

Korrosionsbedingte Kosten an Ingenieurbauwerken im Schweizer Straßennetz

Journal Article**Author(s):**

Yilmaz, Deniz ; Angst, Ueli 

Publication date:

2020-06

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000415895>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

Originally published in:

Beton- und Stahlbetonbau 115(6), <https://doi.org/10.1002/best.202000004>

Korrosionsbedingte Kosten an Ingenieurbauwerken im Schweizer Straßennetz

Dies ist die angenommene Version des folgenden Artikels:

Yilmaz, D.; Angst, U. (2020) Korrosionsbedingte Kosten an Ingenieurbauwerken im Schweizer Straßennetz. Beton- und Stahlbetonbau., die in endgültiger Form veröffentlicht wurde unter <https://doi.org/10.1002/best.202000004>.

Deniz Yilmaz
ETH Zürich
Institut für Baustoffe
Stefano-Francini-Platz 3
8093 Zürich
Schweiz
yilmaz@ifb.baug.ethz.ch

Prof. Dr. Ueli Angst
ETH Zürich
Institut für Baustoffe
Stefano-Francini-Platz 3
8093 Zürich
Schweiz
ueli.angst@ifb.baug.ethz.ch

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	2
1 Einleitung	3
2 Konzepte zur Bestimmung der Kosten der Korrosion	3
3 Methodik	4
3.1 Korrosionsbedingte Kosten an Ingenieurbauwerken	4
3.2 Korrosionsbedingte Kosten auf Kantonsebene	5
3.3 Korrosionsbedingte Kosten auf Gemeinde- und Bundesebene	5
3.4 Abgrenzung	5
4 Untersuchte Brückenbauwerke	6
4.1 Überführung Im Bernet	6
4.2 Tössbrücke Schlössli	6
4.3 Kemptbrücke	7
4.4 Brücke Höri	8
5 Ergebnisse	8
5.1 Kostenanteil der Korrosion	8
5.2 Kosten der Korrosion auf Kantonsebene	10
5.3 Kosten der Korrosion auf Gemeinde- und Bundesebene	15
6 Diskussion	16
6.1 Korrosionsbedingte Kosten an Ingenieurbauwerken im Straßennetz der Schweiz .	16
6.2 Ingenieurbauwerke und Korrosion	16
6.3 Künftige Herausforderungen und Lösungsansätze	17
7 Schlussfolgerung	18
Dank	19
Literatur	21

Zusammenfassung

Ein Großteil der Schäden an Ingenieurbauwerken wird durch Korrosion verursacht. In der vorliegenden Arbeit wurden repräsentative Erhaltungsprojekte von Ingenieurbauwerken in der Schweiz detailliert analysiert. In den untersuchten Fällen zeigte sich, dass 56 % der Instandsetzungskosten (± 11 %) direkt durch die Korrosion verursacht werden. Bei Ingenieurbauwerken im Straßennetz der Schweiz liegen die direkt durch Korrosion verursachten Kosten somit schätzungsweise bei 260 bis 510 Mio. CHF pro Jahr, also gegen 1 000 CHF pro Minute. Dies entspricht 0.08 % des Bruttoinlandprodukts. Nebst dem Straßennetz werden Korrosionskosten auch an anderen Ingenieurbauwerken erwartet, etwa an der Bahninfrastruktur, im Energiesektor, oder bei Wohn- und Bürobauten. Diese wurden hier nicht berücksichtigt; ebenso wurden die indirekten Kosten (Staus, Umweltbelastung, etc.) nicht quantifiziert. Die hier ermittelten direkten Kosten der Korrosion an Ingenieurbauwerken im Straßennetz der Schweiz stimmen in der Größenordnung mit den für die USA vorliegenden Daten überein, und können daher möglicherweise auch auf andere industrialisierte Länder angewandt werden. Aufgrund dieser volkswirtschaftlichen Bedeutung ist es zentral, das Korrosionsphänomen bestmöglich unter Kontrolle zu haben. Dies bedingt dringend technologische Innovationen und eine zeitgemäße Ausbildung von Fachkräften im Bauwesen.

Keywords: Kosten, Korrosion, Ingenieurbauwerke, Brücken, Verkehrsinfrastruktur

Corrosion Caused Costs on Civil Engineering Structures of the Swiss Road Networks

The degradation of traffic infrastructure is to a large extent caused by corrosion. For this study, selected representative maintenance projects of Swiss civil engineering structures were analysed in detail. These analyses revealed that on average 56 % of the maintenance costs (± 11 %) are directly related to corrosion. The direct costs of corrosion of civil engineering structures in the Swiss road network amounts to approximately 260-510 million Swiss francs per year, i.e. almost 1 000 Swiss francs per minute. This corresponds to 0.08 % of the GDP. Apart from civil engineering structures of the road network, corrosion also generates costs for other engineering structures, i.e. structures of rail operators, of the energy sector, or residential and office buildings and industrial plants. These structures were here not taken into account. Additionally, indirect costs (traffic jams, environmental pollution, etc.) were here not quantified. The direct costs of corrosion of civil engineering structures of the Swiss road network estimated in this study are in agreement with the available data from the U.S. and therefore might be applied to other industrialised countries.

Keywords: Costs, Corrosion, Civil Engineering Structures, Bridges, Traffic Infrastructure

1 Einleitung

Verschiedene Untersuchungen haben gezeigt, dass die Korrosion eine der Hauptursachen für die Schädigung von Infrastrukturbauwerken ist [1, 2]. Sie führt somit zu direkten Kosten für die Gesellschaft, einer verringerten Verfügbarkeit der Infrastruktur, Umweltbelastungen und – zum Glück nur selten – zu einer Beeinträchtigung der Sicherheit. Frühere Erhebungen haben gezeigt, dass die Korrosion über alle Sektoren hinweg in Industrieländern direkte Kosten in der Höhe von 3-4 % des BIP verursacht [3, 4]. Allein die Kosten die in den USA durch Korrosion an Stahlbetonbauwerken entstehen werden auf 20-40 Mrd. USD jährlich geschätzt [5]. Zum Vergleich: die durch Naturkatastrophen in den USA verursachten Kosten belaufen sich auf etwa 30 Mrd. USD pro Jahr [6]. Trotz vergleichbarer Kosten für die Gesellschaft, wird den Kosten der Korrosion relativ wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Dies kann primär damit erklärt werden, dass es sich bei der Korrosion um langsame Prozesse handelt, die im Allgemeinen zu schleichenden Veränderungen führen und – im Gegensatz zu Naturkatastrophen – nur selten einen disruptiven Charakter aufweisen. In den meisten Fällen führt die Korrosion primär zu Kosten, etwa für präventive Korrosionsschutzmaßnahmen oder Instandsetzungsarbeiten, welche die Gesellschaft zu tragen hat und nur selten transparent aufgeschlüsselt werden.

Während für die USA verhältnismäßig umfangreiche Daten zu den Kosten der Korrosion vorhanden sind (aus den Jahren 1949 [7], 1975 [8], 1998 [3]), ist dies für Europa nicht der Fall. Jedoch wurde der Großteil der Infrastruktur, wie beispielsweise Straßenbrücken – ähnlich wie in den USA [9, 10] – bereits zwischen 1950 und 1990 gebaut [11, 12]. Dementsprechend steht heutzutage in den industrialisierten Ländern in vergleichbarer Weise nicht mehr der Neubau im Vordergrund, sondern vielmehr die Erhaltung des bestehenden Inventars. Dies spiegelt sich auch in deren Bauinvestitionen wider. Beliefen sich die Ausgaben für Unterhalt und Erhaltung in der Schweiz Anfang der 1980er-Jahre auf rund 20 % der Gesamtbauinvestitionen, verdoppelte sich deren Anteil auf etwa 40 % um die Jahrtausendwende [13] und betragen 2018 beim Bundesamt für Strassen (ASTRA) 64 % [14]. Ein entsprechender Trend dürfte sich für alle industrialisierten Länder abzeichnen, in welchen die Ausgaben im Erhaltungsbereich zukünftig weiter steigen dürften [12].

Diese Studie soll dazu beitragen, die Datenlücke zu den korrosionsbedingten Kosten bei Ingenieurbauwerken im Straßennetz für europäische Verhältnisse zu schließen, und damit auf die gesellschaftliche Relevanz der Korrosion von Ingenieurbauwerken aufmerksam machen.

2 Konzepte zur Bestimmung der Kosten der Korrosion

Zur Abschätzung der Kosten der Korrosion wurden in früheren Forschungsprojekten zu dieser Fragestellung verschiedene Ansätze verwendet. Eine umfassende Übersicht und ausführliche Beschreibung der dabei angewendeten Methoden bzw. Modelle und der durchgeführten Forschungsprojekte zwischen 1949 und 2016 findet sich in Referenz [15]. Generell lassen sich vier Konzepte unterscheiden: die Uhlig-Methode [7], die Hoar-Methode [16], das Input-Output-Modell [8] und das Modell der direkten und indirekten Kosten [3]. Die einzelnen Konzepte und durchgeführten Studien variieren dabei vor allem in den erfassten Kosten und dem Umfang der Datenerhebung. Gemeinsamer Ausgangspunkt der verschiedenen Ansätze ist jedoch stets die Vorstellung einer idealen Welt, in der das Phänomen der Korrosion nicht existieren würde. Hierdurch können die Kosten dieser idealisierten Welt mit den tatsächlichen Kosten verglichen werden und die Kosten infolge Korrosion bestimmt werden.

Grundsätzlich stellt sich die Frage der Systemabgrenzung. In der Baubranche heißt dies:

Tabelle 1: Beispiele eindeutig und nicht eindeutig zuordenbarer korrosionsbedingter Kosten.

Eindeutig zuordenbare Kosten	Nicht eindeutig zuordenbare Kosten
<ul style="list-style-type: none"> • Abtrag und Ersatz Beton • Zustandserfassung (Potenzialfeldmessungen, Sondierfenster, Bestimmung Karbonatisierungstiefe etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baustelleneinrichtung • Planerkosten • Signalisation • Verkehrsführung

werden nur direkte Kosten, also durch Korrosion am Bauwerk verursachte Kosten für den Eigentümer, oder auch indirekte Kosten, d.h. Kosten für Dritte infolge von z.B. Nichtverfügbarkeit des Bauwerks, Staus oder Umweltbelastung, berücksichtigt? Es ist ersichtlich, dass hier weder die Systemabgrenzung eindeutig ist noch, dass sämtliche volkswirtschaftlichen Auswirkungen gänzlich erfasst werden können.

3 Methodik

3.1 Korrosionsbedingte Kosten an Ingenieurbauwerken

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurden die direkten Kosten, welcher der Korrosion zuzuschreiben sind, an Ingenieurbauwerken quantifiziert. Dazu wurden in einem ersten Schritt vier, für das Inventar des Tiefbauamts des Kantons Zürich repräsentative Erhaltungsprojekte identifiziert (vgl. Kapitel 4). Bei den vier untersuchten Brücken handelt es sich um drei Stahlbetonbrücken für den motorisierten Verkehr und um eine Stahlbrücke für den Fuß- und Radverkehr. Die Projektunterlagen wurden detailliert hinsichtlich der durchgeführten Maßnahmen analysiert und die Kosten gemäß ihrem Ursprung, d.h. korrosionsbedingt bzw. nicht korrosionsbedingt, kategorisiert. Als korrosionsbedingte Kosten wurden dabei diejenigen direkten Kosten identifiziert, die im Rahmen der einzelnen Projekte in einer idealen Welt (vgl. Kapitel 2) nicht angefallen wären. Durch Ausklammern der nur schwer abgrenzbaren indirekten Kosten kann eine stringente Methodik auf verschiedene Projekte angewendet werden. Besonders konsistent lassen sich die Bauleistungen aufgrund der nach Normpositionen-Katalog (standardisierte Leistungsbeschreibung) durchgeführten Arbeiten in der Ausführungsphase analysieren. Pro Objekt wurden ungefähr 140 solcher Positionen detailliert analysiert. Dabei gab es immer auch Positionen, die nicht eindeutig der Korrosion zuzuordnen waren (vgl. Tabelle 1). In diesen Fällen haben wir uns entschieden, den in einem Projekt aus den eindeutig zuordenbaren Kosten der Bauleistungen gewonnenen Kostenschlüssel auf die nicht eindeutig zuordenbaren Positionen anzuwenden (vgl. Tabelle 1). Wir finden das Vorgehen vertretbar, da diese nicht eindeutig zuordenbaren Kosten bezogen auf die Gesamtkosten einen geringen Anteil ausmachen. Als Ergebnis erhält man schließlich den prozentualen Anteil der Kosten der Korrosion an den Gesamtausgaben für den Unterhalt der Ingenieurbauwerke.

3.2 Korrosionsbedingte Kosten auf Kantonsebene

In einem zweiten Schritt wurde eine Umfrage unter den kantonalen Tiefbauämtern bezüglich deren Bauwerksbeständen durchgeführt (Rücklaufquote 65 %). Von Interesse waren hierbei Informationen zur Anzahl und Art vorhandener Ingenieurbauwerke und zu den zu deren Unterhalt notwendigen Ausgaben, d.h. zu den Kosten, die für die Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit und Tragsicherheit bzw. für Ersatzbauten aufgewendet werden. Anhand dieser gesammelten Daten, sowie öffentlich zugänglichen Daten [17, 18] konnten die jährlichen Gesamtausgaben für den Unterhalt der Ingenieurbauwerke des kantonalen Straßennetzes berechnet werden. Hierzu wurde zum einen aus dem Zusammenhang zwischen der Länge des Kantonsstraßennetzes und der Anzahl Ingenieurbauwerke die Gesamtzahl an Ingenieurbauwerken auf Kantonsebene für die Schweiz extrapoliert (Methode 1). Dies war notwendig, weil nicht alle angefragten Kantone die gewünschten Informationen zur Anzahl vorhandener Ingenieurbauwerke rückmeldeten. Zum anderen wurde die Gesamtzahl an Ingenieurbauwerken im Kantonsstraßennetz ebenfalls über die Beziehung zwischen der Einwohnerzahl und der Anzahl an Ingenieurbauwerken abgeschätzt (Methode 2). Die Multiplikation der so auf zwei Arten geschätzten Gesamtzahl an Ingenieurbauwerken mit den jährlich anfallenden Kosten pro Ingenieurbauwerk, die aus den Umfragedaten berechnet wurden, ergibt die insgesamt auf Kantonsebene jährlich anfallenden Kosten für den Unterhalt der Ingenieurbauwerke. Durch Berücksichtigung des Kostenanteils der Korrosion an den Unterhaltskosten (vgl. Unterkapitel 3.1) können so die korrosionsbedingten Kosten für Ingenieurbauwerke auf Kantonsebene abgeschätzt werden.

3.3 Korrosionsbedingte Kosten auf Gemeinde- und Bundesebene

Nebst den Kantonen sind in der Schweiz auch viele Bauwerke des Straßennetzes bei Bund und Gemeinden angesiedelt. Zur Bestimmung der korrosionsbedingten Gesamtkosten im Schweizer Straßennetz müssen daher auch die entsprechenden Kosten auf Gemeinde- und Bundesebene berücksichtigt werden. Während das Bauwerksinventar auf Bundesebene (Bundesamt für Straßen ASTRA) sehr gut dokumentiert ist, liegen für die 2 202 Gemeinden der Schweiz keine zentral gesammelten Daten vor. Daher wurde für die Abschätzung auf Gemeindeebene angenommen, dass sich die Kosten, die in den Gemeinden für den Unterhalt der kommunalen Ingenieurbauwerke anfallen, proportional zu den in Unterkapitel 3.2 erarbeiteten kantonalen Kosten verhalten. Als Proportionalitätsfaktor wird der Quotient aus den Kosten für den betrieblichen Unterhalt des Gemeindestraßennetzes und des Kantonsstraßennetzes herangezogen, welche der Straßeninfrastrukturrechnung des Bundesamtes für Statistik [19] entnommen werden können. Um die korrosionsbedingten Kosten auf Bundesebene zu erhalten, wurden die Kosten für den Unterhalt der Ingenieurbauwerke aus dem Netzzustandsbericht der Nationalstraßen [14] mit dem Kostenschlüssel aus Unterkapitel 3.1 multipliziert.

3.4 Abgrenzung

In dieser Studie wurden nur die direkten Kosten der Korrosion berücksichtigt. Indirekte Kosten die der Gesellschaft erwachsen, z.B. Zeitverluste durch Stau oder Umleitungen, wurden hier nicht berücksichtigt, primär weil diese kaum zuverlässig quantifizierbar sind.

Diese Forschungsarbeit berücksichtigt nur Verkehrsinfrastrukturbauten des Straßennetzes. Dazu zählen Brücken, Bachdurchlässe, Über- und Unterführungen, Stützmauern, Lärmschutzwände, Galerien und Tunnel (hauptsächlich für den motorisierten Individualverkehr, zu geringen Teilen auch für Fußgänger und Fahrradwege). Bauwerke im Besitz anderer Eigentümer wurden

nicht berücksichtigt. Dies sind z.B. Bauwerke von Bahnbetreibern, militärische Einrichtungen, Flughäfen, Häfen, Bergbahnen, Staudämme, Kraftwerke und andere Energieanlagen, Wohn- und Bürobauten oder Parkhäuser sowie weitere Bauwerke im Besitz privater Bauherren.

4 Untersuchte Brückenbauwerke

4.1 Überführung Im Bernet

Bei der 1977 fertig gestellten zweispurigen Autobahnüberführung Im Bernet handelt es sich um eine Stahlbetonbrücke die als einfacher Balken ausgeführt wurde. Sie hat eine Spannweite von 21.7 m und ist 7.4 m breit. Im Rahmen der letzten Inspektion wurden u.a. karbonatisierungs- und chloridinduzierte Korrosion der Bewehrung, AAR sowie Kiesnester festgestellt, was zu umfangreichen Betoninstandsetzungen führte. Undichte Reserverohre für Werkleitungen wurden verfüllt und die undichten Fahrbahnübergänge wurden durch Fahrbahnübergänge aus Polymerbitumen ersetzt. Die Gesamtkosten des Erhaltungsprojektes beliefen sich auf ca. 500 000 CHF.



Abbildung 1: Situation Überführung Im Bernet [20].

4.2 Tössbrücke Schlössli

Bei der 1984 gebauten Auto- und Fussgängerbrücke handelt es sich um einen schiefwinkligen, vorgespannten Plattenbalken aus Stahlbeton mit einer Spannweite von 41 m und einer Breite von 11.9 m. Sie beherbergt zwei Fahrstreifen, einen Gehweg und einen Unterhaltsweg. Nach der letzten Inspektion wurden neben strukturellen Verstärkungsmaßnahmen, lokale Betoninstandsetzungen an den Konsolköpfen durchgeführt und eine Hydrophobierung aufgebracht. Die Fahrbahnübergänge wurden durch Fahrbahnübergänge aus Polymerbitumen ersetzt. Die Lager wurden entrostet und der Korrosionsschutz erneuert. Die korrodierten Geländer wurden durch neue Geländer mit angepassten Fußdetails ersetzt. Die korrodierten Einlaufschächte wurden erneuert. Die Gesamtkosten des Erhaltungsprojektes beliefen sich auf ca. 1 000 000 CHF.



Abbildung 2: Situation Tössbrücke Schlössli [20].

4.3 Kemptbrücke

Bei der 1984 gebauten Auto- und Fussgängerbrücke über die Kempt handelt es sich um einen vorgespannten Rahmen aus Stahlbeton mit einer Länge von 13 m (Haupttragrichtung) und einer Breite von 24 m, auf der sich zwei Kantonsstraßen kreuzen. Gründe für die Instandsetzung waren die schlecht funktionierende Entwässerung, Kiesnester in den Arbeitsfugen der Winkelstützmauer sowie der erhöhte Chloridgehalt und die Rostspuren an einem der Widerlager. Dementsprechend wurden unter anderem lokale Betoninstandsetzungen durchgeführt und ein Längsgefälle zur besseren Entwässerung erstellt. Die Gesamtkosten beliefen sich auf ca. 810 000 CHF.



Abbildung 3: Situation Kemptbrücke [20].

4.4 Brücke Höri

Die 1984 gebaute Fuß- und Radwegbrücke ist als einfacher Balken aus Stahl konstruiert mit aufgelegten Fußwegplatten aus Stahlbeton. Die Länge beträgt 23 m und die Breite 2.2 m. Die Fußwegplatten und die darunterliegenden Stahlquerträger zeigten große Korrosionsschäden, so dass der Korrosionsschutz der Brücke sowie der Deckbelag erneuert wurden. Die Gesamtkosten betragen ca. 400 000 CHF.



Abbildung 4: Situation Brücke Höri [20].

5 Ergebnisse

5.1 Kostenanteil der Korrosion

Für die analysierten Projekte des Tiefbauamts des Kantons Zürich hat sich gezeigt, dass die korrosionsbedingten Kosten durchschnittlich 56 % der Instandsetzungskosten betragen. Mit anderen Worten: in einer imaginären Welt, in welcher das Phänomen der Korrosion nicht existieren würde, wäre die Instandhaltung der Ingenieurbauwerke im Straßennetz ungefähr halb so teuer wie in unserer tatsächlichen Welt. Interessant ist ausserdem, dass die korrosionsbedingten Kosten in den vier untersuchten Projekten sehr ähnlich waren, mit einer Standardabweichung von nur 11 %. Innerhalb der drei untersuchten Stahlbetonbauwerken beträgt die Standardabweichung sogar nur 6 %.

Abbildung 5 zeigt eine detaillierte Aufschlüsselung der Gesamtkosten der einzelnen Projekte, aus der ebenfalls die größten korrosionsbedingten Einzelposten entnommen werden können. Die größten Einzelkosten werden durch den Abbruch und Ersatz von Beton verursacht, meist infolge von karbonatisiertem oder chloridbelastetem Beton auf Bewehrungsniveau und den daraus durch Korrosion resultierenden Folgen. Der Ersatz von Fahrbahnübergängen führt zu den zweithöchsten korrosionsbedingten Kosten. An dritter Stelle stehen Laborkosten für die Zustandserfassung. Dazu zählen alle Arbeiten und Untersuchungen die etwa nötig sind, um den Chloridgehalt oder die Karbonatisierungstiefe zu bestimmen oder um Potenzial- und Bewehrungsüberdeckungsmessungen durchzuführen. Weitere Einzelposten sind Fahrbahnabdichtungen und Oberflächenschutzsysteme. Die restlichen durch Korrosion bedingten Kosten, welche

in Abbildung 5 unter „Sonstiges“ zusammengefasst wurden, entfallen hauptsächlich auf Planeraufwände, Eigenleistungen, und Baustelleneinrichtung. Die Projekte Im Bernet und Tössbrücke Schlössli ähneln sich in den durchgeführten Erhaltungsmaßnahmen und haben demzufolge vergleichbare Kosten der Korrosion verursacht (ca. 54 %). Auch das Projekt Kemptbrücke kann zu dieser Gruppe von Stahlbetonbrücken gezählt werden. Zwar liegen die korrosionsbedingten Kosten (ca. 44 %) tiefer als bei den beiden anderen Projekten, jedoch entspricht die Differenz sehr gut den Kosten der Projekte Im Bernet und Tössbrücke Schlössli, abzüglich der Kosten für den Ersatz der Fahrbahnübergänge (vgl. Abbildung 5). Bei der Brücke Höri handelt es sich im Gegensatz zu den drei anderen Objekten um eine Stahlbrücke. Da die komplette Stahlkonstruktion entrostet und mit neuem Schutzanstrich versehen wurde, entstanden hier, gegenüber Stahlbetonobjekten, prozentual deutlich mehr Kosten durch Korrosion (71 %). Gemäss dem Tiefbauamt ist dies jedoch bei der Instandhaltung von Stahlbrücken üblich und kann daher für die Stahlbauweise als repräsentativ betrachtet werden.

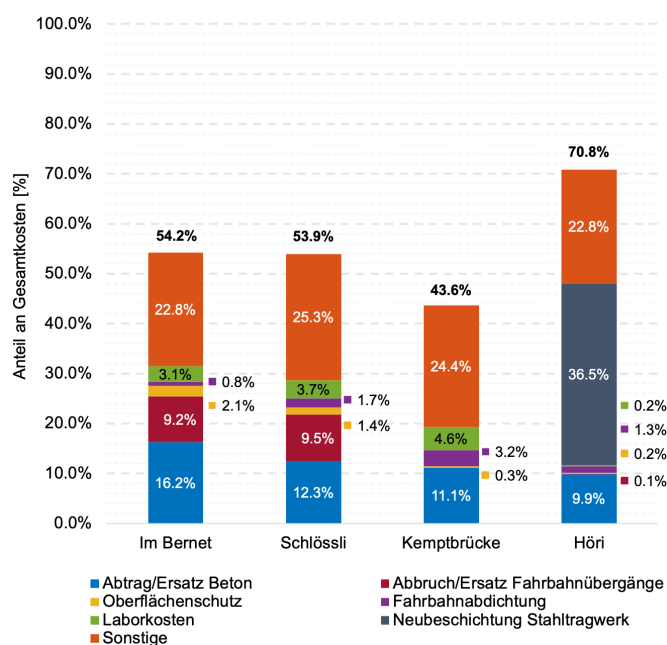


Abbildung 5: Korrosionsbedingte Kosten der vier detailliert analysierten Brückenerhaltungsprojekte (% bezogen auf die jeweiligen Gesamtkosten der Erhaltungsprojekte). Die Summe der prozentualen Kostenanteile der Korrosion sind jeweils über den Balken angegeben.

Zusätzlich zu den vier detaillierten Projekten aus dem Kanton Zürich möchten wir hier das Beispiel zweier Erhaltungsprojekte an einer Stahlbetonverbundbrücke im Kanton Neuenburg anführen. Bei der Pont sur la Vallée du Seyon handelt es sich um eine vierspurige Straßenbrücke mit zwei Stahlträgern und einer Fahrbahn aus vorgespanntem Stahlbeton aus dem Jahr 1974. Sie hat eine Länge von 90.4 m und ist 18.4 m breit. In einem ersten Sanierungsprojekt um die Jahrtausendwende wurde die aufgrund chloridinduzierter Korrosion geschädigte Fahrbahnplatte sowie ein Teil der Vorspannkabel, die ebenso Schäden aufwiesen, instandgesetzt. In einem zweiten Sanierungsprojekt im Jahr 2005 wurde der Korrosionsschutz der gesamten Stahlkonstruktion erneuert. Diese inhaltlich zusammengehörenden Projekte zeigen, dass es neben den oben vorgestellten Erhaltungsprojekten, ebenso Projekte gibt, in denen die korrosionsbedingten Kosten

100 % der Erhaltungskosten von Ingenieurbauwerken darstellen können. Insofern ist der – aufgrund der in Abbildung 5 dargestellten Analysen – ermittelte Anteil der korrosionsbedingten Kosten von im Mittel 56 % der Instandsetzungskosten tendenziell eher konservativ.

5.2 Kosten der Korrosion auf Kantonsebene

Von den 26 befragten kantonalen Tiefbauämtern haben sich 17 an der Umfrage beteiligt (vgl. Abbildung 6). Sie entsprechen 68 % der Fläche der Schweiz, auf der 73 % der Bevölkerung leben. Durch sie werden 67 % des kantonalen Straßennetzes der Schweiz abgedeckt. Abbildung 7 zeigt, dass in den befragten Kantonen, Brückenbauwerke zwar nur 26 % des Ingenieurbauwerksbestands darstellen, jedoch 69 % der Erhaltungskosten verursachen. Den mit Abstand größten Anteil an Brückenbauwerken haben Stahlbetonbrücken mit 89 %, gefolgt von Holz-, Mauerwerk- und Natursteinbrücken mit zusammen 6 % und Stahl- und Verbundbrücken mit zusammen 5 % (vgl. Abbildung 8).

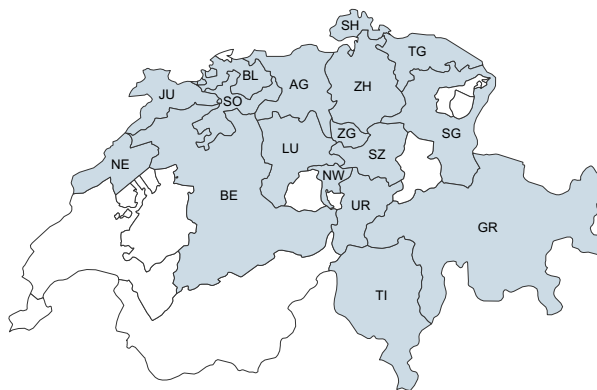


Abbildung 6: Karte der Schweiz mit Kantonsgrenzen. Kantone die an Umfrage teilgenommen haben sind grau hinterlegt und mit Abkürzung (vgl. Tabelle 2) gekennzeichnet.

Abbildung 9 zeigt den linearen Zusammenhang zwischen der Anzahl der Ingenieurbauwerke in den Straßennetzen der einzelnen Kantone und der Länge des jeweiligen Kantonsstraßennetzes. Je länger das Straßennetz, desto größer die Zahl der Ingenieurbauwerke. Im Mittel sind 1.49 Ingenieurbauwerke je Straßenkilometer vorhanden.

In Abbildung 10 sind die Anzahl der Ingenieurbauwerke und die Bevölkerung der teilnehmenden Kantone dargestellt. Hierbei wird ebenfalls ersichtlich, dass mit zunehmender Bevölkerung die Zahl der Ingenieurbauwerke steigt. Je 1 000 Einwohner sind im Mittel 2.5 Ingenieurbauwerke auf den Kantonsstraßen vorhanden.

Die Extrapolation der Zahl der Ingenieurbauwerke für das gesamte Kantonsstraßennetz mit einer Länge von 17 815 km (vgl. Tabelle 2) ergibt, dass aufgrund der Korrelation mit der Länge des Kantonsstraßennetzes schweizweit etwa 26 000 vorhanden sind. Aufgrund der Korrelation mit der Einwohnerzahl ergibt sich eine Zahl von rund 21 000 Ingenieurbauwerken.

Die jährlichen kantonalen Ausgaben für die Erhaltung eines Ingenieurbauwerks können Abbildung 11 entnommen werden. Diese Zahlen entsprechen jeweils dem Quotienten der jährlichen Gesamtausgaben für die Instandhaltung von Ingenieurbauwerken und der Anzahl vorhande-

Tabelle 2: Einwohner [17], Fläche [17] und Kantonsstraßenlänge [18] der Schweizer Kantone und in Summe.

Kanton	Abkürzung	Einwohner 2019 [-]	Fläche [km ²]	Länge Kantonsstraßen [km]
Aargau	AG	670 988	1 404	1 178
Appenzell Ausserrhoden	AR	55 178	243	227
Appenzell Innerrhoden	AI	16 105	172	62
Bern	BE	1 031 126	5 959	2 086
Basel-Landschaft	BL	287 023	518	476
Basel-Stadt	BS	193 908	37	305
Freiburg	FR	315 074	1 671	636
Genf	GE	495 249	282	258
Glarus	GL	40 349	685	129
Graubünden	GR	197 900	7 105	1 418
Jura	JU	73 290	839	449
Luzern	LU	406 506	1 493	523
Neuenburg	NE	177 964	802	448
Nidwalden	NW	42 969	276	74
Obwalden	OW	37 575	491	83
Schaffhausen	SH	504 686	2 031	679
Schwyz	SZ	81 351	257	224
Solothurn	SO	271 432	790	609
St. Gallen	SG	157 301	908	219
Tessin	TI	353 709	2 812	1 054
Thurgau	TG	273 801	992	794
Uri	UR	36 299	1 076	152
Waadt	VD	793 129	3 212	2 131
Wallis	VS	341 463	5 225	1 842
Zug	ZG	125 421	239	138
Zürich	ZH	1 504 346	1 637	1 620
Kantone total		8 484 142	41 342	17 815

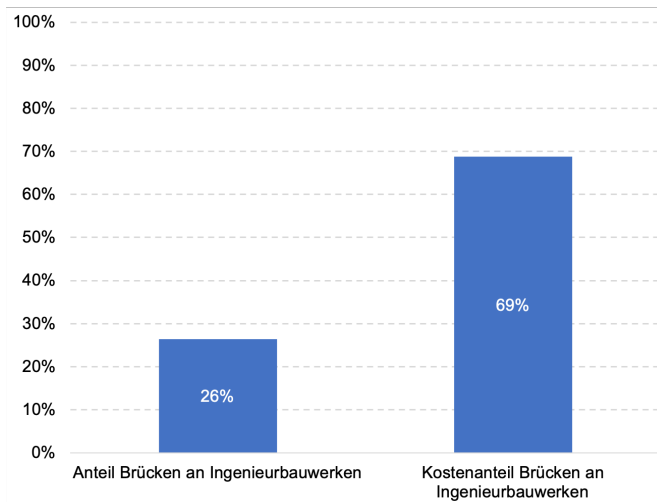


Abbildung 7: Anteil Brücken an Ingenieurbauwerken gegenüber den durch Brücken verursachten Erhaltungskosten.

ner Ingenieurbauwerke (typischerweise im Zeitraum 2016-2018). Die Daten der an der Umfrage teilgenommenen Kantone zeigen, dass jährlich durchschnittlich 8 135 CHF pro Ingenieurbauwerk ausgegeben werden. Der Median und das untere bzw. obere Quartil betragen 4 004 CHF, 2 224 CHF resp. 12 002 CHF. Es gibt einen Ausreißer mit 37 037 CHF pro Jahr.

Durch Multiplikation der Anzahl der Ingenieurbauwerke auf Kantonsebene mit den durchschnittlichen jährlichen Ausgaben pro Ingenieurbauwerk erhält man die geschätzten jährlichen Gesamtausgaben für die Erhaltung der Ingenieurbauwerke im kantonalen Straßennetz. Durch Berücksichtigung des mittleren prozentualen Anteils der korrosionsbedingten Kosten (Abbildung 5) erhält man schließlich die in Tabelle 3 aufgelisteten und Abbildung 12 dargestellten korrosionsbedingten Kosten auf kantonaler Ebene.

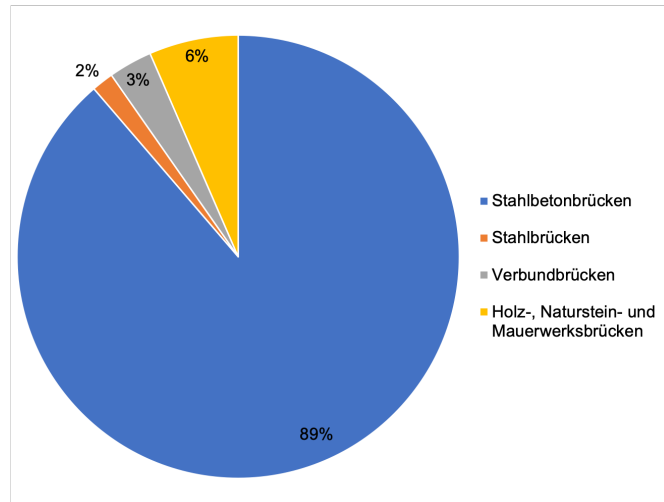


Abbildung 8: Verteilung der Brückentypen nach verwendetem Baumaterial (auf der Basis von Angaben von 8 Kantonen).

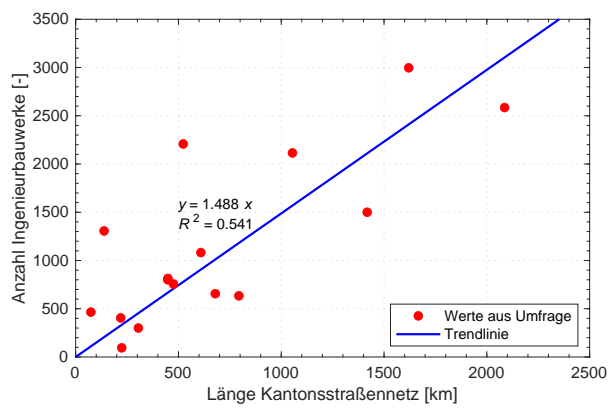


Abbildung 9: Anzahl der Ingenieurbauwerke im Bestand der Kantone in Abhängigkeit der Kantonsstraßenlänge.

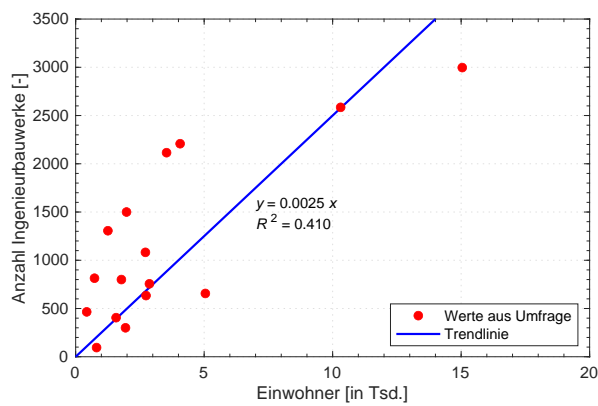


Abbildung 10: Anzahl der Ingenieurbauwerke im Bestand der Kantone in Abhängigkeit der Einwohnerzahl des jeweiligen Kantons.

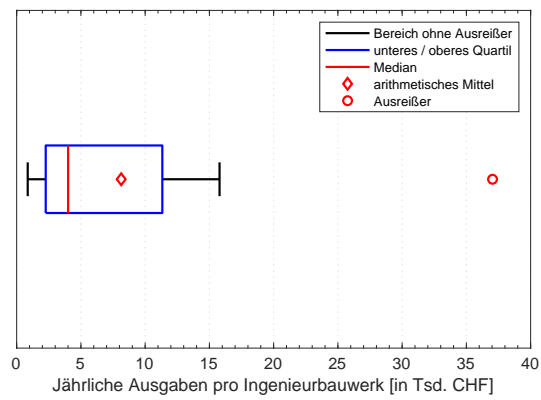


Abbildung 11: Jährliche Ausgaben pro Ingenieurbauwerk (Statistik anhand der Angaben verschiedener Kantone).

5.3 Kosten der Korrosion auf Gemeinde- und Bundesebene

Anhand des Verhältnisses der Kosten für den betrieblichen Unterhalt für das Gemeindestraßennetz und das Kantonsstraßennetz aus [19] erhält man einen Proportionalitätsfaktor von 0.74, d.h. dass die Ausgaben der Gemeinden schweizweit für die Erhaltung von Ingenieurbauwerken 74 % der Ausgaben aller Kantone beträgt. Damit lassen sich die korrosionsbedingten Kosten auf Gemeindeebene abschätzen (vgl. Tabelle 3). Die korrosionsbedingten Kosten auf Bundesebene – abgeschätzt über die gut dokumentierten Ausgaben für die Instandhaltung der Objekte in der Verantwortung des Bundesamts für Strassen ASTRA – sind ebenfalls in Tabelle 3 aufgeführt und in Abbildung 12 dargestellt. Aufsummiert zeigt sich, dass die Kosten der Korrosion im gesamten Straßennetz der Schweiz konservativ geschätzt etwa 260 Mio. CHF und maximal etwa 510 Mio. CHF betragen. Dabei zeigen sich die größten Unterschiede jeweils innerhalb der beiden Methoden (d.h. aufgrund von Unterschieden zwischen den einzelnen Kantonen), wo die Kosten anhand des oberen Quartils jeweils doppelt so hoch sind wie die Kosten anhand des unteren Quartils. Zwischen beiden Methoden belaufen sich die Unterschiede auf 5 bis 14 %, was wir als gering betrachten, und die Hochskalierung auf die gesamte Schweiz damit als zuverlässig einstufen.

Tabelle 3: Korrosionsbedingte Kosten für Gemeinden, Kantone und Bund (Bundesamt für Strassen ASTRA) sowie Gesamtkosten anhand des unteren bzw. oberen Quartils und dem Mittelwert nach Methode 1 und Methode 2 (in Mio. CHF).

	Korrosionsbedingte Kosten nach Methode 1			Korrosionsbedingte Kosten nach Methode 2		
	Unteres Quartil	Mittelwert	Oberes Quartil	Unteres Quartil	Mittelwert	Oberes Quartil
Gemeinden	24	89	131	20	71	105
Kantone	33	120	177	26	96	142
Bund (ASTRA)	203	203	203	203	203	203
SUMME	260	411	510	248	370	450

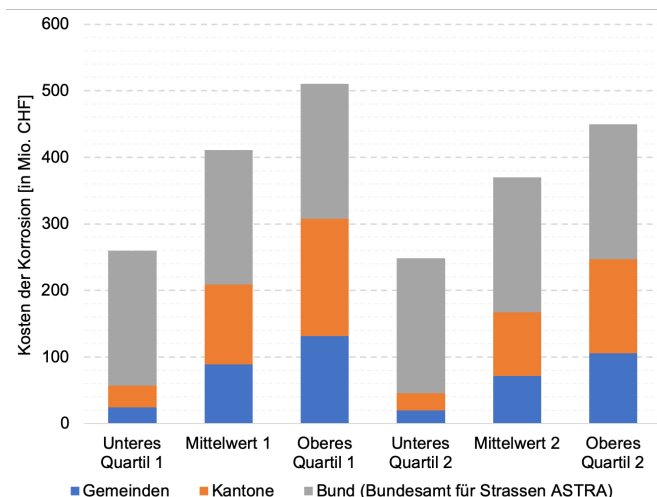


Abbildung 12: Jährliche Kosten der Korrosion auf Ebene der Gemeinden, der Kantone und des Bundes (Bundesamt für Strassen ASTRA), basierend auf Berechnungsmethode 1 und 2 (vgl. Tabelle 3).

6 Diskussion

6.1 Korrosionsbedingte Kosten an Ingenieurbauwerken im Straßennetz der Schweiz

Die direkten Kosten der Korrosion an Ingenieurbauwerken im Straßennetz der Schweiz betragen zwischen 260 und 510 Mio. CHF pro Jahr, was rund 0.08 % des BIP (2018) der Schweiz entspricht. Sie liegen somit auf demselben Niveau wie die Kosten infolge Brandschäden (230 Mio. CHF 2018) und Elementarschäden (250 Mio. CHF 2018) in der Schweiz [21].

Zum Vergleich mit früheren Studien: 1998 entsprachen die Kosten der Korrosion, die in den USA an Fernstraßenbrücken verursacht wurden, ca. 0.1 % des BIP [3]. Damit zeigt sich, dass die in diesem Forschungsprojekt erarbeiteten Zahlen dieselbe Größenordnung aufweisen wie die in den USA erhobenen Daten. Die direkte Vergleichbarkeit der Daten erschwert sich jedoch durch die Unterschiede in der Methodik der Studien. So wurde in der vorliegenden Studie beispielsweise die Gesamtheit der Ingenieurbauwerke im Straßennetz betrachtet, während in den USA nur die „highway bridges“ berücksichtigt wurden. Ein weiterer Unterschied liegt im betrachteten Zeitraum (1990er Jahre in den USA gegenüber dem Zeitpunkt um das Jahr 2018 in der Schweiz). Nicht zuletzt verfolgt man in den beiden Ländern deutlich unterschiedliche Erhaltungs-Philosophien. Während man in der Schweiz tendenziell eher proaktiv instand setzt (d.h. bevor gravierende Schäden visuell sichtbar werden), kommt in den USA traditionell eine eher reaktive Instandhaltungsphilosophie zur Anwendung (d.h. es werden tendenziell eher Maßnahmen ergriffen, wenn Schäden bereits sichtbar und weit fortgeschritten sind). Letzteres lässt sich auch aus der Zustandsbewertung der Verkehrsinfrastrukturbauten in den beiden Ländern ablesen: Während die Mehrheit der Bauwerke in der Schweiz einen guten bis akzeptablen Zustand aufweisen (gemäß [14] rund 90 % der Bauwerke der Nationalstraßen), attestiert ein kürzlich veröffentlichter Report der American Society of Civil Engineers den amerikanischen Brücken ein vergleichsweise schlechtes Zeugnis [22]. Dies dürfte sich allerdings nur beschränkt auf die Kosten auswirken. So bezahlen die Schweizer Steuerzahler die Kosten durch die proaktive Instandhaltungsphilosophie eher im vornherein, während die amerikanischen Steuerzahler die Rechnung erst später, bei akutem Instandsetzungsbedarf, erhalten.

Die insgesamt anfallenden Kosten der Korrosion in der Schweiz betreffend, bleibt zu bedenken, dass aufgrund der in Kapitel 3.4 dargelegten Randbedingungen die tatsächlichen Kosten der Korrosion an Ingenieurbauten noch deutlich höher als in diesem Forschungsprojekt aufgezeigt liegen.

6.2 Ingenieurbauwerke und Korrosion

Ingenieurbauwerke, insbesondere solche der Straßeninfrastruktur, sind korrosiven Expositionsbedingungen ausgesetzt. Als Hauptursache für Korrosionsprobleme gelten Chloride, wie sie in Form von Tausalzen zur Erhöhung der Sicherheit eingesetzt werden und so auf die verschiedenen Metalloberflächen von Bauwerken gelangen. Bei Stahlbetonbauten ist zu bedenken, dass Chloride den Beton, ein poröser Werkstoff, mit der Zeit durchdringen und somit am Bewehrungs- und Spannstahl Korrosion auslösen können [23]. Bei Stahlbauten führen vorab unzureichende Beschichtungssysteme bzw. ungünstige Geometrien wie Spalten, in welchen sich beispielsweise ein korrosives Mikroklima einstellen kann, zu Korrosionsproblemen. Es gibt noch unzählige weitere Korrosionsphänomene im konstruktiven Ingenieurbau, wie etwa die Ausbildung galvanischer Elemente bei ungünstigen Werkstoffkombinationen, Streustromkorrosion, atmosphärische Korrosion, etc. Für weitere Informationen sei die Leserin / der Leser auf die entsprechende

Fachliteratur verwiesen [4, 23–26].

Mit einem Anteil von etwas mehr als einem Viertel am Bestand von Ingenieurbauwerken, sind Brücken für mehr als zwei Drittel der anfallenden Kosten verantwortlich. Dies rührt zum einen daher, dass Brücken im Vergleich zu vielen anderen Ingenieurbauwerken anfälliger für Korrosion sind. Hierbei spielen unter anderem die im Vergleich größere exponierte Fläche und die komplexeren konstruktiven Details (Fahrbahnübergänge, Brückenlager etc.) sowie die unmittelbare Exposition korrosiver Stoffe (Tausalze, Spritzwasser, Sprühnebel) in Verbindung mit dem Straßenverkehr eine Rolle.

Ein weiterer wichtiger Faktor für Korrosionsprobleme an Ingenieurbauwerken ist schlicht deren Alter. In den industrialisierten Ländern wurde die Straßeninfrastruktur maßgeblich in der zweiten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts ausgebaut (vgl. Kapitel 1 und Abbildung 13), so dass das Durchschnittsalter der Brücken meist über 40 Jahre beträgt. Dementsprechend ist man heutzutage in zunehmendem Maß mit Dauerhaftigkeitsproblemen konfrontiert, da einzelne Bauteile an ihr Nutzungsdauerende gelangen bzw. die Tragwerke selbst bereits einen substanziellen Teil ihrer geplanten Nutzungsdauer erreicht haben. Korrosionsprobleme können grundsätzlich bei allen für die Straßenverkehrsinfrastruktur verbreiteten Brückenbauweisen auftreten (Stahlbeton-, Stahl-, und Verbundbrücken).

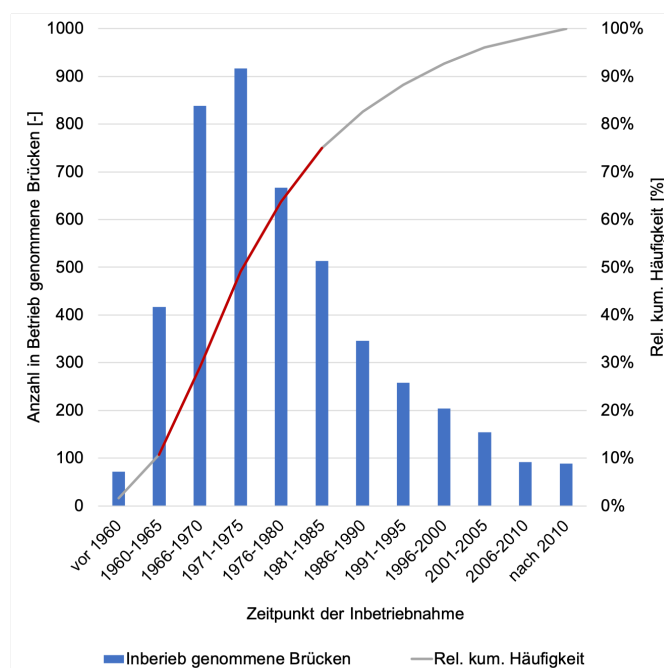


Abbildung 13: Anzahl in Betrieb genommener Brückenbauten im Nationalstraßennetz der Schweiz und deren relative kumulierte Häufigkeit. Rot markiert: 64 % der Inbetriebnahmen zw. 1960 und 1985. Durchschnittliches Brückenalter 2020: 41 Jahre. (Datenquelle: Bundesamt für Strassen ASTRA [14]).

6.3 Künftige Herausforderungen und Lösungsansätze

Gesamtgesellschaftlich führt Korrosion zu Wohlfahrtsverlusten, die in Zukunft aufgrund der Alterung der Infrastruktur tendenziell steigen dürften. Aufgrund von Abschätzungen in den Niederlanden, beispielsweise, ist davon auszugehen, dass die Anzahl der Brücken welche instandgesetzt

werden müssen in den kommenden zwei Jahrzehnten um einen Faktor 2-4 zunehmen werden [12]. Auch wenn diese Prognose, optimistisch betrachtet, nur bedingt eintreten würde, d.h. „nur“ eine Zunahme um den Faktor 2, bedeutet dies einen erheblichen Anstieg an Mittelbedarf für die Instandhaltung unserer Infrastruktur. Dies dürfte wiederum auf die meisten industrialisierten Länder zutreffen. Dabei gilt es auch zu bedenken, dass bereits heute in manchen Ländern nicht ausreichend finanzielle Mittel zur Verfügung stehen, die Infrastruktur adäquat instand zu halten. In Deutschland beispielsweise kann mit dem Verfall der Brücken mit der aktuellen Instandhaltungspolitik nicht Schritt gehalten werden, wie die interaktiv aufbereiteten Daten in [27] aufzeigen.

Dementsprechend gilt es, die Kosten der Korrosion bestmöglich unter Kontrolle zu haben. Angesichts der

1. bereits heute beträchtlichen Kosten der Korrosion an Ingenieurbauwerken,
2. der drohenden Zunahme dieser Kosten aufgrund der fortschreitenden Alterung der Infrastruktur, und
3. der bereits heute in vielen Ländern angespannten finanziellen Lage und der beschränkten Infrastrukturinstandhaltungsbudgets,

sind effizientere und kostengünstigere Instandsetzungsverfahren dringend erforderlich. Um dies zu erreichen, sind technologische Innovationen dringend notwendig, welche wiederum sowohl Grundlagenforschung als auch angewandte Forschung erfordern. Ein wichtiger Aspekt ist die bessere Diagnose und Zustandsbewertung der bestehenden Bauwerke. Chancen in dieser Hinsicht bieten technologische Fortschritte etwa im Bereich von zerstörungsfreien Prüfverfahren und robotergestützten Inspektionstechnologien. Außerdem besteht nach wie vor Bedarf nach einem fundamentalen Verständnis der Korrosionsprozesse und derer Auswirkungen auf das Tragverhalten von Bauwerken. Neben technologischen Fortschritten sind jedoch auch Anpassungen in der Ausbildung von Ingenieurinnen und Ingenieuren erforderlich. Künftige Generationen müssen besser auf die tatsächlichen Herausforderungen in der Berufswelt vorbereitet werden, nämlich auf den fachgerechten und ressourcenschonenden Umgang mit Bestandsbauwerken (Erhaltung), was fundierte Kenntnisse in der Materialtechnologie (Schädigungsprozesse, Diagnoseverfahren, etc.) bedingt. Diesen Aspekten wird jedoch in vielen industrialisierten Ländern in der Ausbildung von Fachkräften im Bauwesen zu wenig Raum eingeräumt [5, 28, 29]. Gemäß [30] zufolge könnte beispielsweise durch eine bessere Ausbildung der Fachkräfte hinsichtlich Korrosion, bis zu einem Drittel der Korrosionskosten eingespart werden.

7 Schlussfolgerung

Die detaillierte Analyse von repräsentativen Brückenbauwerken hat gezeigt, dass die direkten Kosten der Korrosion rund die Hälfte für die Erhaltung ausgegebenen finanziellen Mitteln betragen. Damit können die direkten, korrosionsbedingten Kosten an Ingenieurbauwerken im Straßennetz der Schweiz auf 260 bis 510 Mio. CHF pro Jahr beziffert werden, was rund 1 000 CHF pro Minute entspricht. Diese Kosten betragen ca. 0.08 % des BIP der Schweiz, was im Grundsatz auch auf andere industrialisierte Länder übertragbar sein dürfte. Nicht enthalten in unserer Betrachtung sind indirekte Kosten, welche der Gesellschaft ebenfalls erwachsen (Stau, Umweltbelastung, etc.), sowie Kosten an Ingenieurbauwerken im Inventar anderer Bauherren (Bahnbetreiber, Industrieanlagen, Wohn- und Bürogebäude, etc.). Dadurch dürften die korrosionsbedingten direkten Kosten an Ingenieurbauwerken gesamthaft noch deutlich höher liegen als in der

vorliegenden Schätzung. Aufgrund dieser volkswirtschaftlichen Bedeutung, sowie angesichts des alternden Bauwerksbestands industrialisierter Länder, ist es zentral, das Korrosionsphänomen bestmöglich unter Kontrolle zu haben. Dies bedingt dringend technologische Innovationen und eine zeitgemäße Ausbildung von Fachkräften im Bauwesen.

Dank

Besonderer Dank gilt dem Tiefbauamt des Kantons Zürich, welches uns ermöglicht hat in seine Unterlagen Einsicht zu nehmen und sich in gemeinsamen konstruktiven Diskussionen über die Kosten der Korrosion auszutauschen. Darüber hinaus möchten wir uns bei allen kantonalen Tiefbauämtern bedanken, die an der Umfrage zur Datenerhebung teilgenommen haben, insbesondere auch beim Kanton Neuenburg für die detaillierten Informationen.

Literatur

- [1] British Cement Association. *Development of an holistic approach to ensure the durability of new concrete construction*. Crowthorne: British Cement Association, 1997.
- [2] Fédération Internationale du Béton (fib). *Condition control and assessment of reinforced concrete structures exposed to corrosive environments*. Bd. 59. fib bulletin. Lausanne: Fédération Internationale du Béton (fib), 2011.
- [3] G. Koch, M. Brongers, N. Thompson, Y. Virmani und J. Payer. *Corrosion costs and preventive strategies in the United States*. Houston: NACE International, 2001.
- [4] E. Wendler-Kalsch und H. Gräfen. *Korrosionsschadenkunde*. Berlin Heidelberg: Springer, 1998. DOI: 10.1007/978-3-642-30431-6.
- [5] U. Angst. „Challenges and opportunities in corrosion of steel in concrete“. In: *Materials and Structures* 51.1 (2018). DOI: 10.1617/s11527-017-1131-6.
- [6] A. B. Smith und R. W. Katz. „US billion-dollar weather and climate disasters: data sources, trends, accuracy and biases“. In: *Natural Hazards* 67.2 (2013), S. 387–410. DOI: 10.1007/s11069-013-0566-5.
- [7] H. H. Uhlig. „The cost of corrosion to the United States“. In: *Corrosion* 6.1 (1950), S. 29–33. DOI: 10.5006/0010-9312-6.1.29.
- [8] J. H. Payer, W. K. Boyd, D. G. Dippold und W. H. Fisher. „NBS-Battelle cost of corrosion study (70 billion dollars!)“. In: *Materials performance* 19.5 (1980), S. 34–34.
- [9] J. Memmott. *Highway bridges in the United States – an overview*. Washington, D.C.: Bureau of Transportation Statistics, 2007.
- [10] Federal Highway Administration. *LTBP InfoBridge*. 2019. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/bridge/nbi.cfm> (besucht am 12. 11. 2019).
- [11] M. Küchler. „Instandsetzung von Betontragwerken“. In: *Beton-Kalender 2013: Lebensdauer und Instandsetzung – Brandschutz* 102 (2013), S. 345–411. DOI: 10.1002/9783433602591.ch5.
- [12] R. B. Polder, W. H. A. Peelen und W. M. G. Courage. „Non-traditional assessment and maintenance methods for aging concrete structures – technical and non-technical issues“. In: *Materials and Corrosion* 63.12 (2012), S. 1147–1153. DOI: 10.1002/maco.201206725.
- [13] F. Fingerloos, D. Zwicky, T. Vogel, W. Potucek und M. Vill. „Normen und Regelwerke“. In: *Beton-Kalender 2015: Bauen im Bestand, Brücken* 104 (2014), S. 905–1146.
- [14] Bundesamt für Strassen ASTRA. *Bericht 2018 über den Unterhalt, Ausbau und Betrieb der Nationalstrassen*. Bern: Bundesamt für Strassen ASTRA, 2019.
- [15] G. Koch. „Cost of corrosion“. In: *Trends in oil and gas corrosion research and technologies*. Hrsg. von A. M. El-Sherik. Boston: Woodhead Publishing, 2017. Kap. 1, S. 3–30. DOI: 10.1016/B978-0-08-101105-8.00001-2.
- [16] Department of Trade and Industry, Großbritannien. *Report of the committee on corrosion and protection: a survey of corrosion and protection in the United Kingdom*. London: HMSO, 1971.
- [17] Bundesamt für Statistik. *Ausgewählte Indikatoren im regionalen Vergleich, 2019 (Kantone)*. Neuchâtel: Bundesamt für Statistik, 2019.

- [18] Bundesamt für Statistik. *Strassenlängen: Stand 31. Dezember 2018*. Neuchâtel: Bundesamt für Statistik, 2019.
- [19] Bundesamt für Statistik. *Strasseninfrastrukturrechnung der Schweiz 2016*. Neuchâtel: Bundesamt für Statistik, 2019.
- [20] Geographisches Informationssystem des Kantons Zürich (GIS-ZH). *Geodatenatz: Orthofoto Frühjahr RGB 2015/16*. 2019. URL: <https://maps.zh.ch> (besucht am 12.11.2019).
- [21] Vereinigung Kantonaler Gebäudeversicherungen. *Rückversicherung - Statistiken*. 2019. URL: <https://www.vkg.ch/> (besucht am 20.01.2020).
- [22] American Society of Civil Engineers. *2017 infrastructure report card*. 2017. URL: <https://www.infrastructurereportcard.org/cat-item/bridges/> (besucht am 20.01.2020).
- [23] L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, E. Redaelli und R. B. Polder. *Corrosion of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair*. 2. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH, 2013. DOI: 10.1002/9783527651696.
- [24] Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz. *Richtlinie C3 – Richtlinie zum Schutz gegen Korrosion durch Streuströme von Gleichstromanlagen*. Zürich: Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz, 2011.
- [25] E. Brühwiler und C. Menn. *Stahlbetonbrücken*. 3. Aufl. Wien New York: Springer, 2003.
- [26] W. Lohse, J. Laumann und C. Wolf. *Stahlbau 1: Bemessung von Stahlbauten nach Eurocode mit zahlreichen Beispielen*. 25. Aufl. Bd. 1. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2016. DOI: 10.1007/978-3-8348-2058-7.
- [27] L.-M. Nagel, M. Pauly, V. Mucha, J. Setzer und F. Wilhelm. *Wettlauf gegen den Verfall*. 2016. URL: <https://www.welt.de/politik/interaktiv/bruecken/deutschlands-bruecken-wettlauf-gegen-den-verfall.html> (besucht am 20.01.2020).
- [28] National Research Council. *Assessment of corrosion education*. Washington D.C.: National Academies Press, 2009. DOI: 10.17226/12560.
- [29] J. R. Scully und W. L. Harris. „Opportunities and challenges in corrosion education: review of a National Research Council assessment“. In: *Interface magazine* 21.1 (2012), S. 67–71. DOI: 10.1149/2.F06121if.
- [30] G. Koch, J. Varney, N. Thompson, O. Moghissi, M. Gould und J. Payer. *International measures of prevention, application, and economics of corrosion technologies study*. Houston: NACE International, 2016.