

Mitteilungen des
fkks Fachverband Kathodischer
Korrosionsschutz e. V.

1/2025

fkks Fachverband Kathodischer Korrosionsschutz e.V., 2025

Postfach 100 102, D-73701 Esslingen

Telefon: +49 (0)711 919 927 20

eMail: geschaeftsstelle@fkks.de

URL <http://www.fkks.de>

Alle Rechte vorbehalten

Vergleichende Ökobilanzierung zwischen Instandsetzung mittels Betonaustausch und Instandsetzung mittels Kathodischen Korrosionsschutzes

Masterarbeit von Paul Steinmetz

Parkbauten in Stahlbetonbauweise werden aufgrund von Schäden durch Umwelteinflüsse häufig aufwendig instandgesetzt. Diese Studie bewertet die Umweltbelastung einer Tiefgarageninstandsetzung infolge eines kritischen Chloridgehalts im Vergleich der Instandsetzungsvarianten vollflächiger Betonaustausch und Kathodischer Korrosionsschutz (KKS) nach Technischer Regel Instandhaltung (TR-IH) anhand eines Fallbeispiels. Die Ergebnisse zeigen, dass die KKS-Variante im Vergleich zum Betonaustausch weniger als die Hälfte der Umweltbelastungen verursacht. Dabei werden die einzelnen Komponenten der KKS-Anlage (Titanbandanoden, Verschaltungssystem, usw.) in einem hohem Detailgrad durch einen Austausch mit Herstellern betrachtet. Zu den emissionsintensiven Prozessen gehören das Oberflächenbeschichtungssystem, sowie die Titanbandanoden. Der Strombedarf basiert auf tatsächlichen Verbrauchsmengen aus einer Auswertung der Fallstudie und spielt in der Betrachtung der Umweltemissionen eine untergeordnete Rolle. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass durch den Einsatz des KKS-Systems die Umweltbelastungen in der Bauwerksinstandsetzung deutlich reduziert werden können.

Keywords: Ökobilanzierung, Instandsetzung, Chloridbelastung, Kathodischer Korrosionsschutz, Betonaustausch, Parkbauten, Nachhaltigkeit

Problemstellung

Bauwerke sind über die gesamte Lebensdauer Witterungseinflüssen ausgesetzt. In der EU wird daher zukünftig eine steigende Nachfrage an Instandsetzungsmaßnahmen von Betonbauwerken erwartet [1]. Insbesondere Tiefgaragen und Parkhäuser werden durch den Einfluss von Tausalzen, die durch parkende Autos eingeschleppt werden, stark belastet. Langfristig dringen diese Chloride bei günstigen Bedingungen in das Bauteilinnere

ein und sorgen für eine Depassivierung des Stahls mit der Folge der Korrosion. Als Konsequenz entsteht nahezu immer ein Bedarf für Instandsetzungsmaßnahmen im Lebenszyklus [2]. Der KKS (Verfahren 10.1 nach TR-IH) stellt bei chloridbelasteten Beton-Bauwerken eine wirksame Instandsetzungsvariante dar. Hierbei wird die Korrosion der Bewehrung auf ein vernachlässigbares Maß reduziert, indem ein Fremdstrom über eine installierte Anode in die Bewehrung des Bauwerkes eingebracht wird, sodass die

Bewehrung fortlaufend als Kathode agiert. Neben dem KKS stellt der Austausch des mit Chlorid belasteten Betons (Verfahren 7.2 nach TR-IH) das gängigste Instandsetzungsverfahren dar. Bisher erfolgt die Auswahl des Instandsetzungsverfahrens häufig auf Basis technischer Erfordernisse und der Anfangsinvestitionen, während Umweltaspekte weitgehend unberücksichtigt bleiben [3]. Außerdem existieren derzeit keine Zertifizierungssysteme, die ökologische Faktoren aus Instandsetzungen von Parkbauten bilanzieren. Es ist daher wenig überraschend, dass nur wenige Studien die Umweltbelastungen durch die Instandsetzung von Parkbauten untersucht haben und darüber hinaus zu widersprüchlichen Ergebnissen kommen. Diese Studie zielt darauf ab, in Zusammenarbeit mit Herstellern eine detaillierte Datengrundlage der Umweltbelastungen für das Instandsetzungsverfahren KKS anhand eines Fallbeispiels zu schaffen, um die Umweltbelastungen belastbar abbilden zu können. Folgende Fragestellungen sollen in dieser Arbeit beantwortet werden:

Frage 1: Welches der beiden Instandsetzungsverfahren verursacht im betrachteten Fall die geringere Umweltbelastung?

Frage 2: Welche Prozesse sind bei der Instandsetzung mittels KKS in dieser Fallstudie für die Umwelt von Bedeutung?

Frage 3: Ist die aktuelle Datenlage zur Bewertung der Umweltbelastung der Instandsetzung einer Tiefgarage mittels KKS ausreichend?

Fallbeispiel

Die in diesem Fallbeispiel betrachtete Tiefgarage in Leipzig aus 1996 umfasst 1.425 m² Bodenfläche und 125 m² Stützen- und Wandsockelfläche mit 53 Stellplätzen. Ein Gutachten aus dem Jahr 2022 identifizierte eine kritische Chloridbelastung, welche die Dauerhaftigkeit beeinträchtigt. Daher wurde als Maßnahme im Jahr 2023 ein flächiger Kathodischer Korrosionsschutz auf der gesamten Bodenfläche sowie im Stützen- und Sockelbereich bis 50 cm Höhe nach ISO 12696 installiert. Hierfür wurden 8.020 m aktivierte Titanband-

anoden in 13 mm Breite verlegt. Nach der Einbettung erfolgte eine Beschichtung mit einem OS8-System auf der Bodenfläche. Für den Vergleich mit einer Instandsetzung durch Betonaustausch werden Annahmen aus Planunterlagen und ähnlichen Projekten herangezogen. Als Oberflächenschutz wird hier ein OS11a-System verwendet.

Durchführung der Ökobilanzierung

Die Analyse der Umweltbelastungen erfolgt in Anlehnung an die Vorgaben der ISO 14040:2021-02 und der EN 15804:2022-03. Die Durchführung der Ökobilanzierung erfolgt mit der Software SimaPro in Kombination mit der Datenbank ecoinvent in der Version V3.9.1 (Allocation cut-off by classification). Neben dem Umweltindikator Erderwärmungspotenzial (GWP) werden weitere Umweltindikatoren entsprechend des Gewichtungssets nach EF V3.0 ausgewertet. Sofern keine passenden Datensätze vorhanden sind, wird mittels einer wirtschaftlichen Allokation ein Datensatz geschaffen.

Untersuchungsrahmen

Als funktionelle Einheit wird die gesamte Bodenplatte sowie sämtliche Stützen- und Sockelbereiche definiert und ein Betrachtungszeitraum von 50 Jahren festgelegt. Es werden die Herstellungs- und Nutzungsphase betrachtet, während die Entsorgungsphase nicht einbezogen wird.

Sachbilanz

Für die Titananodenbänder wird auf ein Produkt des italienischen Herstellers Chemical Newtech SPA gesetzt. Das Rein-Titan wird aus Ost-Asien bezogen und über Land- und Seetransport nach Italien geliefert. Die Weiterverarbeitung umfasst das Schneiden, die Gittererzeugung und die Oxidbeschichtung. Für die Beschichtung werden Platingruppemetalle wie Ruthenium und Iridium verwendet. Die fertigen Anoden werden als Spulen verpackt über den Landweg zur Baustelle transportiert. Eine allgemeine Infrastruktur und Maschinenabnutzung bleiben unberücksichtigt.

Für das Verschaltungs- und Monitoringsystem wird in Zusammenarbeit mit der Firma instakorr GmbH eine Sachbilanz für das Produkt CAB|ONE des Herstellers CORR-NOLOGY GmbH entwickelt. Das System besteht aus Komponenten wie Sensoren, Platinen, Datenspeicherung und Gehäusen. Daten zu den Umweltbelastungen elektronischer Bauteile sind oft unzureichend, da Hersteller wenige produktspezifischen Emissionsdaten bereitstellen. Daher werden eigene Datensätze auf Basis von Materialdatenblättern erstellt. Emissionen aus der Produktion sowie dem Transport können dementsprechend lediglich über Studien abgeschätzt werden (in etwa 110-140 % der Rohstoffbeschaffung) [4]. Die Vorbereitung des Betonuntergrunds erfolgt gemäß der TR-IH. Für den Kathodischen Korrosionsschutz wird das Fräsverfahren in Kombination mit einem Kugelstrahlverfahren angesetzt. Verschleiß des Fräswerkzeugs und Strahlmittelbedarf werden auf Basis von Literaturwerten abgeschätzt. Für den Abtrag des chloridbelasteten Betons wird ein Höchstdruckwasserstrahlen-Verfahren (HDW) angenommen. Weitere Komponenten wie das Oberflächenbeschichtungssystem werden über Materialdatenblätter von Herstellern berücksichtigt. Für den Stromwandler wird eine Typ 2 Umweltkennzeichnung verwendet. Zementhaltige Komponenten wie die Anodeneinbettung können durch Zementmörtel-Datensätze aus ecoinvent dargestellt werden. Für die Baustelleneinrichtung wird weiterhin ein pauschaler Strombedarf sowie zusätzlich für den Betonaustausch Abstützmaßnahmen angesetzt.

Die spezifisch verbaute KKS-Anlage aus dem Fallbeispiel verbraucht jährlich 35 kWh Strom für 1.550 m² Schutzfläche und 183 kWh für Sensoren und Datenmodule. Über den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren erreichen zahlreiche Komponenten das Ende ihres Lebenszyklus und werden ausgetauscht. Für die Abschätzung der Lebensdauer wird Literatur herangezogen, Erfahrungswerte berücksichtigt sowie die angegebene Nutzungsdauer aus Datenblättern von Herstellern angesetzt [5], [6].

Ergebnisse

Frage 1: Im betrachteten Fall führt die Instandsetzung mittels KKS zu einer geringeren Umweltbelastung hinsichtlich des GWP mit 105 t CO₂-eq gegenüber 238 t CO₂-eq. für den Betonaustausch (vgl. *Abb. 1 obere Grafik*). Die Analyse einer gewichteten Zusammenstellung verschiedener Umweltindikatoren zeigt ein ähnliches Ergebnis (vgl. *Abb. 1 untere Grafik*). Der Ressourcenverbrauch von Mineralien und Metallen (ADP-Metalle) hat bei der KKS-Variante ein erhebliches Gewicht, was auf den hohen Bedarf an Edelmetallen und metallischen Verbindungen der Anoden und der elektronischen Komponenten zurückzuführen ist. Der Verbrauch fossiler Brennstoffe (ADP-fossil) spielt für den Betonaustausch eine wesentliche Rolle, insbesondere für die Herstellung des Oberflächenschutzsystems und die Produktion des Zements. Die Emissionen verbunden mit dem Wasserverbrauch (ETP-Trinkwasser, WDP) fallen beim Betonaustausch aufgrund des HDW-Strahlens und der Betonproduktion stärker ins Gewicht.

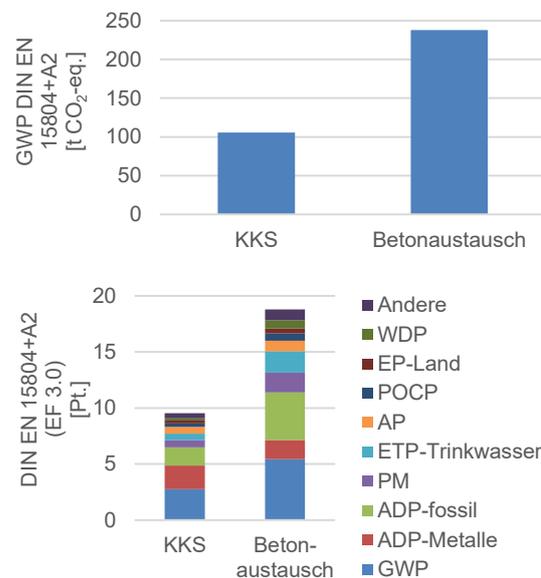


Abb. 1: Vergleich der Umweltbelastungen zwischen KKS und Betonaustausch. Obere Darstellung zeigt gesondert das GWP. Die untere Darstellung zeigt 16 normalisierte und gewichtete Umweltindikatoren nach EN15804+A2 und EF 3.0.

Frage 2: Bei der Instandsetzung mittels KKS sind die Oberflächenbeschichtung mit der

notwendigen Untergrundvorbereitung (52 %) und die Titanbandanoden (18 %) die größten Emittenten bei der Betrachtung des GWP (vgl. Abb. 2). Der hohe Emissionsanteil der Beschichtung resultiert aus der Verwendung von fossilem Epoxidharz und der arbeitsintensiven Untergrundvorbereitung. Die Titanbandanoden haben aufgrund der energieintensiven Titanherstellung und der Beschichtungsapplikation einen bedeutenden Einfluss. Es zeigt sich, dass die Emissionen zu 56 % der Gewinnung von Rein-Titan und 44 % den weiteren Verarbeitungsschritten zuzuordnen sind. Der Stromverbrauch macht mit 5 % über den gesamten Lebenszeitraum einen geringen Anteil an den Gesamtemissionen aus. Gleiches gilt für das Verschaltungssystem.

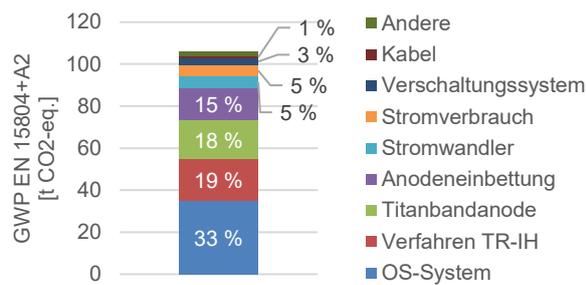


Abb. 2: Emissionsanteile einzelner Komponenten aus der KKS-Instandsetzung über den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren für den Umweltindikator GWP nach DIN EN 15804+A2

Frage 3: Der Austausch mit den Herstellern ermöglicht eine umfassende Offenlegung der Emissionen aus verschiedenen Teilprozessen der KKS-Instandsetzung. Offen bleibt jedoch die genaue Bewertung des Aufwands für die Herstellung des Verschaltungssystems und eine Verifizierung der Annahmen für die Untergrundvorbereitung.

Alternative Szenarien

Alternative Quellen für die Oberflächenbeschichtung als fossilen Epoxidharz wie pflanzliches Lignin können Einsparungen von über 40 % auf das GWP erzielen (vgl. Abb. 3) [7]. Die Forschung hierzu ist allerdings noch in den Anfängen und eine Erprobung als Oberflächenschutzsystem ist

noch nicht erfolgt. Eine Anwendung der Erkenntnisse aus dem Ariadne Report zeigt, dass die Emissionen aus dem Stromverbrauch um knapp 90 % gesenkt werden können, wenn vermehrt auf regenerative Energieträger gesetzt wird [8]. Eine sekundäre Nutzung der Titanbandanoden (Lebensdauer 100 Jahre) durch einen Ausbau aus dem Fallbeispiel nach Ende des Betrachtungszeitraums sorgt für einen verhältnismäßig geringen Emissionsrückgang aufgrund des aufwendigen Ausbauprozesses durch HDW-Strahlen.

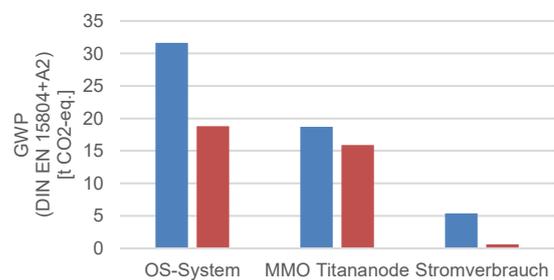


Abb. 3: Sensitivitätsanalyse der emissionsintensivsten Prozesse des KKS-Systems im Vergleich vorher (blau) und nachher (rot) für den Umweltindikator GWP.

Zusammenfassung

Diese Arbeit zeigt quantitativ auf, wie der CO₂-Fußabdruck und andere Umweltparameter durch innovative Lösungen im Bausektor reduziert werden können und ein Beitrag zur Klimaneutralität geleistet werden kann. Diese spezifische Fallstudie stellt dar, dass die Instandsetzung mittels KKS im Hinblick auf das GWP in etwa 44 % der Emissionen im Vergleich zum Betonaustausch verursacht. Der Stromverbrauch aus der Anlage kann durch ein effizientes Verschaltungssystem erhebliche Einsparungen im Vergleich zu anderen Studien bewirken. Die KKS-Instandsetzung weist jedoch signifikante Umweltbelastungen durch den hohen Ressourcenverbrauch an Edelmetallen auf. Emissionstreiber sind die Oberflächenbeschichtung mit der Untergrundvorbereitung und die Titananoden. Die Analyse verschiedener Szenarien zeigt darüber hinaus weitere Optimierungspotenziale auf.

Literaturverzeichnis

Im Text zitierte Quellen:

- [1]: Renne N., et al., „Sustainable Assessment of Concrete Repairs through LCA and LCCA“, Sep. 2022.
- [2]: Sodeikat C. und Mayer T. F., „Instandsetzung von Tiefgaragen und Parkhäusern“, 2018.
- [3]: Schubert M., et al., „Untersuchungen zu Herstellungs- und Instandhaltungskosten von unterschiedlichen Konzepten zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit von Parkbauten“, Sep. 2016.
- [4]: Boyd S. B., „Life-Cycle Assessment of Semiconductors“, 2012.
- [5]: Dauberschmidt C. und Stengel T., „Ökobilanzierung von Instandsetzungsvarianten nach TR-IH in Abhängigkeit vom Schädigungsgrad“, Okt. 2024.
- [6]: Polder R. B., et al., „Service life and life cycle cost modelling of cathodic protection systems for concrete structures“, März 2014.
- [7]: Juhl M., et al., „Assessing the Environmental Sustainability of Lignin-Based Epoxy Resins for Coating Production“, März 2024.
- [8]: Luderer G., et al., „Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 - Szenarien und Pfade im Modellvergleich“, 2021

Für die Arbeit vordergründig verwendete Quellen:

1. Sodeikat C. und Mayer T. F., „Instandsetzung von Tiefgaragen und Parkhäusern“, 2018.
2. DIN EN ISO 14040:2021-02, Umweltmanagement, Ökobilanz, Grundsätze und Rahmenbedingungen.
3. DIN EN 15804/A2:2022-03, Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen.
4. DIBt [Hrsg.], Technische Regel Instandhaltung von Betonbauwerken, Mai 2020.
5. Dauberschmidt C. und Stengel T., „Ökobilanzierung von Instandsetzungsvarianten nach TR-IH in Abhängigkeit vom Schädigungsgrad“, Okt. 2024.

Betreuer

Die Arbeit wurde am Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen der technischen Universität München angefertigt. Betreuer dieser Arbeit sind Juan Mauricio Valcarcel Lozano (TUM), Dr. Till Felix Mayer (Ingenieurbüro Schießl Gehlen Sodeikat GmbH) und Armin Faulhaber (instakorr GmbH).

Darüber hinaus wurde diese Arbeit vom fkks Fachverband Kathodischer Korrosionsschutz e.V. unterstützt.