausreichende Alkalikonzentration. Das dadurch entstehende Kieselgel führt dazu, dass sich der Beton ausdehnt und schliesslich reisst. Die Folge ist der Verlust der mechanischen Eigenschaften: Abnahme der Zug- und Druckfestigkeit sowie Abnahme des Elastizitätsmoduls. Bei einer visuellen Untersuchung lassen sich Alkali-Kieselsäure-Reaktionen durch das Auftreten eines bräunlichen Rissnetzes erkennen (siehe Abbildung 2(c)). Da die Luftfeuchtigkeit in Gebäuden in der Regel niedrig ist, ist es sehr ungewöhnlich, dass Alkali-Kieselsäure-Reaktionen in Gebäuden auftreten. Im Fall eines Verdachts gibt es Methoden, um das Vorhandensein und den Fortschritt von Alkali-Kieselsäure-Reaktionen im Beton zu untersuchen.

2.2.5 Wasserschäden

Nasse Schlieren oder Ausblühungen weisen auf die Zirkulation von Wasser durch den Beton hin. Wenn diese stark ausgeprägt sind oder wenn Kalk-Stalaktiten auftreten, ist mit Korrosion der Bewehrung zu rechnen. Ein Beispiel für einen Wasserschaden ist in Abbildung 2(d) dargestellt.

2.2.6 Betonabplatzungen

Das Abplatzen von Beton kann durch eine äussere Einwirkung, aber auch durch Frost verursacht werden, wenn die Wassersättigung in den Betonporen hoch ist. Bei niedrigen Temperaturen gefriert das Wasser in den Poren, wodurch sich das Volumen vergrössert und der Beton abplatzt. Bei einer visuellen Untersuchung wird dieser Schaden durch Abplatzungen des Deckbetons ohne Korrosion der Stahlbewehrung festgestellt (siehe Abbildung 2(e)).

2.3 Schadensklasse

Die Schadensklasse wird durch eine visuelle Untersuchung bestimmt, wie von Bertola und Brühwiler für bestehende Tragwerke vorgeschlagen [6]. Dies ist die komplexeste Aufgabe bei der Beurteilung der Wiederverwendbarkeit und der Bestandsanalyse tragender Bauteile, da Schäden richtig interpretiert und verstanden werden müssen. Die visuelle Inspektion wird am obsoleten Bauwerk vor dessen Rückbau durchgeführt und in die Bestandsanalyse miteinbezogen, wie in Abschnitt 3.5 beschrieben. Die Schadensklassen werden in Tabelle 1 aufgeführt und in Abbildung 3 graphisch verdeutlicht. Die Einstufung basiert auf dem Ausmass (lokal, begrenzt oder grossflächig), dem Schweregrad (leicht, mittel oder schwer) und der Häufigkeit (einmalig oder häufig) des Schadens. Dabei kann nur ein lokaler Schaden nach der Häufigkeit eingestuft werden. Beispiele für die verschiedenen Schweregrade sind:

- Leichte Schäden: Feine Risse, Wasserflecken oder abgesplitterter Beton;
- Mässige Schäden: Risse, abgeplatzter oder abgesplitterter Beton, Ausblühungen, Korrosionsstellen;
- Schwere Schäden: Starke Rissbildung, Betonabplatzungen und freiliegende korrodierte Bewehrungsstäbe.

Der Schweregrad von Schäden lässt sich nicht immer durch eine visuelle Analyse beurteilen. Daher kann die Schadensklasse nach weiteren Untersuchungen korrigiert werden wie in den Abschnitten 3.6 und 3.7 beschrieben. Einige Beispiele für mögliche Korrekturen sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Schadensklasse (Zustand)	Beschreibung des Schadens			Konsequenzen
	Ausmass	Schweregrad	Häufigkeit	
A (Gut)	Keine	-	-	-
	Lokal	Leicht	Einmalig	
B (Annehmbar)	Lokal	Mittel	Einmalig	Dauerhaftigkeit
	Begrenzt	Leicht	-	
C (Mässig)	Lokal	Leicht	Häufig	Gebrauchstaugli chkeit
	Lokal	Schwer	Einmalig	
	Begrenzt	Mittel	-	
	Grossflächig	Leicht	-	
D (Schlecht)	Lokal	Mittel	Häufig	Gebrauchstaugli chkeit oder Sicherheit
	Begrenzt	Schwer	-	
	Grossflächig	Mittel	-	
E (Versagen)	Lokal	Schwer	Häufig	Sicherheit
	Grossflächig	Schwer		

Tabelle 1. Definition der Schadensklassen

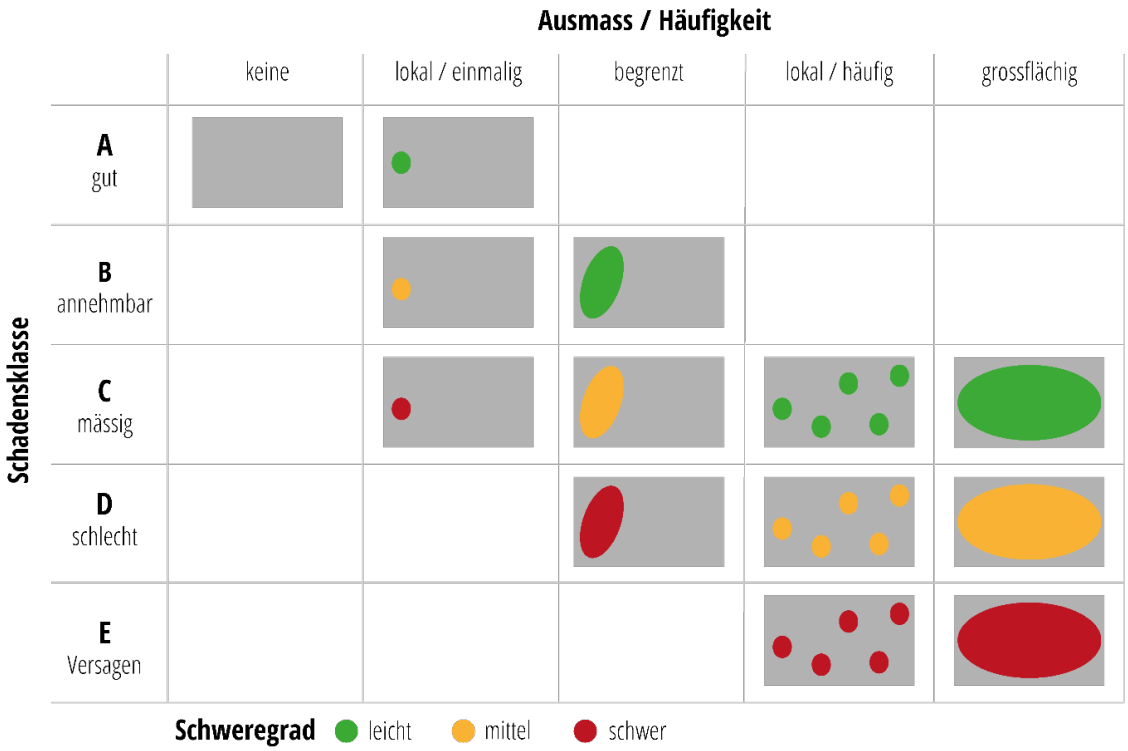

Abbildung 3. Illustration der Schadensklasse

Untersuchung	Feststellung	Korrektur
Karbonatisierung des Betons	Karbonatisierungstiefe grösser als die Überdeckung der Bewehrungsstäbe	Reduziere die Schadensklasse um 1 Stufe
Korrosion der Bewehrung	Verlust des Bewehrungsquerschnitts bis zu 10%	Maximale Schadensklasse = C (Mässig)
	Verlust des Bewehrungsquerschnitts zwischen 10% und 40%	Maximale Schadensklasse = D (Schlecht)
	Verlust des Bewehrungsquerschnitts von mehr als 40%	Maximale Schadensklasse = E (Versagen)
Alkali-Kieselsäure-Reaktion		

Tabelle 2. Korrektur der Schadensklasse nach weiteren Untersuchungen

2.4 Nutzungsklasse

Für die Beurteilung der Wiederverwendbarkeit wird die Beanspruchung eines Bauteils dadurch definiert, wie es im Empfängerbauwerk verwendet wird, resp. verwendet werden könnte, und nicht dadurch, wie es derzeit im Spenderbauwerk genutzt wird. Die Nutzungsklasse eines Bauteils hängt von der Stabilität in seiner neuen Verwendung ab - definiert in Tabelle 3 - sowie von der Wasserexposition, die die Dauerhaftigkeit beeinflusst (siehe Tabelle 4). Sobald die Stabilitäts- und die Expositionsklasse festgelegt sind, kann die Nutzungsklasse definiert werden, wie in Tabelle 5 beschrieben.

Stabilitätsklasse	Konsequenz des Versagens	Konsequenzen für
Keine Stabilitätskriterien	Begrenzt	Gebrauchstauglichkeit
Selbsttragend	Mässig	Strukturelle Sicherheit oder Gebrauchstauglichkeit
Stabil bei externer Beanspruchung	Hoch	Strukturelle Sicherheit und Gebrauchstauglichkeit

↑ Downcycling

Tabelle 3. Definition der Stabilitätsklasse (angepasst von Bertola und Brühwiler [6])

Wasserexposition		Expositionsklasse nach SIA 262 [19]	Expositionsbedingungen
Leicht exponiert	Immer trocken	X0, XC1	Innenbauteil eines Gebäudes mit geringer Luftfeuchtigkeit, das weder Frost noch Streusalz, Meersalz usw. ausgesetzt ist.
Mässig exponiert	Mässig feucht	XC3, XD1, XD3, XF1, XF2	Innenbereich eines Gebäudes mit hoher Luftfeuchtigkeit, vor Regen geschützte Aussenflächen, Oberflächen, die Frost oder Salznebel ausgesetzt sind usw.
Stark exponiert	Abwechselnd nass und trocken	XC2, XC4, XD2a, XD2b, XF3, XF4	Oberflächen, die Regen ausgesetzt oder über längere Zeit nass sind, Oberflächen, die Streusalz und Frost ausgesetzt sind.

Tabelle 4. Definition der Expositionsklasse

Nutzungsklasse	Leicht exponiert	Mässig exponiert	Stark exponiert
Keine Stabilitätskriterien	I	II	III
Selbsttragend	II	III	IV
Stabil bei externer Beanspruchung	III	IV	V

Tabelle 5. Zuordnung der Nutzungsklasse aufgrund der Stabilitäts- und der Expositionsklasse

2.5 Massnahmenklasse

Bauliche Massnahmen an den Bauteilen sind möglich und wirken sich über die Schadens- und Nutzungsklasse auf deren Wiederverwendungspotenzial aus. Die Festlegung der erforderlichen Massnahmen an den Bauteilen ist jedoch nicht das Ziel der Beurteilung der Wiederverwendbarkeit und der Bestandsanalyse, da dies während der Entwurfsphase des Empfängerprojekts erfolgen sollte. Das bedeutet, dass Entscheidungen über das Ausmass der Massnahmen an den wiederverwendeten Bauteilen auf alle anderen Entscheidungen und Gegebenheiten des Projekts abgestimmt werden müssen. Es ist jedoch hilfreich zu verstehen, dass verschiedene Arten von Massnahmen durchgeführt werden können, was zu den in Tabelle 6 aufgeführten Massnahmenklassen führt. Die Massnahmenklasse beschreibt die Schritte, die am Bauteil vorgenommen werden können, um es zu verändern, instand zu setzen oder zu ertüchtigen.

Massnahmenklasse	Bauliche Massnahmen	Änderungen der Geometrie
a	Keine	Kein weiteres Schneiden nach der Demontage
b	Vorbeugender Unterhalt, leichte Verstärkung	Einfaches Schneiden
c	Kurativer Unterhalt, Sanierung, mittlere bis grosse Verstärkung	Komplexes Schneiden oder Anpassen

Tabelle 6. Massnahmenklasse

Es muss sichergestellt werden, dass die Massnahmen aus wirtschaftlicher und ökologischer Sicht verhältnismässig bleiben. Die wirtschaftliche Verhältnismässigkeit besteht in einem Vergleich der Kosten und des Nutzens (Risikominderung), die die Massnahmen verursachen. Dieses Prinzip wird bereits bei der Instandhaltung bestehender Bauwerke angewandt, wie in der Schweizer Norm SIA 269 beschrieben [20], insbesondere im Bereich der Erdbebenertüchtigung [21]. Die ökologische Verhältnismässigkeit besteht darin, die Umweltauswirkungen (d.h. in $kgCO_2$-Äquivalent) der Massnahme mit der Herstellung des Bauteils aus neuem Stahlbeton zu vergleichen. Wenn die Auswirkungen der Massnahme höher sind, ist diese nicht verhältnismässig. Wenn die Massnahme aus wirtschaftlicher oder ökologischer Sicht unverhältnismässig ist, sollte die Wiederverwendung des Stahlbetonbauteils überdacht oder in Frage gestellt werden.

2.6 Wiederverwendbarkeitsgrad

Die Beurteilung der Wiederverwendbarkeit eines Stahlbetonbauteils hängt von der Schadensklasse, der Nutzungsklasse und der Massnahmenklasse ab, wie in den vorangegangenen Abschnitten definiert, und resultiert in einem Wiederverwendbarkeitsgrad. Tabelle 7 beschreibt die verschiedenen Grade der Wiederverwendbarkeit. Das Diagramm in Abbildung 4 soll Ingenieuren während des Entwurfsprozesses helfen, den besten Wiederverwendbarkeitsgrad für ein Bauteil entsprechend der Kombination der drei Kriterien festzulegen. Das Diagramm in Abbildung 4 ist ein Werkzeug und erfordert die Auslegung und ein gutes Urteilsvermögen von Ingenieuren, um richtig interpretiert und genutzt zu werden. Es gibt keine eindeutige Lösung vor, sondern leitet die Ingenieure zu einer objektiven, verhältnismässigen und projektspezifischen Analyse der Situation an mit dem Ziel das Downcycling der bestehenden Stahlbetonbauteile so lange wie möglich hinauszuzögern.

Wiederverwendbarkeitsgrad	Wiederverwendbarkeit	Beschreibung
1	Wiederverwendbar	Das Bauteil kann als so gut wie neu betrachtet werden. Die Kontrolle des Bauteils im Empfängerbauwerk sollte sich nicht vom Standardverfahren bei einem Neubau unterscheiden.
2	Wiederverwendbar mit gelegentlichen Kontrollen	Das Bauteil kann wiederverwendet werden. Dennoch können einige kleine Schäden oder Unregelmässigkeiten die Dauerhaftigkeit des Bauteils beeinträchtigen. Das Bauteil sollte gelegentlich geprüft werden, wobei der Schwerpunkt auf der Kontrolle der Entwicklung dieser bereits vorhandenen Schäden und Unregelmässigkeiten liegt. Um die Gebrauchstauglichkeit und die Tragsicherheit nicht zu beeinträchtigen, sind möglicherweise frühere Massnahmen erforderlich als bei einem konventionellen Neubau.
3	Wiederverwendung fraglich	Die Wiederverwendung des Bauteils ist fraglich, da das Beherrschen des Degradationsprozesses nicht garantiert werden kann. Es ist nicht ausgeschlossen, dass sich der Zustand des Bauteils verschlechtert, was sich auf die Gebrauchstauglichkeit und die strukturelle Sicherheit auswirkt. Eine Verringerung der Tragfähigkeit des Bauteils muss berücksichtigt werden (z.B. aufgrund der Abnahme des Bewehrungsquerschnitts infolge von Korrosion). Das Bauteil muss regelmässig und sorgfältig kontrolliert werden, wenn es wiederverwendet wird. Die Kosten und der Energieaufwand, die für die Wiederverwendung eines solchen Bauteils erforderlich sind, machen diese Strategie fragwürdig.
4	Wiederverwendung nicht empfohlen	Das Bauteil weist Schäden auf, die seine Tragfähigkeit beeinträchtigen. Die Schäden sind schwer zu beherrschen und der Tragwiderstand des Bauteils ist stark reduziert. Selbst regelmässige Kontrollen dürften nicht ausreichen, um die strukturelle Sicherheit des Bauteils zu gewährleisten. Eine Wiederverwendung des Bauteils wird nicht empfohlen.
5	Nicht wiederverwendbar	Das Bauteil weist Schäden auf, die seine Tragsicherheit stark beeinträchtigen. Es kann unter keinen Umständen wiederverwendet werden.

Tabelle 7. Definition des Wiederverwendbarkeitsgrades

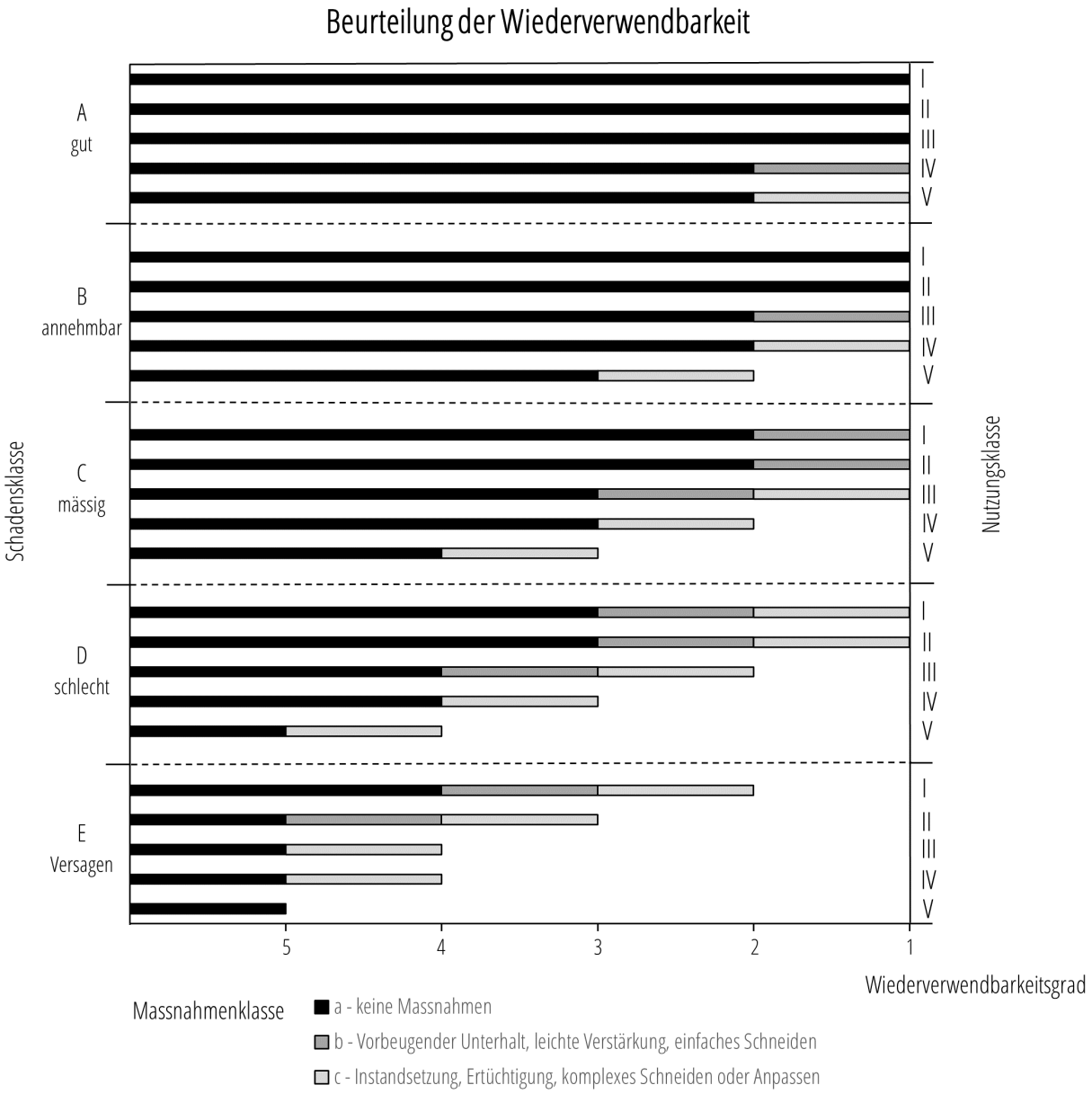

Abbildung 4. Beurteilung der Wiederverwendbarkeit

Abbildung 4 zeigt, dass ein Bauteil der Schadensklasse A so gut ist wie neu und für jede Nutzungsklasse wiederverwendet werden kann (siehe Tabelle 5). Für die höheren Nutzungsklassen IV und V, wenn das Bauteil unter äusseren Beanspruchungen auch Wasser ausgesetzt sein könnte, kann eine vorbeugende Instandhaltung, Anpassung oder sogar Verstärkung (Massnahmenklasse b oder c) erforderlich sein, um den Wiederverwendungsgrad 1 zu erreichen. Die meisten für die Wiederverwendung verfügbaren Bauteile wurden nämlich nach früheren Normen bemessen und durch die Anpassung wird sichergestellt, dass das Bauteil den heutigen Standards für Betonkonstruktionen entspricht. Beispielsweise könnte es erforderlich sein, die Betonüberdeckung zu erhöhen oder eine Biegeverstärkung vorzunehmen.

Mit zunehmendem Grad der Beschädigung (Schadensklassen B und C) ist immer eine Anpassung der Bauteile erforderlich, um für eine Nutzungsklasse, die entweder äussere Beanspruchungen oder Wasserexposition beinhaltet (Klasse III oder höher), einen Wiederverwendungsgrad von 1 zu erreichen. Im Falle einer Schadensklasse D oder E ist es fast unmöglich einen Wiederverwendungsgrad von 1 zu erreichen und die Wiederverwendung solcher Bauteile ohne grössere Anpassungen ist fraglich oder wird nicht empfohlen. Aus diesem Grund werden Bauteile, die in diese Schadensklassen fallen, in den meisten Fällen von der Wiederverwendung ausgeschlossen.

Abbildung 5 zeigt das Beispiel eines Fassadenelements, um zu veranschaulichen, wie die Methodik zur Beurteilung der Wiederverwendbarkeit angewendet werden kann, um die Möglichkeiten für eine zukünftige Wiederverwendung in einem neuen Empfängerbauwerk einzuschätzen. Dieses Fassadenelement weist zwei kleine lokale Zonen mit Betonabplatzungen und einen örtlich korrodierten Bewehrungsstab auf - die **Schadensklasse ist C** (mässiger Zustand). Es werden zwei Varianten der Wiederverwendung untersucht. Für jede von ihnen ändert die gewählte Massnahmenklasse den Wiederverwendbarkeitsgrad, was Hinweise darauf gibt, wie sinnvoll die jeweiligen Planungsentscheidungen sind.

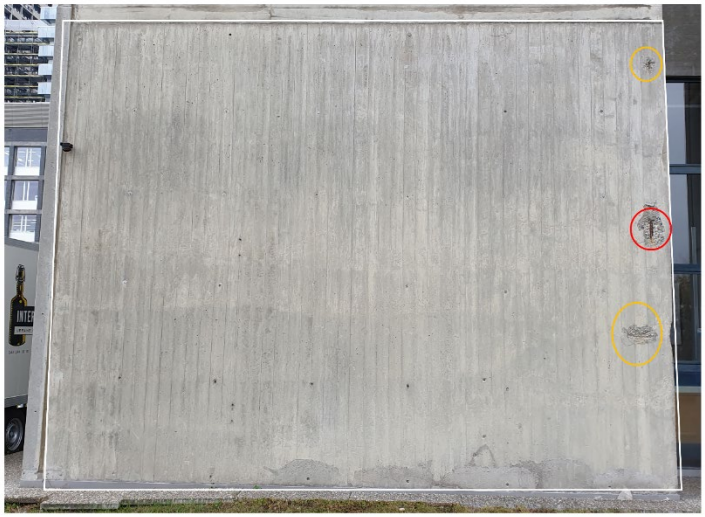

Abbildung 5. Beispiel für die Beurteilung der Wiederverwendbarkeit einer Betonfassadenplatte

1. Die Platte wird für dieselbe Funktion wiederverwendet, nämlich als Fassadenelement. Sie muss daher selbsttragend sein und wird dem Regen ausgesetzt sein. Die **Nutzungsklasse ist IV**.
    - > **Massnahmenklasse a**: Wenn kein Unterhalt oder Anpassungen der Platte geplant sind, liegt ihr **Wiederverwendbarkeitsgrad bei 3.** Ihre Wiederverwendung ist fraglich, da sie eine regelmässige und sorgfältige Kontrolle erfordert, die bei einem Neubau nicht erwünscht sein könnte.
    - > **Massnahmenklasse c**: Mit einigen Sanierungs- und Ertüchtigungsmassnahmen liegt der **Wiederverwendbarkeitsgrad bei 2**, was bedeutet, dass das Bauteil wiederverwendet werden kann, aber regelmässiger kontrolliert werden sollte als ein neues Bauwerk. In diesem Fall könnten die Massnahmen darin bestehen, den beschädigten Bereich mit einem Schnitt vollständig zu entfernen oder durch das Auftragen von Mörtel die Überdeckung der Bewehrungsstäbe zu erhöhen.
2. Die Platte wird als Belag für einen Aussenparkplatz wiederverwendet. Es gibt also keine Stabilitätskriterien, aber sie wird in hohem Masse Wasser und Streusalz ausgesetzt sein. Die **Nutzungsklasse ist III**.
    - > **Massnahmenklasse a**: Wenn kein Unterhalt oder Anpassungen der Platte geplant sind, liegt ihr **Wiederverwendbarkeitsgrad bei 3**. Ihre Wiederverwendung ist fraglich, da sie eine regelmässige und sorgfältige Kontrolle erfordert, die bei einem Neubau nicht erwünscht sein könnte.
    - > **Massnahmenklasse b**: Mit einem gewissen vorbeugenden Unterhalt oder Anpassungen, um die beschädigten Teile zu reparieren oder zu entfernen, liegt der **Wiederverwendbarkeitsgrad bei 2**, was bedeutet, dass das Bauteil wiederverwendet werden kann, aber regelmässiger kontrolliert werden sollte als ein neues Bauwerk. In diesem Fall könnten die Massnahmen darin bestehen, die korrodierten Bewehrungsstäbe zu behandeln und Reparaturmörtel auf die beschädigten Bereiche aufzutragen, jedoch ohne grössere geometrische Anpassungen.
    - > **Massnahmenklasse c**: Mit einigen Sanierungs- und Verstärkungsmassnahmen liegt der **Wiederverwendbarkeitsgrad bei 1**, was bedeutet, dass das Bauteil ebenso gut ist wie ein Neues. In diesem Fall könnten die Massnahmen darin bestehen, den beschädigten Bereich mit einem Schnitt vollständig zu entfernen oder durch das Auftragen von Mörtel die Überdeckung der Bewehrungsstäbe zu erhöhen.

Nach den obigen Ausführungen ist das Bauteil von Abbildung 5 am besten für eine Nutzungsklasse von III oder niedriger geeignet. Um einen Wiederverwendbarkeitsgrad von 1 oder 2 zu erreichen, sollte es angepasst werden, indem die beschädigten Bereiche repariert oder entfernt werden.

3 Verfahren für die Bestandsanalyse

3.1 Präambel

Die Bestandsanalyse eines obsoleten Gebäudes soll quantitative und qualitative Informationen über den Bestand der Stahlbetonbauteile liefern, die für eine Wiederverwendung zur Verfügung stehen. Es gibt Verfahren für die Bestandsanalyse zur Wiederverwendung - z.B. die vom europäischen Projekt FCRBE vorgeschlagenen Methoden [22] - aber nur sehr wenige davon werden speziell auf tragende Bauteile angewandt und keines davon auf Stahlbetonbauteile.

Im folgenden Abschnitt wird ein Verfahren zur Bestandsaufnahme und Auswertung eines Stahlbetontragwerks vorgeschlagen. Zunächst werden die vorhandenen Daten über das Spendergebäude gesammelt. Diese Informationen ermöglichen die Planung der verschiedenen Schritte der Bestandsanalyse, die in dem Flussdiagramm in Abbildung 6 dargestellt und in den Abschnitten 3.2 bis 3.8 erklärt werden. Dieses Verfahren enthält alle Informationen, die für die Beurteilung der Wiederverwendbarkeit benötigt werden, die in Abschnitt 2 vorgestellt wurde. Die gesammelten Informationen werden in einem Bericht zusammengefasst, der Datenblätter für jeden Bauteiltyp enthält (siehe Abschnitt 4).

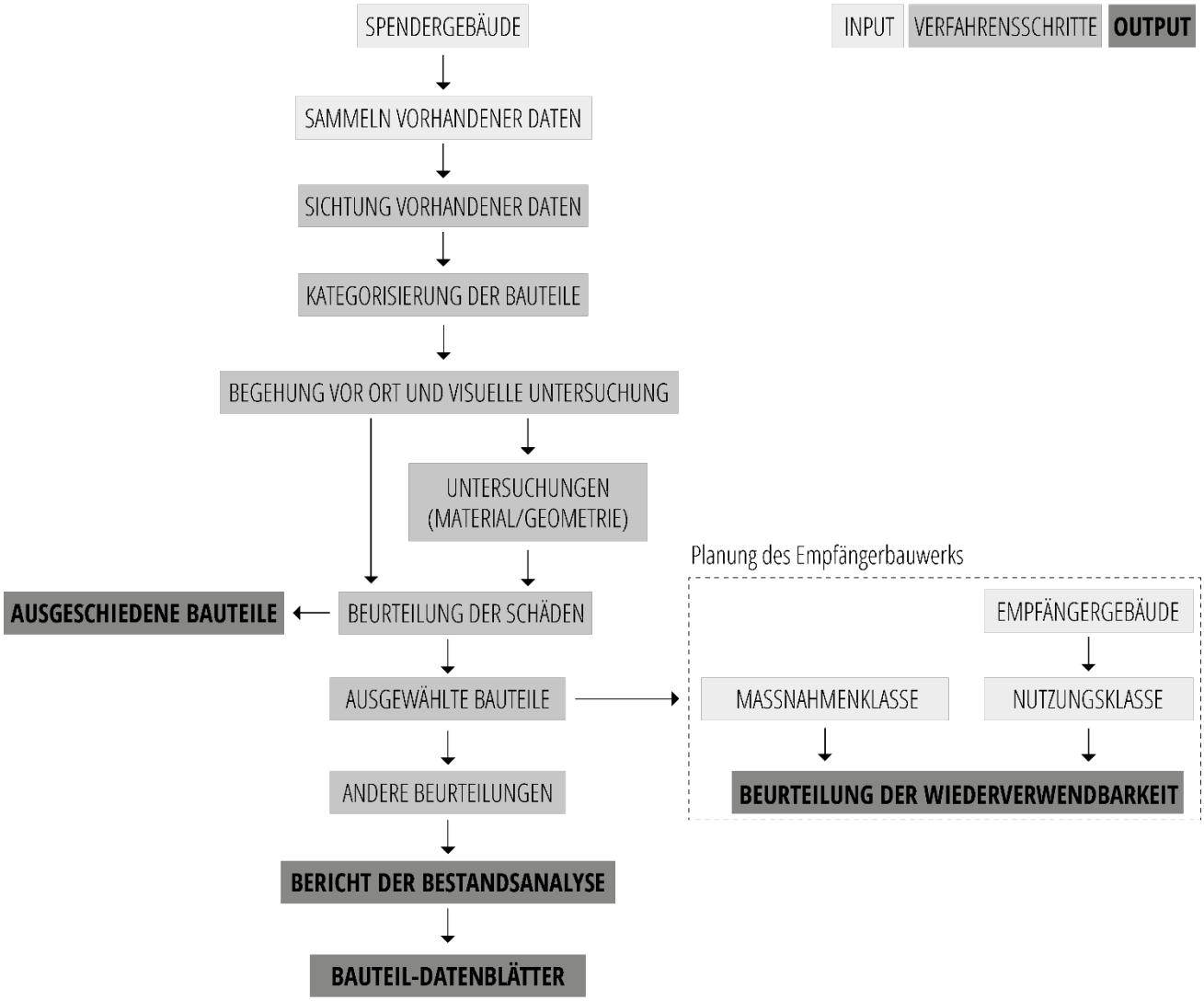

Abbildung 6. Flussdiagramm zur Beschreibung des Verfahrens für die Bestandsanalyse

3.2 Sichtung der vorhandenen Daten

Die Sichtung der vorhandenen Daten ist der allererste Schritt noch vor der Begehung vor Ort. Dabei werden grundlegende Daten über das Gebäude und sein Tragwerk erfasst – beispielsweise Standort, Baujahr, Nutzung, Abmessungen, statisches System, Materialeigenschaften usw. Zudem wird festgestellt, welche Informationen noch fehlen und in den nächsten Schritten des Verfahrens gesammelt werden müssen. Dokumente wie Bau- und Renovierungspläne, Pläne von Architekten und Ingenieuren sowie technische Berichte werden gesammelt und analysiert.

Vorhandene Baupläne enthalten Informationen über die Abmessungen der tragenden Bauteile in Form von Grundrissen, Schnitten und Ansichten. Die Anordnung der Stahlbewehrung und die Materialeigenschaften (Beton- und Stahlsorten) finden sich auf technischen Zeichnungen.

Der Gebäudeschadstoff-Bericht ist ein wichtiges Dokument für die Planung des Rückbaus sowie der künftigen Wiederverwendung von Bauteilen und muss von Experten in einer frühen Phase des Projekts erstellt werden. Darin wird das mögliche Vorkommen von toxischen Substanzen wie Asbest, PAK (polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe), PCB (polychlorierte Biphenyle) etc. untersucht. Das Vorhandensein dieser Stoffe schränkt das Wiederverwendungspotenzial der Betonbauteile ein und hat Auswirkungen auf den Rückbau und die Vorbereitungsarbeiten der Elemente.

Alle anderen vorhandenen Dokumente über das Gebäude und sein Tragwerk (z.B. Umbaupläne, Machbarkeitsstudien für den Rückbau usw.) können interessante Informationen enthalten und müssen, falls vorhanden, geprüft werden. Um die Daten über das Gebäude zu vervollständigen, wird auch in öffentlichen Archiven nachgeforscht und die Besonderheiten des Gebäudes werden in der wissenschaftlichen und technischen Literatur recherchiert. Vor allem Informationen über Bautechniken und Tragsysteme finden sich in archivierten historischen Fachpublikationen.

3.3 Kategorisierung der Bauteile

Anhand der vorhandenen Baupläne werden die Bauteile inventarisiert und in Kategorien und Typen eingeteilt, um die Analyse zu vereinfachen. Die Hauptkategorien beziehen sich auf ihre statische Funktion: (1) Fassaden, (2) Deckenplatten, (3) Wände, (4) Balken, (5) Stützen, (6) Treppenhäuser usw. Dann werden Bauteile mit denselben Merkmalen (z.B. Materialtyp, Bauweise oder Verbindungen) in Typen unterteilt mit Untertypen für jede vorhandene Abmessung. Diese Kategorien, Typen und Untertypen werden verwendet, um das genaue Inventar des untersuchten Tragwerks zu erstellen.

3.4 Begehungen vor Ort und visuelle Untersuchung

Nach der Kategorisierung der Bauteile wird eine Besichtigung vor Ort durchgeführt, die die folgenden Ziele verfolgt:

- Überprüfen, ob die gesammelten Informationen aus den vorhandenen Dokumenten mit dem übereinstimmen, was gebaut wurde;
- Visuelle Untersuchung der tragenden Bauteile, um Schäden (Abschnitt 3.5), Ästhetik (Abschnitt 3.8.1) und Zugänglichkeit (Abschnitt 3.8.2) zu erfassen;
- Ausschliessen der Bauteiltypen mit geringem Wiederverwendungspotenzial aufgrund einer Schadensklasse D oder E (schlechter Zustand oder Versagen, siehe Abschnitt 2.3).
- Festlegen des Orts für zerstörende Untersuchungen (Abschnitt 3.7.1);
- Durchführung von zerstörungsfreien Untersuchungen (Abschnitt 3.7.2);

3.5 Beurteilung der Schäden

Die Schadensbeurteilung erfolgt nach dem Vorgehen, das in Abschnitt 2.3 beschrieben wird. Die Schadensklasse wird für jeden Bauteiltyp durch visuelle Beurteilungen bestimmt und nach den Untersuchungen, die in Abschnitt 3.6 und 3.7 beschrieben werden, gegebenenfalls korrigiert.

Die Beurteilung wird für jeden Bauteiltyp vorgenommen. Wenn alle Bauteile eines Typs sichtbar und für die Inspektion zugänglich sind, wird jedes Bauteil einzeln eingestuft und die jeweiligen Anteile der Schadensklassen für diesen Bauteiltyp werden ermittelt. Andernfalls wird für den Typ auf der Grundlage lokaler Inspektionen eine einzige Note vergeben.

Bauteiltypen mit einem hohen Anteil der Schadensklasse D oder E (schlechter Zustand oder Versagen) werden ausgeschieden und bei der Bestandsanalyse nicht weiter berücksichtigt. Dadurch wird überflüssige Arbeit an Bauteilen vermieden, bei denen kaum die Chance besteht sie in ihrem ursprünglichen Zustand wiederverwenden zu können.

3.6 Untersuchungen zur Geometrie

Wenn die Daten unzureichend sind (nicht verfügbare oder unvollständige Pläne), wird die Geometrie des Bauwerks vor Ort vermessen. Je nach Umfang der Informationen können verschiedene Methoden verwendet werden, wie z.B.:

- manuelle Messungen mit Linealen und Massbändern;
- Bohrungen, um die Dicke der Deckschicht und der Deckenplatte zu überprüfen;
- Entfernen des Deckbetons zur Überprüfung der Bewehrungsführung oder der Anschlussdetails;
- Punktuelle Vermessungen mit einer Totalstation;
- 3D-Scans mit einem LiDAR-Scanner oder Fotogrammetrie.

Punktuelle Vermessungen und 3D-Scans können auch dazu verwendet werden vorhandene Durchbiegungen von Bauteilen zu überprüfen, wenn die visuelle Betrachtung ergibt, dass diese ausserhalb des Standardbereichs liegen könnten.

3.7 Materialuntersuchungen

3.7.1 Zerstörende Untersuchungen

Mit zerstörenden Untersuchungen lassen sich die Materialeigenschaften sowie der Zustand des Bewehrungsstahls und des Betons überprüfen. Die Anzahl der zerstörenden Untersuchungen wird vorzugsweise auf ein Minimum beschränkt, da sie kostspielig sind und die Bauteile beschädigen. Die Art und Anzahl der Tests hängen von der Menge der bereits vorhandenen Informationen und der festgestellten Schäden ab. Die Ergebnisse werden zur Kalibrierung umfangreicherer zerstörungsfreier Tests verwendet (siehe Absatz 3.7.2). Im Folgenden findet sich eine nicht erschöpfende Liste von Untersuchungsmethoden und Tests zur Beurteilung der Eigenschaften und des Zustands eines Betontragwerks.

Bewehrungsstäbe

Für die Freilegung der Bewehrungsstäbe wird der Deckbeton mechanisch entfernt, um eine Öffnung zu schaffen. Eine solche Öffnung ermöglicht es, an einer bestimmten Stelle des Betontragwerks die Dicke der Überdeckung, die Anordnung sowie den Durchmesser der Bewehrungsstäbe festzustellen und sie auf Stahlkorrosion zu überprüfen. Sie ermöglicht auch die Entnahme von Proben aus den Bewehrungsstäben. Diese Proben werden dann auf Zug getestet, um ihre Fliessgrenze und die maximale Festigkeit zu ermitteln. Die Ergebnisse werden dann analysiert, um den aktualisierten charakteristischen Wert der Fliessgrenze gemäss der Norm SIA 269/2 für bestehende Stahlbetonbauwerke zu bestimmen [23]. Die Datenbank Steeldata der EMPA [24] kann auch die Identifizierung des Stahltyps und der Stahleigenschaften aufgrund visueller Untersuchungen in einer Öffnung ermöglichen, wodurch die Notwendigkeit von Probenahmen und Tests entfällt.

Beton

Der Beton wird durch die Entnahme von Bohrkernen beprobt, die für verschiedene Arten von Untersuchungen verwendet werden. Es wird empfohlen, für jede Art der Untersuchung und für jeden vermuteten Betontyp des Bauwerks mindestens drei Bohrkerne zu entnehmen. Um einen Betontyp korrekt zu identifizieren, werden im Minimum die folgenden Parameter ausgewertet:

- Betondichte, indem das Volumen und die Masse der entnommenen Kerne gemessen werden;
- Druckfestigkeit des Betons, wie in der Norm SN EN 12504-1 beschrieben [25] zur Berechnung des aktualisierten charakteristischen Wertes für die Bemessung nach der Norm SIA 269/2 für bestehende Betonbauwerke [23];

› Elastizitätsmodul des Betons, wie in der Norm SN EN 12390-13 beschrieben [26];
› Karbonatisierungstiefe, gemessen mit Phenolphthalein an der Bruchfläche der für die Druckfestigkeitsprüfungen verwendeten Bohrkerne gemäss der Norm SN EN 14630 [27].

Wenn das Betonbauteil auffällige Rissmuster aufweist, wie in Abschnitt 2.2.4 beschrieben, werden das Vorhandensein und gegebenenfalls der Fortschritt der Alkali-Kieselsäure-Reaktion durch Rasterelektronenmikroskopie (REM) an Lamellen überprüft, die aus einem Kern herausgeschnitten wurden. Das Vorkommen und die Konzentration von Chloriden im Beton werden bei Bauwerken überprüft, die Streusalzen ausgesetzt waren oder am Meer liegen. Die Messung erfolgt in verschiedenen Tiefen eines Bohrkerns gemäss der Norm SN EN 14629 [28].

3.7.2 Zerstörungsfreie Untersuchungen

Bei Bedarf werden zerstörungsfreie Untersuchungen durchgeführt, um die mit zerstörenden Tests ermittelten Daten zu vervollständigen und die Konstanz der Materialeigenschaften über grössere Flächen zu überprüfen, ohne die Bauteile weiter zu beschädigen. Die Ergebnisse der zerstörenden Untersuchungen werden zur Kalibrierung der zerstörungsfreien Tests verwendet. Nachfolgend findet sich eine nicht erschöpfende Liste von zerstörungsfreien Untersuchungsmethoden und Tests, mit denen die Eigenschaften und der Zustand eines Betontragwerks beurteilt werden können.

Bewehrungsstäbe

Die Lage der Bewehrungsstäbe kann mit einem Ferroscan oder einem Georadar (GPR) ermittelt werden. Der Ferroscan schätzt auch den Durchmesser der Bewehrung. Diese Messungen werden durch Messungen in der Nähe der zerstörenden Öffnungen kalibriert. Die Fliessgrenze der Bewehrungsstäbe kann anhand des Baujahres des Gebäudes und der damals geltenden Normen abgeschätzt werden.

Beton

Eine bekannte Methode zur Schätzung der Druckfestigkeit von Beton ist der Rückprallhammer (Abbildung 7). Mit Federn und einer gleitenden mechanischen Masse misst der Rückprallhammer das Verhältnis zwischen der kinetischen Energie der Masse vor und nach dem Aufprall, die dann mit der Druckfestigkeit des Betonbauteils korreliert wird [29]. Es handelt sich im Grunde um ein Gerät zur Prüfung der Oberflächenhärte und die Ergebnisse werden durch die Karbonatisierung beeinflusst [30]. Aus diesem Grund wird eine erste Serie von Messungen des Rückprallhammers vor Ort mit den Ergebnissen der Drucktests an den entnommenen Bohrkernen korreliert. Sobald die Korrelation hergestellt ist, wird der Rückprallhammer an verschiedenen Stellen eingesetzt, um die Betonfestigkeit zu bestätigen. Die Messergebnisse werden analysiert wie die Untersuchungsergebnisse der Bohrkerne, wobei der Mittelwert und die Standardabweichung verwendet werden, um den charakteristischen Wert der Druckfestigkeit zu ermitteln, wie in der Norm SIA 269/2 für bestehende Betonbauwerke beschrieben [23].

GPR-Messungen ermöglichen die Überprüfung der Feuchtigkeit sowie der Chloridkonzentration im Beton. Sie zeigen auch das Vorhandensein von Hohlräumen, Rissen oder anderen Schäden [18].

Abbildung 7. Zerstörungsfreie Untersuchungen: (a) Schmidt-Rückprallhammer; (b) Georadar.

3.8 Andere Beurteilungen der Bauteile

3.8.1 Ästhetik

Die Ästhetik der Bauteile wird hauptsächlich durch die Farbe und die Beschaffenheit der Betonoberfläche aufgrund einer visuellen Beurteilung bestimmt. Die Farbe der Bauteile wird mit einer Nummer der RAL-Farbkarte abgeglichen. Da die Farbe nicht notwendigerweise auf der gesamten Oberfläche gleichmässig ist, wird die nächstliegende RAL-Farbe gewählt. Informationen über Schattierungen oder Tönungen (z.B. gelbe oder blaue Tönung) werden ebenfalls im Datenblatt festgehalten. Die Struktur der Betonoberfläche hängt von der Art der beim Bau verwendeten Schalung ab, die Muster oder Spuren auf der Oberfläche hinterlässt. Diese Beobachtung wird direkt an den Bauteilen gemacht, wenn deren Oberfläche sichtbar ist. Wenn die Betonoberfläche nicht sichtbar ist, werden Informationen über die Deckschichten, wie z.B. Bodenbeläge oder Anstriche, festgehalten.

3.8.2 Zugänglichkeit

Die Zugänglichkeit charakterisiert, wie einfach und schnell das Bauteil während des Rückbaus des Gebäudes demontiert werden kann, und wird gemäss den folgenden vier Stufen beurteilt:

- einfach, wenn keine anderen Bauteile vor dem betreffenden Bauteil demontiert werden;
- mittel, wenn eines oder zwei andere Bauteile vorher rückgebaut werden, um die Demontage des betreffenden Bauteils zu ermöglichen;
- schwierig, wenn drei oder mehr Bauteile vorher rückgebaut werden, um die Demontage des betreffenden Bauteils zu ermöglichen;
- sehr schwierig, wenn das gesamte Gebäude vorher rückgebaut wird.

3.8.3 Querschnittswiderstand

Der Querschnittsbiegewiderstand des Bauteils wird anhand von Standardmodellen für Stahlbeton-Querschnitte geschätzt. Dieser Wert kann in der Vorbemessung eines Empfängerbauwerks verwendet werden und sollte in späteren Phasen des Planungsprozesses entsprechend den gewählten Randbedingungen - z.B. einfach gestützte oder durchlaufende Systeme - weiter bestätigt werden.

3.8.4 Volumenmässige Signifikanz

Die volumenmässige Signifikanz ist der Volumen-Anteil $V_{Bauteil}$, den der betrachtete Bauteiltyp am gesamten Betonvolumen des Gebäudes, $V_{Gebäude}$, darstellt. Diese Zahl zeigt die Bedeutung eines Bauteils im Verhältnis zum gesamten Tragwerk und hilft bei der Auswahl der Bauteile, die in der Wiederverwendungsstrategie Vorrang haben müssen, um das Materialvolumen zu maximieren, das vor der Entsorgung bewahrt werden kann.

$$Volumen - Signifikanz\ (\%) = \frac{V_{Bauteil}}{V_{Gebäude}} \qquad (1)$$

3.8.5 Umweltauswirkungen

Die Umweltauswirkungen aufgrund des Herstellungsprozesses der Bauteile sowie ihres anschliessenden Abbruchs und ihrer Entsorgung werden durch Treibhausgasemissionen (in $kgCO_{2eq}$) oder den Primärenergiebedarf (in $kWh_{oil\text{-}eq}$) ausgedrückt. Diese Indikatoren werden anhand des Gewichts der Bauteile und der in der schweizerischen KBOB-Datenbank verfügbaren Äquivalenzfaktoren berechnet [31]. Die zur Berechnung dieser Indikatoren getroffenen Annahmen werden im Bericht der Bestandsanalyse beschrieben. Wie bei der volumenmässigen Signifikanz ermöglicht die Berechnung der Umweltauswirkungen der Bauteile die Identifizierung jener Elemente, die in der Wiederverwendungsstrategie priorisiert werden müssen, um die Emissionen und den Energiebedarf deutlich zu reduzieren.

4 Bericht

4.1 Präambel

Der Bericht zur Bestandsanalyse fasst alle Informationen zusammen, die im Rahmen des in Kapitel 3 beschriebenen Vorgehens ermittelt wurden. Diese Informationen werden benötigt, um den Rückbau eines Spenderbauwerks aus Stahlbeton zu planen und ein Konzept für die künftige Wiederverwendung seiner Bauteile zu erarbeiten. Das Wiederverwendungspotenzial kann dann mit den in Kapitel 2 beschriebenen Methoden beurteilt werden.

Der Bericht besteht aus den folgenden Teilen:

1. Einleitung: Grundlegende Informationen über das Gebäude wie Standort, Baujahr, Nutzung und grundlegendes statisches System.
2. Dokumentation der Bestandsanalyse, einschliesslich einer kurzen Beschreibung der Methoden und der erzielten Ergebnisse (Abschnitt 4.2)
3. Zusammenfassende Tabellen der ausgeschiedenen und ausgewählten Bauteile (Abschnitt 4.3)
4. Datenblätter für jeden Bauteiltyp, die alle nützlichen Informationen zusammenfassen (Abschnitt 4.4 und Anhang B)

Anhang A enthält eine Checkliste mit allen Informationen, die in einem Bericht zur Bestandsanalyse eines Stahlbetonbauwerks erwartet werden. Sie kann verwendet werden, um die Qualität eines Berichts zu beurteilen.

4.2 Bericht zur Bestandsanalyse

Tabelle 8 fasst die Informationen zusammen, die in dem Bericht über die Bestandsanalyse gemäss der in Abschnitt 3 beschriebenen Schritte aufgeführt sein sollten.

Schritt	Informationen, die in dem Bericht enthalten sein sollten
Sichtung der vorhandenen Daten	Die verfügbaren Dokumente sind in dem Bericht aufgelistet. Alle relevanten Informationen, die in den vorhandenen Dokumenten gefunden wurden, sind in dem Bericht zusammengefasst.
Kategorisierung der Bauteile	Eine Abbildung, die die Lage der Bauteiltypen zeigt. Alle Kategorien, Typen und Untertypen von Bauteilen werden beschrieben und in einer zusammenfassenden Tabelle dargestellt (Abschnitt 4.3).
Begehungen vor Ort und visuelle Untersuchung	Das Datum/die Daten der Begehung und der Name der anwesenden Person(en) werden in dem Bericht erwähnt. Eine kurze Beschreibung der wichtigsten Beobachtungen und der durchgeführten Arbeiten ist ebenfalls enthalten.
Beurteilung der Schäden	Die an den ausgeschiedenen Bauteilen beobachteten Schäden werden mit Fotos dokumentiert. Der Zustand der ausgewählten Bauteile wird in der Übersichtstabelle und in den Datenblättern dargestellt.
Untersuchungen zur Geometrie	Die Messungen werden auf einem Grundriss des untersuchten Gebäudes verortet. Alle Messergebnisse werden in dem Bericht aufgeführt.
Zerstörende Untersuchungen der Materialien	Die Proben werden auf einem Grundriss des untersuchten Gebäudes verortet. Alle Testergebnisse sind in dem Bericht aufgeführt.
Zerstörungsfreie Untersuchungen der Materialien	Die Untersuchungszonen werden auf einem Grundriss des untersuchten Gebäudes verortet. Alle Testergebnisse sind in dem Bericht aufgeführt.
Beurteilung der Ästhetik	Die Farbe und die Oberflächenstruktur werden auf dem Datenblatt des Bauteiltyps mit der nächstgelegenen Nummer der RAL-Farbkarte beschrieben.
Beurteilung der Zugänglichkeit	Der Grad der Zugänglichkeit wird im Datenblatt des Bauteiltyps festgehalten.
Querschnittswiderstand	Die Werte für jeden Bauteiluntertyp sollten im Datenblatt angegeben werden.
Volumenmässige Signifikanz	Die Signifikanzwerte für die einzelnen Bauteiluntertypen werden in der Übersichtstabelle und im Datenblatt angegeben.
Umweltauswirkungen	Die zur Berechnung der Umweltauswirkungen getroffenen Annahmen werden ebenso angegeben wie die Verweise auf die KBOB-Datenbank [31]. Das Ergebnis für jeden Bauteiluntertyp sollte im Datenblatt enthalten sein.

Tabelle 8. Bericht über Bestandsanalyse

4.3 Zusammenfassende Tabelle

4.3.1 Ausgeschiedene Bauteile

Nach der Begehung vor Ort, der visuellen Untersuchung und der Schadensbeurteilung werden Bauteiltypen mit geringem Wiederverwendungspotenzial aufgrund einer Schadensklasse D oder E (schlechter Zustand oder Versagen) ausgeschieden. Die aussortierten Bauteiltypen werden in einer speziellen Übersichtstabelle aufgeführt, die folgende Informationen enthält: Name des Bauteiltyps, Schadensklasse, Abmessungen, Menge (in m^2 oder Stückzahl), Gesamtfläche und -volumen, volumenmässige Signifikanz. Fotos der aussortierten Bauteile, die die Schäden aufzeigen, sind ebenfalls enthalten.

4.3.2 Ausgewählte Bauteile

Alle Bauteile, die genauer beurteilt werden, werden in einer Übersichtstabelle aufgelistet und inventarisiert. Zu jedem in dieser Übersichtstabelle aufgeführten Bauteile gibt es ein Datenblatt mit allen relevanten und detaillierten Informationen (siehe Abschnitt 4.4). Die folgenden Informationen sollten angegeben werden: Kategorie, Typennummer und -name, Anteile der Schadensklassen, Untertypen, Abmessungen, Menge (in m^2 oder Stückzahl), Gesamtfläche und -volumen, volumenmässige Signifikanz.

4.4 Bauteil-Datenblätter

Für jeden ausgewählten Bauteiltyp werden in einem detaillierten Datenblatt alle relevanten Informationen gesammelt:

- Pläne und Fotos zur Lokalisierung des Bauteiltyps im Tragwerk;
- Fotos des Bauteils;
- Detaillierte Fotos der Farbe und Oberfläche des Bauteiltyps;
- Pläne mit den wichtigsten Abmessungen des häufigsten Untertyps, einschliesslich des Querschnitts;
- Tabelle mit Informationen über das Baujahr, die Materialien, die Funktion und den Standort, die Zugänglichkeit, die Verbindungen, die Farbe, die Oberfläche, die Deckschichten usw.;
- Zustands- und Dauerhaftigkeitstabelle mit den Anteilen der Schadensklassen und anderen Informationen zur Dauerhaftigkeit;
- Tabelle der mechanischen Merkmale mit Materialeigenschaften;
- Inventar der Untertypen mit ihren genauen Abmessungen, dem Querschnittswiderstand, der Menge, der volumenmässigen Signifikanz, den Umweltauswirkungen usw.;
- zusätzliche Hinweise und zu beachtende Punkte.

Eine Vorlage für die Datenblätter findet sich im Anhang 1.

5 Fazit

Das vorliegende Dokument beschreibt eine Methodik zur Beurteilung der Wiederverwendbarkeit und ein Verfahren für die Bestandsanalyse eines demnächst rückzubauenden Stahlbetonbaus. Es beschreibt auch den Aufbau und den Inhalt des Berichts und der Datenblätter, die für die Zusammenfassung aller durch die Bestandsanalyse gesammelten Informationen benötigt werden.

Die Beurteilung der Wiederverwendbarkeit eines Stahlbetonbauteils basiert auf der Schadens-, der Nutzungs- und der Massnahmenklasse. Es handelt sich dabei um ein Werkzeug, das den Planern hilft, die verschiedenen Wiederverwendungsoptionen für ein Bauteil zu analysieren. Die Schadensbewertung wird vor dem Rückbau des Spendergebäudes durchgeführt und ist ein Schritt des Verfahrens der Bestandsanalyse. Die Nutzungsklasse – die die Beanspruchung des Bauteils beschreibt - und die Massnahmenklasse - die die Ertüchtigungsmassnahmen und Anpassungen des Bauteils beschreibt - hängen vom Bau des Empfängergebäudes ab. Sobald die Schäden, die Nutzung und die Massnahmen eines Bauteils klassifiziert wurden, erhält man den Wiederverwendbarkeitsgrad, der eine Empfehlung für die Wiederverwendung und die damit verbundene Kontrolle im Empfängergebäude darstellt. Diese Methodik zur Beurteilung der Wiederverwendbarkeit soll die Subjektivität der Bewertung des Wiederverwendungspotenzials von Stahlbetonbauteilen verringern.

Das Verfahren für die Bestandsanalyse stellt die Schritte zur Sammlung quantitativer und qualitativer Informationen über den Bestand an wiederverwendbaren Stahlbetonbauteilen vor. Dabei werden alle technischen Informationen über einen Stahlbeton-Bauteiltyp gesammelt und in einem Datenblatt zusammengefasst, das später bei der Bemessung eines Empfängertragwerks verwendet werden kann.

Die hier beschriebenen Methoden und Verfahren ermöglichen die Planung des Rückbaus eines obsoleten Stahlbetonbaus mit Verfahren, die anschliessend die Wiederverwendung der Bauteile mit dem grössten Potenzial begünstigen. Sie liefern auch die Informationen für die Vorbemessung eines Empfängerbauwerks. In späteren Entwurfsphasen können zusätzliche Untersuchungen am Bestand erforderlich sein.

6 Referenzen

1. Bundesamt für Umwelt BAFU. Treibhausgasemissionen der Industrie [Internet]. 2022 [zitiert 25. Oktober 2022]. Verfügbar unter: https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/zustand/daten/treibhausgasinventar/industrie.html

2. Wüest&Partner. Bauabfälle in der Schweiz - Hochbau. Studie 2015. Swiss Federal Office for the Environment (FOEN); 2015.

3. Knoeri C, Sanyé-Mengual E, Althaus HJ. Comparative LCA of recycled and conventional concrete for structural applications. Int J Life Cycle Assess. 1. Juni 2013;18(5):909–18.

4. Pellegrino C, Pipinato A, Modena C. A simplified management procedure for bridge network maintenance. Structure and Infrastructure Engineering. 2011;7(5):341.

5. Schellenberg K, Vogel T, Chèvre M, Alvarez M. Assessment of Bridges on the Swiss National Roads. Structural Engineering International. 1. November 2013;23(4):402–10.

6. Bertola NJ, Brühwiler E. Risk-based methodology to assess bridge condition based on visual inspection. Structure and Infrastructure Engineering. 3. August 2021;0(0):1–14.

7. Ellingwood BR. Risk-informed condition assessment of civil infrastructure: state of practice and research issues. Structure and Infrastructure Engineering. 1. März 2005;1(1):7–18.

8. Hallermann N, Morgenthal G. Visual inspection strategies for large bridges using Unmanned Aerial Vehicles (UAV). In 2014.

9. Seo J, Duque L, Wacker J. Drone-enabled bridge inspection methodology and application. Automation in Construction. Oktober 2018;94:112–26.

10. Falorca JF, Miraldes JPND, Lanzinha JCG. New trends in visual inspection of buildings and structures: Study for the use of drones. Open Engineering. 18. Mai 2021;11(1):734–43.

11. Omer M, Margetts L, Mosleh MH, Cunningham LS. Inspection of Concrete Bridge Structures: Case Study Comparing Conventional Techniques with a Virtual Reality Approach. Journal of Bridge Engineering. 1. Oktober 2021;26(10):05021010.

12. Piras MV, Mistretta F, Fadda ML, Deias L. A Reliable Visual Inspection Method for Vulnerability Assessment of Hyperstatic Structures Using Fuzzy Logic Analysis. Journal of Construction Engineering. 4. August 2015;2015:e171989.

13. Campbell LE, Connor RJ, Whitehead JM, Washer GA. Human factors affecting visual inspection of fatigue cracking in steel bridges. Structure and Infrastructure Engineering. 2. November 2021;17(11):1447–58.

14. Bennetts J, Webb G, Denton S, Vardanega PJ, Loudon N. Quantifying Uncertainty in Visual Inspection Data. Maintenance, Safety, Risk, Management and Life-Cycle Performance of Bridges. 2018;2252.

15. ASTRA 62016. KUBA 5.1 - Guide pour les inspecteurs d'ouvrages d'art [Internet]. OFROU; 2021. Verfügbar unter: https://www.astra.admin.ch/dam/astra/fr/dokumente/standards_fuer_nationalstrassen/kuba_51_leitfaden_fuer_inspektoren_von_kunstbauten.pdf.download.pdf/astra%2062016f.pdf

16. Gattulli V, Chiaramonte L. Condition Assessment by Visual Inspection for a Bridge Management System. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2005;20(2):95–107.

17. Roelfstra G, Hajdin R, Adey B, Brühwiler E. Condition Evolution in Bridge Management Systems and Corrosion-Induced Deterioration. Journal of Bridge Engineering. 1. Mai 2004;9(3):268–77.

18. Wai-Lok Lai W, Dérobert X, Annan P. A review of Ground Penetrating Radar application in civil engineering: A 30-year journey from Locating and Testing to Imaging and Diagnosis. NDT & E International. 1. Juni 2018;96:58–78.

19. SIA. Swiss Standard SIA 262:2013 - Concrete structures. SIA - Schweizerischer ingenieur und architektenverein; 2013.

20. SIA. Swiss Standard SIA 269:2011 - Existing structures - Basis. SIA - Schweizerischer ingenieur und architektenverein; 2011.

21. SIA. Swiss Standard SIA 269/8:2017 - Maintenance des structures porteuses - Séismes. SIA - Schweizerischer ingenieur und architektenverein; 2017.

22. FCRBE Interreg. A guide to inventoy the reuse potential of construction products before demolition. 2020.

23. SIA. SIA 269/2 - Erhaltung von Tragwerken - Betonbau. SIA - Schweizerischer ingenieur- und architektenverein; 2011 S. 44.

24. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt EMPA, Hochschule für technik Rapperswil HSR. Stahldatenbank [Internet]. [zitiert 15. November 2021]. Verfügbar unter: http://www.steeldata.ch/

25. CEN. SN EN 12504-1 - Testing concrete in structures - Part 1: Cored specimens - Taking, examining and testing in compression. European Committee for Standradization; 2009.

26. CEN. SN EN 12390-13 - Testing hardened conrete - Part 13: Determination of secant modulus of elasticity in compression. European Committee for Standartization; 2013.

27. CEN. SN EN 14630 - Products and systems for the protection of concrete structures - Test methods - Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method. European Committee for Standradization; 2006.

28. CEN. SN EN 14629 - Products and systems for the protection and repair - Test methods - Determination of chloride content in hardened concrete. European Committee for Standradization; 2007.

29. Kumavat HR, Chandak NR, Patil IT. Factors influencing the performance of rebound hammer used for non-destructive testing of concrete members: A review. Case Studies in Construction Materials. Juni 2021;14:e00491.

30. Crawford GI. Guide to nondestructive testing of concrete [Internet]. Federal Highway Administration; 1997. Report No.: HWA-SA-97-105. Verfügbar unter: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/43757

31. Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren KBOB. Ökobilanzdaten im Baubereich 2009/1:2016 [Internet]. 2016 [zitiert 3. November 2021]. Verfügbar unter: https://www.kbob.admin.ch/kbob/de/home/themen-leistungen/nachhaltiges-bauen/oekobilanzdaten_baubereich.html

Anhang 1 - Checkliste

EPFL ENAC IA SXL
Smart living lab - HBL
Passage du Cardinal 13b
CH – 1700 Fribourg

Julie Devènes
Maléna Bastien-Masse
Corentin Fivet

julie.devenes@epfl.ch
malena.bastien-masse@epfl.ch
corentin.fivet@epfl.ch
sxl.epfl.ch

Datum
Version 1.0

Checkliste - Name des Berichtverfassers

Beschreibung:

1. Einleitung

Erfüllt?

- **Allgemeine Informationen über den Bericht**
  - Geeigneter Titel — KO
  - Zielsetzung des Berichts — KO
  - Elemente, die ausserhalb des Geltungsbereichs liegen — KO

- **Allgemeine Informationen über das Gebäude**
  - Lage des Gebäudes — KO
  - Baudatum — KO
  - Statisches System des Gebäudes — KO
  - Materialien — KO
  - Nutzung des Gebäudes — KO
  - Gründe für den Rückbau — KO

Kommentare:

2.1 Sichtung der vorhandenen Daten

Alle relevanten Informationen, die sich in den verfügbaren Dokumenten finden lassen, sollten in dem Bericht zusammengefasst werden.

- **Vorhandene Pläne**
  - Schalungspläne vom Bau des Gebäudes — KO
  - Bewehrungspläne vom Bau des Gebäudes — KO

- Alle anderen bestehenden Pläne — KO

- **Bericht zur Schadstoffdiagnose**
  - Vorhandensein von Schadstoffen in den Betonbauteilen — KO
  - Vorhandensein von Schadstoffen in den Fugen zwischen den Betonbauteilen — KO
  - Vorhandensein von Schadstoffen in den nichttragenden Bauteilen — KO

- **Alle anderen vorhandenen Dokumente** — KO

Kommentare:

2.2 Kategorisierung der Bauteile

Die Lage der Bauteiltypen sollte auf einer Abbildung dargestellt sein. Alle Bauteilkategorien, -typen und -untertypen sollten beschrieben und in einer zusammenfassenden Tabelle aufgeführt werden. — KO

- **Bauteil-Kategorien**
  - Definieren der wichtigsten Kategorien von Bauteilen — KO

- **Bauteil-Typen**
  - Für jede Kategorie, definieren von Typen, die ähnliche Merkmale aufweisen. — KO

- **Bauteil-Untertypen**
  - Für jeden Typ, gruppieren nach Untertypen mit gleicher Geometrie. — KO

Kommentare:

2.3 Begehung vor Ort und visuelle Untersuchung

Das Datum der Begehung und der Name der anwesenden Person(en) sollten in dem Bericht festgehalten werden. Eine kurze Beschreibung der Begehung, die Beobachtungen und die durchgeführten Arbeiten sind in dem Bericht aufzuführen. — KO

- **Untersuchungen**
  - Festlegen der Orte für zerstörende Untersuchungen — KO
  - Durchführen von zerstörungsfreien Untersuchungen — KO

- **Visuelle Inspektion**
  - Bestimmen des Zustands der Bauteile — KO
  - Identifizieren der für die Wiederverwendung ungeeigneten Bauteile — KO

- Bestimmen der Farbe und Oberfläche der Bauteile — KO

Datenerfassung

- Sammeln aller fehlenden Informationen (Abmessungen, Belag, etc.) — KO
- Ausreichend Fotos von jedem Bauteiltyp aufnehmen — KO

Kommentare:

2.4 Materialuntersuchungen

Zerstörende Untersuchungen

Der Ort der Probenahme sollte auf einem Grundriss des analysierten Gebäudes angegeben sein. Alle Ergebnisse der Tests sollten in dem Bericht klar wiedergegeben werden. — KO

Stahlbewehrung

- Öffnungen in der Betondecke, um die Bewehrungsanordnung zu überprüfen — KO
- Zugversuche an entnommenen Bewehrungsstabproben — KO

Beton

- Dichte — KO
- Karbonatisierungstiefe — KO
- Prüfung der Druckfestigkeit — KO
- Prüfung des Elastizitätsmoduls — KO
- Andere erforderliche Tests (z.B. Alkali-Kieselsäure-Reaktion, Chloridgehalt) — KO

Zerstörungsfreie Untersuchungen (optional)

Der Ort der Tests muss beschrieben oder auf einem Grundriss dargestellt werden. Alle Ergebnisse sollten in dem Bericht wiedergegeben und interpretiert werden. — KO

Kommentare:

2.5 Beurteilung der Bauteile

Einstufung des Zustands — KO

Ästhetik

- Abgleichen der Farbe der Bauteile mit der RAL-Farbkarte — KO
- Bestimmen der Oberflächenbeschaffenheit — KO

Zugänglichkeit

- Definieren der Zugänglichkeit jedes Bauteiltyps — KO

Querschnittswiderstand

- Bestimmen des in den Betonbauteilen vorhandenen Bewehrungsstahls — KO
- Berechnung des Querschnittswiderstands — KO

- **Dauerhaftigkeit**
  - Karbonatisierungstiefe im Vergleich zur Bewehrungsüberdeckung — KO

- **Signifikanz**
  - Berechnung der Signifikanz der Bauteiluntertypen — KO

- **Umweltauswirkungen**
  - Schätzung des Treibhauspotenzials des Bauteiluntertyps — KO

Kommentare:

2.6 Zusammenfassende Tabelle

- **Ausgeschiedene Bauteile**
  - Auswahl von Fotos — KO
  - Zusammenfassende Tabelle — KO

- **Ausgewählte Bauteile**
  - Name — KO
  - Zustand — KO
  - Beschreibung — KO
  - Abmessungen — KO
  - Menge — KO
  - Fläche — KO
  - Volumen — KO
  - Signifikanz — KO
  - Zusammenfassende Tabelle

Kommentare:

2.7 Bauteil-Datenblatt

Alle Felder des Datenblatts sollten ausgefüllt sein. — KO

- **Für jeden Bauteiltyp**
  - Plan und Foto der Lage des Bauteiltyps — KO
  - Foto des Bauteiltyps — KO

▪ Detailfotos von der Farbe und der Oberfläche des Bauteiltyps	KO
▪ Pläne mit den Hauptabmessungen des häufigsten Untertyps	KO
▪ Beschreibung (Exposition, ursprüngliche Funktion, Standort usw.)	KO
▪ Informationen über Zustand und Dauerhaftigkeit	KO
▪ Informationen über die mechanischen Eigenschaften	KO
▪ Inventar (Abmessungen, Querschnittswiderstand, Menge, Signifikanz usw.)	KO
▪ Zusätzliche Informationen	KO

Kommentare:

Fazit:

Anhang 2 - Vorlage für Datenblätter

Typ: Typennummer **Kategorie:** Name der Kategorie

Name

Standort

Abbildung

Name des Typs

Allgemeine Fotos

Farbe und Oberfläche

Detailfotos

Verbindungen

Abbildungen und Detailfotos

Typ: Typennummer Kategorie: Name der Kategorie

Name

Untertyp Nr. , Abmessungen 1:

Abbildung

Untertyp Nr. , Querschnitt 1 :

Abbildung

Typ: Typennummer Kategorie: Name der Kategorie

Name

Beschreibung

Baujahr	
Material	
Anfänglicher Standort	
Anfängliche Funktion	
Zugänglichkeit	
Verankerungspunkte	
Exposition	
Farbe	
Oberfläche	

Beschichtung	Typ	Fixierung	Dicke

Verbindungsart	
Werkzeuge für Rückbau	

Zustand und Dauerhaftigkeit

Schadensklasse	
Karbonatisierungstiefe [mm]	
Schadstoffe	

Mechanische Eigenschaften

Betondichte (ρ_c)	
Druckfestigkeit des Betons (f_{ck})	
Elastizitätsmodul des Betons (E_{cm})	
Zugfestigkeit der Bewehrung (f_{sk})	
Elastizitätsmodul der Bewehrung (E_s)	

Bauteil	Geometrie			Bestandsaufnahme					Umweltauswirkungen			
Untertyp	Abmessungen (B x L x H) [mm]	Bewehrung [mm]	Querschnittswiderstand [kNm]	Anzahl [Stk.]	Gewicht [kg/Stk]	Gesamtfläche [m²]	Gesamtvolumen [m³]	Signifikanz	Ursprüngliche Produktion	Konventioneller Abriss	Ursprüngliche Produktion	Konventioneller Abriss
									[kgCO2-eq/Stk]		[kWh Öl-Äq/Stk]	

Zusätzliche Hinweise

Bemerkungen zur Methodik	
Zu beachten vor Wiederverwendung	