

Appendix zu:

Lebenszyklus- management für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur

Entwicklung eines verkehrsträgerübergreifenden, indikatorgestützten Systems

von

Anne Lehardt
David Seiler
Andreas Gerdes

KIT – Karlsruher Institut für Technologie
Institut für funktionelle Grenzflächen (IFG)

Alexander Bombeck
Kunibert Lennerts

KIT – Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Technologie und Management im Baubetrieb
(TMB)

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 159 – Appendix

bast

Appendix - Abschlussbericht

FE 69.0002/2017

Entwicklung eines verkehrsträgerübergreifen- den indikatorgestützten Lebenszyklusmanage- mentsystems für Bauwerke der Verkehrsinfra- struktur

30. Juni 2019

Bearbeiter: Alexander Bombeck, Anne Lehardt, David Seiler

Leitung: Prof. Andreas Gerdes

Partner: Prof. Kunibert Lennerts

KIT – Karlsruher Institut für Technologie

Institut für funktionelle Grenzflächen (IFG)

Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB)

Inhaltsverzeichnis

Appendix A Netzebene - Lebenszyklusmanagement-System (LzM)	5
A.1 LzM an Gebäuden (Fallbeispiele)	5
Appendix B Fallbeispiele und Erfahrungsberichte LzM - Infrastruktur	8
B.1 National	8
B.1.1 Forschungsprojekte FE 15.494/2010	8
B.1.2 Forschungsprojekt FE 15.0522/2011/FRB	8
B.1.3 Bundesverkehrswegeplan (BVWP)	9
B.2 International	9
B.2.1 Dänemark	9
B.2.2 Schweden	10
B.2.3 Schweiz - Bundesamt für Straßen	12
B.2.4 Österreich	15
B.3 Zusammenfassung	16
Appendix C Objektebene - Begriffserklärungen und gemeinsame Begriffsdefinition	17
Appendix D Alterungs- und Schädigungsmechanismen	20
D.1 Bewehrungskorrosion infolge von Carbonatisierung	20
D.2 Bewehrungskorrosion durch Chloride	21
D.3 Frostangriff mit und ohne Tausalze	23
D.4 Auslaugung durch anstehende Wässer	24
D.5 Sulfatangriff	25
D.6 Schäden durch Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR)	26
D.7 Schadensmechanismen durch Schwinden und Kriechen	27
D.8 Unzureichende Baustoffqualität bzw. mangelhafte Baustoffverarbeitung	28
D.9 Schädigungen durch veränderte Nutzungs- und/oder Umweltbedingungen	28
Appendix E Prognosemodelle für ausgewählte Alterungs- und Schädigungsmechanismen	31
E.1 Carbonatisierung	31
E.1.1 Bestimmung der Korrosionswahrscheinlichkeit - Depassivierungswahrscheinlichkeit	34
E.2 Chlorideindringtiefe	35
E.3 Lösender Angriff	36
E.4 Treibender Angriff bei Einwirkung von Sulfaten	37
E.5 Alkali-Kieselsäure-Reaktion	39
E.6 Auslaugung	42
E.7 Zusammenfassung	43
Appendix F Beispiele für Programmsysteme zur Prognose der Schädigungsentwicklung	44
F.1 Programmsystem TRANSREAC	44
F.2 Programmsystem COMLEAM	45
F.3 Programmsystem GEMS	46
F.4 Programmsystem PHREEQC	47
F.5 Programmsystem STADIUM	48
F.6 Zusammenfassung	49
Appendix G Methoden zur Zustandsanalyse	50
G.1 Vor Ort Methoden - Zerstörungsfreie Verfahren und Methode	50

Inhaltsverzeichnis

G.1.1 Pulsinduktionsverfahren zur Bestimmung der Bewehrungsüberdeckung	50
G.1.2 Druckfestigkeit mit Beton-Rückprallhammer (Silver-Schmidt-Hammer)	51
G.1.3 Ultraschallgeschwindigkeit zur Bestimmung der Gefügehomo­genität und des dynamischen E-Moduls	52
G.1.4 Impact-Echo-Verfahren	54
G.1.5 Remanenzmagnetismus-Verfahren	56
G.1.6 Bestimmung der Luft- bzw. Gaspermeabilität	57
G.1.7 Bauradar	58
G.1.8 Durchstrahlprüfung - Röntgen	59
G.1.9 Potentialfeldmessung zur Bestimmung des Korrosionsrisikos	59
G.2 Invasive Verfahren - Vorort Verfahren	61
G.2.1 Haftzugfestigkeitsmessung und Oberflächenzugfestigkeitsmessung	61
G.2.2 Carbonatisierungstiefe	63
G.3 Laboruntersuchungen	63
G.3.1 Röntgendiffraktometrie	63
G.3.2 Thermogravimetrie	65
G.3.3 Ionenchromatographie	66
G.3.4 Quecksilberdruckporosimetrie	67
G.3.5 Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten	68
G.3.6 Bestimmung der Porenkennwerte - Kapillarfüllbare Porosität und Trockenroh­dichte	70
G.3.7 Ionenselektive Elektrode	72
G.3.8 Photometrie	72
G.3.9 Kontaktwinkelmessgerät	73
G.4 Zusammenfassung	74
Appendix H Pilotprojekt	75
H.1 Bauwerksdaten	77
H.1.1 Bewehrungsüberdeckung	77
H.2 SCHÄDIGUNGSMECHANISMUS - Chloridinduzierte Korrosion	79
H.2.1 Messgröße Chlorideindringtiefe:	79
H.2.2 Tiefenprofil Chloridgehalt:	80
H.2.3 Indikator für die Chloridinduzierte Korrosion - Chlorideindringtiefe vs. Bewehrungsüberdeckung	80
H.2.4 Schlussfolgerung:	82
H.3 SCHÄDIGUNGSMECHANISMUS - Korrosion auf Grund von Carbonatisierung	83
H.3.1 Messgröße: Carbonatisierungstiefe	83
H.3.2 Tiefenprofil Carbonatisierungstiefe	84
H.3.3 Indikator für die Korrosion auf Grund der Carbonatisierung - Carbonatisierungstiefe vs. Bewehrungsüberdeckung	84
H.3.4 Schlussfolgerung:	86
H.4 Schlussfolgerung Bauwerk:	86
H.5 Netzbewertung	87
H.5.1 Zielstellung und Gliederung	87
H.5.2 Zieldefinitionen	87
H.5.3 Datenquellen und Methodik	87

Inhaltsverzeichnis

H.5.4 Autobahndirektion Bayern Süd: Phase „Check“	91
H.5.5 WSV Neckar: Phase „Check“	94
H.5.6 Autobahndirektion Bayern Süd: Phase „Act“	95
H.5.7 Änderung der netzweiten Strategie	99
H.5.8 Fazit	100
H.5.9 Durchgeführte Datenumformungen	100
Appendix I Bauwerkstypen nach Verkehrsträgern	102
I.1 Straße - (Bundesanstalt für Straßenwesen - BASt)	102
I.2 Verkehrsbauwerke an den Bundeswasserstraßen - (Bundesanstalt für Wasserbauwerke - BAW)	104
I.3 Schiene - (Eisenbahn-Bundesamt EBA)	105
Appendix J Zusammenfassung und Auswertung des Experten Workshops 11.01.2019 in Baden-Baden	109
Literatur	113
Tabellenverzeichnis	117
Abbildungsverzeichnis	117

Appendix A Netzebene - Lebenszyklusmanagement-System (LzM)

A.1 LzM an Gebäuden (Fallbeispiele)

Pelzeter beschreibt drei Best-Practice-Beispiele für das Lebenszyklusmanagement von Gebäuden (Pelzeter, 2017, pp. 141–209). Bei den Beispielen handelt es sich um zwei Neubauprojekte sowie um eine Bestandsentwicklung. Pelzeter stilisiert die beiden Neubauprojekte als extreme Gegensätze: Das erste betrachtete Projekt, das Bürogebäude „Haus 2019“ des UBA in Berlin, wird als Hightech-Objekt dargestellt (S.141 ff.). „Haus 2226“, ein gemischt genutztes Gebäude in Lustenau bei Bregenz, Österreich, hingegen als Low-Tech-Pionierarbeit (S.161 ff.). Bei der Bestandsentwicklung handelt es sich um eine Modernisierung eines Wohnhochhauses in Nähe des Bahnhofs Pforzheim, welches im Betrieb modernisiert wurde.

Alle drei betrachteten Objekte haben auch außerhalb des Fachpublikums überregionale Bekanntheit erfahren. Jedes der Projekte wurde aufgrund von Besonderheiten in überregionalen Medien erwähnt. Das Haus 2019 des UBA wurde in der überregionalen Veröffentlichung „Der Tagesspiegel“ für seine über den Lebenszyklus rentable, energiesparende Gebäudetechnik gelobt (Jacobs, 2013). Das Haus 2226 im österreichischen Lustenau hingegen fand sich selbst in der regionalen Zeitschrift „Weser Kurier“ wieder. Auch hier wurden die langfristigen Qualitäten des Gebäudes angepriesen, jedoch dieses Mal in Bezug auf den Verzicht auf technische Anlagen und die Langlebigkeit der Konstruktion (Frohne, 2016). Das betrachtete Wohnhochhaus wurde 2015 gar mit dem Preis „Nachhaltiges Bauen“ ausgezeichnet.

Zum Vergleich der Gebäude zieht Pelzeter unterschiedliche Kriterien heran: 1. Maßnahmen des LzM zur Steigerung der Nutzbarkeit, 2. Maßnahmen des LzM zu Ressourceneinsatz und Umweltschonung, 3. Lebenszykluskosten, 4. Ökobilanz. Ohne die Ergebnisse im Detail aufzuführen, kann festgehalten werden, dass die Gebäude in allen Betrachtungspunkten gut abschneiden. Dies ist angesichts der Tatsache, dass es sich wie oben gesagt um Best-Practice-Beispiele handelt, nicht weiter verwunderlich. Das Haus 2019 des UBA ist sogar ein Leuchtturmprojekt, dass die Umsetzung des ab 2019 für Neubauten der öffentlichen Hand geltenden Niedrigstenergiestandard bereits zum Zeitpunkt seiner Planung 2010 erreichen sollte und dabei noch in weiterer Hinsicht auf Ressourcenschonung hin optimiert wurde. Auch das Haus 2226 ist als „visionärer Prototyp“ und Leuchtturmprojekt errichtet worden.¹ Die Sanierung des Wohnhochhauses in Pforzheim ist laut Aussage des Architekten auch nur aufgrund von Förderungen möglich gewesen (Clasen, 2017).

Alle drei Beispiele zeugen von einer multidimensionalen und ausführlichen Planung im Vorfeld der Errichtung, wobei die Ansätze differieren. Beim Haus 2019 handelt es sich um einen öffentlichen Neubau, der die entsprechenden Vorgaben an Bedarfskonzept, Planung, Nachhaltigkeitszertifizierung etc. einzuhalten hat. Als Leuchtturmprojekt wurde es nicht nur an die verschärften Anforderungen der EPBD ausgelegt, sondern auch für das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen optimiert. Die Planung setzt hierfür auf eine Kombination aus modernen Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien und nachwachsenden Rohstoffen. Die in der Planung gestellten Ziele an die Energieeffizienz wurden in den ersten Jahren der Nutzungsphase sogar übertroffen (Ittershagen, 2011).

¹ Beschreibung des Projektes auf der Homepage des Büros „baumschlagler eberle architekten“, online verfügbar unter: <https://www.baumschlagler-eberle.com/werk/projekte/projekt/2226/> (zuletzt geprüft am: 08.06.2018)

Appendix A

Im Gegensatz dazu wurde das Haus 2226 nicht auf ein Nachhaltigkeitsbewertungssystem hin optimiert. Der Architekt des zweiten Beispiels, Dietmar Eberle, bezweifelt auch, dass das Haus 2226 bei der Betrachtung in einem Nachhaltigkeitsbewertungssystem prämiert würde. Ursächlich sei die Ausrichtung der Bewertungssysteme auf den Einsatz von Gebäudetechnik (Pelzeter, 2017, p. 168). Ein bereits bekannter Vorwurf. So zitiert auch Brown den US-amerikanischen Projektentwickler McNamara, der denselben Vorwurf gegenüber der Bewertungssystematik LEED des USGBC erhebt (Brown, 2015, p. 141)

Stattdessen standen die radikale Vermeidung von Technik und die Auslegung des Gebäudes auf eine lange Lebensdauer im Fokus der Planung des Hauses 2226. Selbst der Name des Gebäudes leitet sich von einer besonderen Eigenschaft des Gebäudes ab: Im Gebäude sollen ganzjährig Temperaturen zwischen 22-26°C herrschen, ohne aktive Heizung oder Kühlung. Im Projekt wird zu Erhaltung der Zieltemperatur gänzlich auf die thermische Trägheit der Außenwände, eine im Rohbaumaß 76cm Dicke zweischalige Konstruktion, tragender Innenwände aus Ziegelstein und Stahlbetondecken in Kombination mit inneren und solaren Gewinnen gesetzt. (Pelzeter, 2017, pp. 165–167)

Ganz im Gegensatz zu den vorausgehenden Beispielen stand im Falle der Modernisierung des Wohnhochhauses in Pforzheim das Interesse der Bestandsmieter im Fokus der Planung. So wurden im Vorfeld die Bewohner - welche das Gebäude teilweise bereits seit 1969 bewohnen - nach ihren Wünschen befragt. Entscheidend war, dass die Mieter keine Erneuerung des Innenausbaus wünschten, sondern hauptsächlich an einer Verbesserung des Schallschutzes interessiert waren. Das Gebäude steht in unmittelbarer Bahnhofsnähe, sodass der entstehende Lärm in allen Stockwerken zu hören ist. Der gute Zustand von Bodenbelägen und Elektroinstallationen, sowie die von den Mietern formulierten Wünsche, erlaubten somit eine Konzentration der Generalsanierung auf die Fassade, technische Anlagen und Bäder. Zusätzlich war eine Vergrößerung der Balkone möglich ohne dass die Brutto-Mieten gestiegen wären. Dies ist möglich, da der Energiebedarf des vor der ersten Wärmeschutzverordnung von 1972 von 160 kWh/(m²-a) um mehr als 90% auf 14,2 kWh/(m²-a) gesenkt werden konnte (Pelzeter, 2017, pp. 179–190).

Die Beispiele zeigen, dass eine multidimensionale, lebenszyklusorientierte Optimierung in verschiedenen Lebenszyklusphasen möglich ist, unabhängig davon, ob ein indikatorgestütztes System zur Bewertung eingesetzt wird. Dennoch ist klar, dass diese Optimierung Ziele braucht und mit einer integralen, vorausschauenden Planung einhergeht. Ein indikatorgestütztes Bewertungssystem eignet sich grundsätzlich als Methode zur Zielsetzung, wie das erste Beispiel „Haus 2019“ zeigt. Auch muss darauf geachtet werden, dass ein solches System möglichst technologieneutral und innovationsfördernd ausgestaltet wird, wie die im zweiten Beispiel aufgeführten Aussagen beweisen.

Pelzeter warnt in ihrer Synopse zu den von ihr aufgestellten Kennzahlen der Fallbeispiele auch davor diesen zu viel Gewicht zu geben. Ein Vergleich der Ergebnisse von Lebenszykluskostenrechnung und Ökobilanz sei nicht zielführend. Zum einen handelt es sich bei den Methoden um Modellrechnungen, die mit Unsicherheiten belastet sind. Zum anderen würde ein direkter Vergleich eine Vergleichbarkeit des Nutzens unterstellen, die aufgrund unterschiedlicher Nutzungen und Komfortniveaus nicht gegeben sind. (Pelzeter, 2017, pp. 196–200)

Auf Portfolioebene hat das Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB) die langfristige Planung von Instandhaltungsmaßnahmen unter Budgetrestriktionen untersucht. Für den Auftraggeber, die Evangelische Landeskirche in Baden, wurde dazu das gesamte Portfolio an Immobilien nach der Methode Schröder im Zustand bewertet. Auf Basis der ermittelten „optimalen“ Instandsetzungszeitpunkte, der eingeführten Parameter Dringlichkeit und Nutzen sowie einer Zielfunktion für die Verteilung

Appendix A

der Kosten über die Zeit, konnte eine Software zur Priorisierung von Maßnahmen umgesetzt werden. Zu diesem Zweck wurde ein metaheuristisches Verfahren auf Basis der Tabu-Suche verwendet. (Schröder, 1989)

Appendix B Fallbeispiele und Erfahrungsberichte LzM - Infrastruktur

Ein Ziel des Projektes „Entwicklung eines verkehrsträgerübergreifenden indikatorgestützten Lebenszykluskostenmanagement-Systems für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur“ ist zum einen die Identifikation von relevanten Indikatoren und die Entwicklung eines Kriterienkatalogs. Hierzu wurde eine Literaturrecherche in Deutschland, dem europäischen und außereuropäischen Ausland zu realen, aktuellen Fallbeispielen durchgeführt, um einen Überblick über den Stand des Wissens auf diesem Gebiet zu bekommen bzw. um festzustellen ob solche oder ähnliche Studien und Betrachtungen wie hier durchgeführt wurden und ob diese oder Teile von diesen auf das hier vorliegende Projekt übertragen werden können.

B.1 National

B.1.1 Forschungsprojekte FE 15.494/2010

Das Ziel des Forschungsprojekts „**Entwicklung einheitlicher Bewertungskriterien für Infrastrukturbauwerke im Hinblick auf Nachhaltigkeit**“ war die Erarbeitung eines Vorschlags für ein nationales Nachhaltigkeitsbewertungs- bzw. Zertifizierungssystem für Infrastrukturbauwerke (Mielecke et al., 2016). Die Grundlage für das Forschungsvorhaben bildet das Deutsche Gütesiegel Nachhaltiges Bauen (DGNB). Die Ergebnisse sind 23 Kriterien, die den vier Nachhaltigkeitsaspekten „ökologische Qualität“, „ökonomische Qualität“, „soziale und funktionale Qualität“ sowie „technische Qualität“ zugeordnet wurden. Das System wurde zur Anwendung in der Planungsphase eines Bauwerks konzipiert, um hauptsächlich den Vergleich zwischen unterschiedlichen Lösungsvarianten zu ermöglichen.

B.1.2 Forschungsprojekt FE 15.0522/2011/FRB

Im Forschungsprojekt „**Pilotstudie zum Bewertungsverfahren Nachhaltigkeit von Straßenbrücken im Lebenszyklus**“ wurde das Bewertungsverfahren des o.g. Forschungsprojekt FE 15.494/2010/FRB „Entwicklung einheitlicher Bewertungskriterien für Infrastrukturbauwerke in Hinblick auf Nachhaltigkeit“ an fertiggestellten Bauwerken in der Praxis erstmalig angewendet und kritisch überprüft. Die Ergebnisse sind:

- Nicht alle Kriterien wurden in den Pilotprojekten als relevant eingestuft (Verbesserungsvorschlag: Relevanz der Kriterien hinterfragen)
- Es wird vorgeschlagen den Kriterienkatalog auf tatsächlich anwendbare Kriterien zu reduzieren
- Die Klassifizierung der Brücken ist wichtig, um die Relevanz der Kriterien und ihre Bewertung zu definieren
- Grenzwerte und Referenzwerte der Emissionen und Kosten müssen im Verhältnis zu ihrer Auswirkung definiert werden
- Grenz- und Referenzwerte bei der ökologischen Qualität sollten nicht konstant sein, sondern variabel, d.h. in Abhängigkeit bestimmter Faktoren abgeleitet werden
- Grenz- und Referenzwerte für direkte Kosten müssen noch bearbeitet werden, weil sie zu hoch sind
- Die Vereinfachungen bei der Berechnung der indirekten Kosten sind nicht befriedigend und müssen mit den existierenden Inputs (z.B. Bundesverkehrswegeplan) abgeglichen werden
- Einige Indikatoren, wie z. B. Lärmschutz, sind strategische Kriterien und müssen in den frühen Phasen der Planung bestimmt werden
- Überprüfung und Gegenüberstellung der Kriterien mit den vertraglichen Vereinbarungen

Appendix B

- Erfahrung und Qualifikation des Personals spielt eine große Rolle, wie z.B. bei der Definition von Alternativen, die von der besten verfügbaren Technologie abhängen. Hier ist die Bewertung subjektiv.
- Kompetenz und Erfahrung der Ausführenden spielen eine große Rolle in der Phase der Ausschreibung und der Auswahl der Bieter. Besondere Erfahrung und Nachhaltigkeitshintergründe der Beteiligten verbessern die gesamte Qualität.

B.1.3 Bundesverkehrswegeplan (BVWP)

Das Bewertungsverfahren des BVWP 2030 besteht aus vier Modulen:

1. Module A: Nutzen-Kosten-Analyse
2. Module B: Umwelt- und naturschutzrechtliche Beurteilung
3. Module C: Raumordnerische Beurteilung. Der Ansatz ist eine Systembetrachtung in Form einer Defizitanalyse
4. Module D: Städtebauliche Beurteilung

Die vier Module beinhalten zahlreiche ökonomische, ökologische und soziale Kriterien für Infrastrukturprojekte. Diese Kriterien werden im Rahmen dieses Forschungsprojekt als Entscheidungsgrundlage im Lebenszyklusmanagement erfasst. Es ist erkennbar, dass der damit verbundene Aufwand für die Erhebung und Dokumentation dieser Kriterien sehr groß ist. In wieweit diese Kriterien anwendbar oder für die Anwender akzeptabel sind, muss untersucht werden. Hier können Prioritäten definiert werden, um den Fokus auf wichtige und beeinflussbare Kriterien zu legen. Im zu entwickelnden Managementkonzept müssen Entscheidungen getroffen werden, um Verbesserungen zu erreichen, die mit diesen Kriterien verbunden sind.

B.2 International

B.2.1 Dänemark

Am Beispiel einer Straßenbrücke über den Roskilde Fjord bei Frederikssund in Dänemark zeigen Manzo und Salling (2016) die Vorteile und die Herausforderungen einer Methode für das Projektmanagement von Infrastrukturelementen auf. Bei dieser Methode handelt es sich um eine Kosten-Nutzen-Analyse (**CostBenefitAnalysis**), in welche eine Ökobilanz (**LifeCycleAssessment**) integriert wird. Dabei werden neben direkten Umweltauswirkungen, wie Abgasemissionen von Fahrzeugen, welche die Brücke nutzen, auch indirekte Umweltauswirkungen berücksichtigt, wie die Emissionen während des Fahrzeugbaus. Neben ökologischen Aspekten fließen auch sozioökonomische Aspekte, wie die Änderung der entstehenden Streckenlänge, der damit verbundenen Änderung der Fahrtzeiten und den Kosten für Nutzer und Betreiber der Brücke in die Lebenszyklusanalyse mit ein. Manzo und Salling (2016) zeigen einerseits umfassende Auswirkungen eines Infrastrukturelements auf die Umwelt auf, andererseits findet keine Betrachtung der Umweltauswirkungen auf das Infrastrukturelement und der eingesetzten Werkstoffe selbst statt. Durch die Integration der LCA in die CBA konnte deutlich gezeigt werden, inwiefern sich die sozioökonomischen Indikatoren innerhalb der Projektplanung eines Infrastrukturelements und die damit verbundenen erwarteten bzw. geschätzten Gesamtkosten verändern. Die veranschlagten **Gesamtkosten** des Projekts steigen um 17% an, verglichen mit der Kalkulation ohne Berücksichtigung der monetarisierten Ergebnisse der LCA. Der Grund für diese Kostenerhöhung ist die Berücksichtigung der Kosten, die innerhalb der LCA für die Luftverschmutzung berechnet werden, welche durch das Infrastrukturbauwerk entstehen. Allerdings führen Indikatoren der LCA, wie z.B. die Luftverschmutzung durch die Abgasemissionen von PKWs, welche sich durch die veränderte Streckenführung ergeben, zu einem Gewinn in der

Gesamtkostenaufstellung. Dadurch sehen die Autoren eine Integration der LCA in eine CBA als eine Methode an, durch welche eine optimierte Entscheidungsgrundlage für die Planung einer nachhaltigen Infrastruktur geschaffen werden kann. Zusätzlich geben die Autoren zu bedenken, dass Indikatoren, die mit aktuellen Verbrennungsmotoren in Fahrzeugen monetär beziffert werden, sich in der Zukunft durch die Elektrifizierung und eine Verringerung an Fahrzeugen im Privatbesitz drastisch ändern können.

B.2.2 Schweden

In Du und Karoumi (2014) wird eine Literaturstudie zu verschiedenen Ansätzen von Systemen zur Beurteilung des Lebenszyklus von Brücken im europäischen Schienennetz durchgeführt. Die Autoren weisen dabei auf den Mangel an Lebenszyklusmanagementsystemen (LZM) im europäischen Schienennetz hin. Lebenszyklusmanagementsysteme für Infrastrukturelemente berücksichtigen im Sinne eines klassischen LZMs von Produkten (Industrie/Dienstleistung) auch die Umwelteinflüsse, welche bei der Gewinnung von Rohmaterialien, deren Weiterverarbeitung zu Bauteilen, der Instandhaltung und der Entsorgung (End-Of-Life) entstehen. Dabei handelt es sich um den Energieverbrauch in der Wertschöpfungskette, die Emissionen durch die Art der Energiegewinnung und die Emissionen, welche während des gesamten Lebenszyklus entstehen. Bezüglich der verwendeten Werkstoffe beeinflusst vor allem die Möglichkeit eines Werkstoffrecyclings die Lebenszykluskosten des zu errichtenden Bauwerks. Die Veränderung der eingesetzten Werkstoffe durch Umwelteinflüsse, die damit verbundenen Schadensmechanismen und der sich daraus ableitende Bauwerkszustand fließen in diese Betrachtungen jedoch nicht mit ein. Aufgrund der hohen Komplexität der Bauwerksstrukturen von Schienenverkehrsbrücken bietet laut (Du and Karoumi, 2014) keines der aktuellen LZM-Systeme im Schienenverkehr eine entsprechende Datengrundlage, durch welche alle Szenarien bezüglich der Funktionstüchtigkeit des Bauwerks über den gesamten Lebenszyklus abgebildet werden kann.

B1943 Life cycle assessment of railways and rail transports (Schweden, 2010)

In dem 2010 veröffentlichten Bericht mit dem Titel "B1943 Life cycle assessment of railways and rail transports" stellt das Schwedische Institut für Umweltforschung (IVL) die Ergebnisse einer Ökobilanz vor, welche für einen Neubau im dortigen Schienennetz und den Schienenverkehr durchgeführt wurde. Dabei wurde die „Bothnia Line“ (<https://www.railway-technology.com/projects/botniabanan/>) untersucht. Bei dieser Bahnstrecke handelt es sich um eine 190 km Hochgeschwindigkeitsbahnstrecke entlang der Küste Nordschwedens mit insgesamt 140 Brücken, 25 km Tunnel und 6 neuen Stationen für den Regionalverkehr. Ziel des Projektes war eine Kapazitätssteigerung des Schienenverkehrs mit einer Verdoppelung des Frachtaufkommens auf 10 Millionen Tonnen pro Jahr.

Der gewählte Ansatz zur Analyse des Lebenszyklus der Infrastruktur bezieht neben der geplanten Bahnstrecke auch alle Fahrzeuge bzw. Züge mit ein, welche für den Bau der Strecke benötigt werden und die sie später tatsächlich befahren werden. In die Ökobilanz fließen deshalb unter anderem die Umweltauswirkungen der folgenden Punkte ein: gewählte Bauweise, Betrieb und Instandhaltung der Strecke, Herstellung der Fahrzeuge und Züge, Betrieb der Züge, Be- und Entladen der Züge, Produktion und Verteilung des für den Betrieb benötigten Kraftstoffes, die Produktion der benötigten elektrischen Energie und die Entsorgung von Materialien (siehe Abbildung 1).

Eine Grundvoraussetzung für die Modellerstellung auf Basis der Ökobilanz des Schienennetzes war, dass das Design flexibel sein muss, damit die unterschiedlichen Streckenabschnitte (versch. Untergründe, Brücken, Tunnel, etc.) berücksichtigt werden können. Aufgrund der Komplexität des Modells, wurden verschiedene Basismodelle erstellt, welche dann in ein Gesamtmodell integriert werden:

- Modell des Streckenfundaments
- Modell der Strecke

Appendix B

- Modell der elektrischen Energie und des Regelungssystems
- Modell der Tunnel
- Modell der Brücken
- Modell der Haltestellen und Frachtterminals
- Modell der Personen- und Güterzüge, inklusive des Zugbetriebs

Eine wichtige Fragestellung zu Beginn der Lebenszyklusmodellierung war, wie der Beginn und das Ende des Lebenszyklus einer Infrastruktur sinnvollerweise definiert werden kann. Statt einem klaren Anfang bzw. Ende des Lebenszyklus wurden Berechnungszeiträume verwendet, welche im Fall des Schienennetzes auf 60 Jahre festgelegt wurden. Dieser Zeitraum von 60 Jahren orientiert sich an der Betriebsdauer der meisten Komponenten des gesamten Schienennetzes bzw. an ökonomischen Berechnungsgrundlagen. Den Beginn des Rechenzeitraums stellt dabei der Beginn der Bauarbeiten dar. Das Ziel ist nicht eine genaue Beschreibung der Entwicklung der Infrastruktur innerhalb von 60 Jahren, sondern ein Gleichgewicht zwischen der Errichtung und der Instandhaltung bzw. des Betriebs des Schienennetzes zu entwickeln. Jedoch wird nicht näher auf eine Änderung der Werkstoffeigenschaften durch mögliche Schadensmechanismen und deren Folgen für die Funktionsfähigkeit und das zukünftige Verhalten des Bauteils bzw. Bauwerks eingegangen.

Urheberrechte nicht geklärt

Abbildung 1: Produktkategorien des Schienentransports und der Infrastruktur des Schienennetzes (B1943, IVL, 2010)

Die Autoren des Berichts weisen im Kapitel „Datenidentifikation und Wissenslücken“ darauf hin, dass es zwar möglich ist qualitativ hochwertige Daten der wichtigsten Materialströme und Energieressourcen zusammenzustellen, dass aber ein großer Handlungsbedarf besteht, um den Zugang zu benötigten Daten für Infrastrukturprojekte wie dem der „Bothnia Line“ zu verbessern. Ein Problem für die Modellierung der gesamten Umweltauswirkungen des Infrastrukturprojekts sei auch, dass es bisher keine verbindlichen Richtlinien für die Bestimmung von Randbedingungen gebe, welche für die Berechnung der Umweltauswirkungen aller verwendeten Materialien und Ressourcen benötigt werden.

Das Schwedische Institut für Umweltforschung berechnete eine Reduktion der CO₂-Emissionen von ca. 54 000 Tonnen pro Jahr durch die Verlagerung des Güterverkehrs von der Straße auf die neugebaute Bahnlinie. Für 1 km der Schienenstrecke wurde für einen Lebenszyklus von 60 Jahren eine CO₂-Emission von 3 900 Tonnen kalkuliert. In Bezug auf die CO₂-Emissionen konnte durch die aufgestellte Ökobilanz für die „Bothnia Line“ ein „Amortisierungszeitraum“ von 13 Jahren berechnet werden.

B.2.3 Schweiz - Bundesamt für Straßen²

Seit seiner Gründung 1998 ist das Bundesamt für Straßen (ASTRA) die Schweizer Fachbehörde für die Straßeninfrastruktur und den individuellen Straßenverkehr. Im Verantwortungsbereich des eidgenössischen Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) wirkt es für eine nachhaltige und sichere Mobilität auf der Straße.

Im Rahmen eines Forschungsprojekts in Kooperation mit dem Schweizerischen Bundesamt für Straßen (ASTRA) wurde am Institut für Bau- und Infrastrukturmanagement der ETH Zürich ein holistisches Modell für die Entwicklung und Optimierung von Erhaltungsstrategien und konkreten Erhaltungsvarianten für Straßennetze entwickelt.

Das Projekt besteht aus drei Teilprojekten mit unterschiedlichen Schwerpunkten:

Teilprojekt 1: Entscheidungsmodell-Lebenszyklusorientierte Strategiebildung und Unterhaltsvarianten für Straßennetze (siehe (Girmscheid 2007a))

Es beschäftigt sich mit Erhaltungsstrategien und Erhaltungsvarianten innerhalb einer übergeordneten Strategie (LC-Erhaltungsstrategiebildungsmodell) Die Entwicklung von Erhaltungsstrategien und Erhaltungsvarianten. Die LC Strategie wird durch die externe und interne Willensbildungsdimension aus Politik, Ökonomie, Ökologie und Technik der Gesellschaft geformt, die den Input bildet.

Räumliche Dimension: Aufteilung in Netz (flächenhafte Ausdehnung und vertikaler Aufbau des Straßenkörpers.)

Der Netzraum ist wiederum in Straßenverbindungen von A nach B, Teilabschnitte des Netzes und das gesamte Netz (Kreisstraßen, Bundesstraßen...) zu unterteilen. Aufgrund der Netzabschnittgliederung nach räumlichen Dimensionen und der Verkehrsbelastung lässt sich so eine holistische LC-Strategie für den Unterhalt entwickeln.

In der technischen und zeitlichen Dimension ist der Straßenzustand der zentrale Parameter in der Unterhaltsplanung, alle Entscheidungen im Straßenunterhalt hängen direkt und indirekt vom aktuellen Straßenzustand sowie seiner zu erwartenden Entwicklung ab.

Zur Beschreibung wird der Straßenzustand mit 5 Indices I1 bis I5 beschrieben. Sie bilden dabei Oberflächenschäden I1, Ebenheit in Längs- I2 und Querrichtung I3, Griffbarkeit I4 und die Tragfähigkeit I5 ab. Basierend auf einer visuellen Begutachtung oder durch Messungen wird der Zustand ermittelt und mit einer Skala von 0 (gut) bis 5 (schlecht) bewertet. Jede Straße wird entsprechend ihres strukturellen Aufbaus in eine Verhaltensklasse eingeteilt, die die unterschiedlichen Zustandsentwicklungen über die Zeit abbilden.

² <https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/fachleute/weitere-bereiche/forschung.html>

LC-Strategieplanung: die Unterhaltsstrategie für ein Straßennetz oder -Netzabschnitt ergibt sich aus externen und internen Faktoren:

Externe Faktoren und Anforderungen:

- Politisch (transnational, national, regional)
- Volkswirtschaftlich und regionalwirtschaftlich
- Ökologisch

Interne Bedingungen:

- Budgetvorgaben
- Technisches und ökonomisches Know-How
- Präferenzen der Entscheidungsträger

Aus diesen Vorgaben ergibt sich die Vision und Mission des Unterhaltsmanagements.

Hierbei entstehen die Grundlagen für die Entwicklung der LC-Unterhaltungsstrategie und LC-Unterhaltsvarianten mit den zugehörigen Maßnahmen der Instandsetzung und Erneuerung. Die Entscheidungsträger erhalten eine systematische Grundlage für die Entwicklung von Unterhaltsvarianten und für die lebenszyklusorientierte Planung von Maßnahmen.

Projektteil 2: Entscheidungsmodell-Lebenszyklusorientierte Wirtschaftlichkeitsanalyse von Unterhaltsstrategien für Straßennetze (siehe (Girmscheid, 2007a))

Der Schwerpunkt dieses Teilprojektes ist die Bewertung der Erhaltungsvarianten auf Grundlage einer Kosten-Barwert-Betrachtung der Stakeholder-Kosten (LC-Kosten-Barwert-Entscheidungsmodell) und einer Wirtschaftlichkeitsanalyse.

Hier erfolgt eine probabilistische, wirtschaftliche und lebenszyklusorientierte Bewertung der Varianten unter Beachtung der Kosten der am Straßenverkehr direkt involvierten Stakeholder, um die optimale Unterhaltsvariante und die dazugehörigen Maßnahmen nach dem ökonomischen Minimalprinzip zu ermitteln.

Das probabilistische LC-KBW (Lebenszyklus-Kosten-Barwert) -Entscheidungsmodell ermöglicht es den Entscheidungsträgern, die für die Stakeholder des Straßenverkehrs kostenminimale Variante für den Unterhalt zu identifizieren. Das Modell ermöglicht es ebenfalls die finanziellen Auswirkungen von vorgezogenen und aufgeschobenen Instandsetzungsmaßnahmen kostenmäßig zu quantifizieren. Darüber hinaus können Entscheidungsträger langfristige Konsequenzen, die mit Unsicherheiten verbunden sind, auf Netzebene probabilistisch simulieren.

Konstruktivistische Ansätze:

- Stakeholderabgrenzung auf Betreiber, Nutzer und direkte natürliche Umwelt
- Ökonomisches Minimalprinzip, da ein Mindeststandard/Mindestnutzen vorgegeben ist
- Dynamische Kostenbetrachtung

Es werden in diesem Modell:

- die räumlichen und zeitlichen Systemabgrenzungen klar definiert

Appendix B

- unterschiedliche Zustandsentwicklungen der Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen berücksichtigt
- Nutzerminderungen durch Zustandsentwicklungen (Ix) als Kosten der Stakeholder berücksichtigt
- Unsicherheiten bei künftigen Zahlungsströmen, Ausgaben und Geldwertentwicklung durch probabilistische Ansätze und Simulationsmethoden berücksichtigt

Die beiden beschriebenen Modulen ermöglichen es, die Auswirkungen von Entscheidungen im Straßenunterhalt monetär zu bewerten. Die Betrachtungen erfolgen lebenszyklusorientiert und basieren auf wahrscheinlichkeitsverteilten Parameter.

Entscheidungsträger erhalten dadurch die Möglichkeit, die Konsequenzen ihrer Entscheidung in einem frühen Planungsstadium zu prüfen und somit ein Optimum bezüglich der Bereitstellung einer möglichst guten Infrastruktur bei möglichst geringen Kosten zu finden.

Teil Projekt 3: Optimierungsmodell - Deterministische, lebenszyklusorientierte, dynamische Optimierung der Straßenunterhaltsmaßnahmen. (siehe (Fastrich and Girmscheid, 2010))

Im LC-Erhaltungsoptimierungsmodell wird in einem rekursiven Entscheidungsverfahren auf Basis des Dynamischen Programmierens eine optimale Erhaltungsvariante über einen lebenszyklusorientierten Betrachtungszeitraum entwickelt.

Diese Modelle bilden die Grundlage für die Optimierung des Erhaltungsmanagements und damit der Entwicklung von Erhaltungsstrategien und Erhaltungsvarianten, die über den Lebenszyklus der Straße zu einer minimalen Kostenbelastung für die Stakeholder führen.

Die grundlegenden Verfahren des Erhaltungsmanagements sind zwischen den unterschiedlichen Infrastruktureinrichtungen übertragbar und basieren meist auf Ansätzen, die auch in anderen Bereichen, wie z. B. beim Unterhalt von Produktionseinrichtungen, Anwendung finden.

Die Optimierung der Erhaltungsvarianten, d.h. die Suche nach einer optimalen Abfolge von Erhaltungsmaßnahmen über den Betrachtungszeitraum, setzt sich aus einer Abfolge von Einzelentscheidungen zusammen. In regelmäßigen Zeitabständen muss entschieden werden ob, und wenn ja, welche Erhaltungsmaßnahme durchgeführt werden soll. Dies führt zu einem dynamischen Entscheidungsproblem, in dem jede Einzelentscheidung den weiteren Zustandsverlauf und damit die folgenden Entscheidungen beeinflusst. Ziel der Optimierung ist es, nach dem ökonomischen Minimalprinzip, die Abfolge von Erhaltungsmaßnahmen zu finden, die über einen lebenszyklusorientierten Betrachtungszeitraum zu den geringsten Kosten für alle Stakeholder führt.

Mit dem LC-Erhaltungsoptimierungsmodell wurde der dritte Teil des holistischen LC-Erhaltungsmanagementmodells vorgestellt, in dem die Ergebnisse der beiden anderen Teilmodelle [(Girmscheid, 2007b)], (Girmscheid, 2007a)] zusammengeführt und zu einem Erhaltungsmanagements erweitert werden. Dem Entscheidungsträger im Straßenunterhalt wird mit dem Gesamtmodell ein Tool zur Definition, Bewertung und Optimierung von Erhaltungsstrategien und darauf aufbauenden Erhaltungsvarianten bereitgestellt. Mit der ergänzenden probabilistischen Simulation des Erhaltungsmanagements, die in einer folgenden Veröffentlichung dargestellt wird, wird es zusätzlich möglich, sämtliche Unsicherheiten bezüglich der Prognosen von Zustands- und Kostenwerten in die Betrachtung einzubeziehen und so zu einer fundierten Entscheidungsfindung zu kommen.

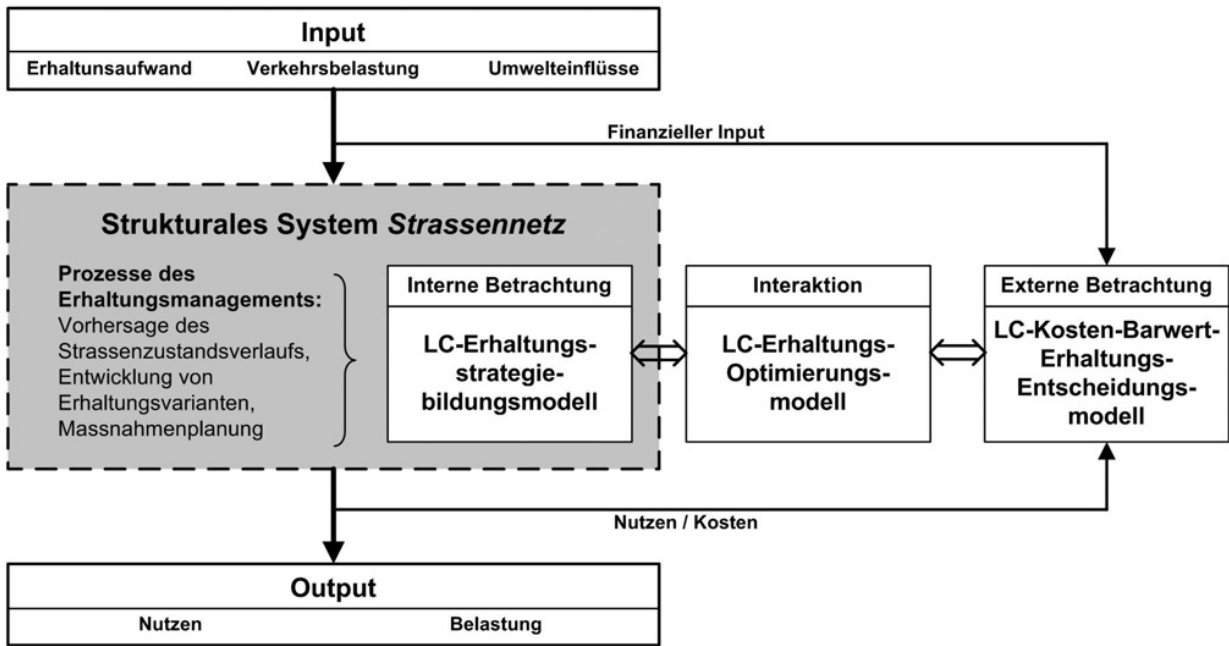


Abbildung 2: Einordnung des LC-Erhaltungsoptimierungsmodells in die Systemlandschaft und die bereits entwickelten Strategieentwicklungs- und Entscheidungsmodelle

B.2.4 Österreich

Asfinag- „Der Weg zum Lebenszyklusorientierten Infrastrukturbau - ein Leitfaden für Bauherren und Projektbeteiligte von Infrastrukturbauten. Eigentlich ist es offensichtlich, weswegen Auftraggeber von Infrastrukturbauwerken eine lebenszyklusorientierte Vorgehensweise befolgen sollten. Im Bahn- und Straßenbau, Kraftwerks- und Siedlungswasserbau liegt es auf der Hand, dass sowohl im Hinblick auf die Preise für die späteren Kunden (Euro je km, kWh, m³ Wasser etc.), als auch bezüglich der Auswirkungen auf die Umwelt und die Gesellschaft der gesamte Lebenszyklus des Bauwerkes zu betrachten ist. Des Weiteren haben lebenszyklusorientierte Infrastrukturprojekte eine viel größere Chance, die in sie gesteckten Erwartungen zu erreichen, wenn Organisation und Prozesse in einer zunehmend digitalisierten Wirtschaft mit einer Kultur der Kooperation und Partnerschaft aller beteiligten Akteure Hand in Hand gehen. Die Ausgewogenheit von Einzelinteressen und gemeinsamen Projektinteressen ist dabei von hoher Bedeutung. Grundlage dafür ist eine transparente Vorgehensweise, bei der die Verantwortungen der am Bauprozess beteiligten Organisationen und Personen auf Basis einer partnerschaftlichen Zusammenarbeit schnittstellenübergreifend formuliert und sichtbar für alle Beteiligten auf die gemeinsamen Ziele ausgerichtet sind.

Laut IG LEBENSZYKLUS BAU sind mehrere Faktoren ausschlaggebend für eine erfolgreiche, lebenszyklusorientierte Projektabwicklung. Die Ziele, die Auftraggeber mit Hilfe des vorliegenden Leitfadens verfolgen können, sind wie folgt definiert:

- Ausrichtung von Kostenentscheidungen auf den Lebenszyklus: kostenrelevante Entscheidungen werden auf die Gesamtkosten im Lebenszyklus des Bauwerkes und nicht auf Teilkostenkriterien, wie z.B. die Errichtungskosten oder die Minimierung von Dienstleistungskosten ausgerichtet.

- Projektphasenübergreifender Wissenstransfer: Wissen und Know-how aus späteren Projektphasen, der Betriebsphase, späteren Objektinstandsetzungen und erforderliche Reinvestitionen sollen möglichst in frühen Phasen zu Beginn des Projektes berücksichtigt werden, um ein auf den gesamten Lebenszyklus optimiertes Projekt zu schaffen.
- Berücksichtigung aller Kriterien der Nachhaltigkeit: Um einen langfristigen Nutzen für die Gesellschaft sicherzustellen, werden ökonomische Kriterien mit ökologischen und soziologischen Bereichen verknüpft.

Der Leitfaden dient daher auch der Bewusstseinsbildung für die Bedeutung der gelebten Kultur als wesentliche Voraussetzung für den Erfolg eines lebenszyklusorientierten Bauprojektes.

Ein wichtiger Punkt ist es auf Erfahrungen aus der Vergangenheit zurückzugreifen, denn Infrastrukturbetreiber verfügen im Allgemeinen über ein großes Portfolio an Infrastrukturbauwerken und damit über einen riesigen Erfahrungsschatz im Umgang mit diesen Bauwerken. Auf diese Datenbasis muss für eine lebenszyklusorientierte Vorgehensweise unbedingt zurückgegriffen werden. Des Weiteren wird darauf hingewiesen, dass die Verantwortlichen einen „phasenübergreifenden Wissenstransfer“ zwischen allen Beteiligten sicherzustellen, so dass Rückkopplungen stattfinden können.

B.3 Zusammenfassung

In verschiedenen Bereichen der Verkehrsinfrastruktur wurden Studien und Forschungsaufträge vergeben und bearbeitet, die sich mit unterschiedlichen Aspekten des Lebenszyklus von Infrastrukturbauwerken beschäftigen. Das Hauptaugenmerk in den Forschungsaufträgen steht die Nachhaltigkeit der Infrastruktur im Vordergrund.

All diese Studien und Berichte zeigen, dass sich die Betrachtung der Kosten jeglicher Art, seien es monetäre, aber auch gesellschaftliche und solche, die die Umwelt beeinflussen, von Bauwerken und Infrastrukturbauwerken, auch bei Ausschreibungen, weg von der einseitigen Betrachtung der Baukosten, hin zur Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus der Bauwerke geht.

Appendix C Objektebene - Begriffserklärungen und gemeinsame Begriffsdefinition

Im Folgenden werden die innerhalb dieses Berichtes verwendeten Begriffe kurz aufgeführt und beschrieben. Das damit verfolgte Ziel ist die Etablierung gemeinsamer Begrifflichkeiten:

Bauwerksinspektion: Die Bauwerksinspektion umfasst nach VV-WSV 2101 (BMVBS, 2010) Bauwerksinspektionsverwaltungsvorschrift die Bauwerksprüfung, die Bauwerksüberwachung und die Bauwerksbesichtigung. In den Richtlinien des BAST und des EBA wird dieser Begriff nicht verwendet.

Die Bauwerksprüfung ist die handnahe Untersuchung aller, auch schwer zugänglicher, Bauwerksteile durch sachkundiges Ingenieurpersonal, welches die statischen, konstruktiven und hydromechanischen Verhältnisse der Bauwerke beurteilen kann. Sie beurteilt den Zustand der Bauwerke hinsichtlich der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit, soweit dies für die Sicherheit und Ordnung der Anlagen und deren Verkehrssicherheit erforderlich ist. Die Bauwerksprüfung ist bei der BAST in der Richtlinie RI-EBW-Prüf (BMVI, 2017) gemäß (DIN 1076, 1999) geregelt.

Unter Bauwerksüberwachung versteht sich nach VV-WSV 2101 die intensive, erweiterte Sichtprüfung der Bauwerke durch sachkundiges Ingenieurpersonal. Sie beurteilt den Zustand der Bauwerke hinsichtlich der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit, soweit dies für die Sicherheit und Ordnung der Anlagen und deren Verkehrssicherheit erforderlich ist. Die Bauwerksbesichtigung ist nach VV-WSV 2101 die Kontrolle der Bauwerke auf offensichtliche Schäden durch sachkundiges Personal, welches in das Tragverhalten und die Funktionsweise des Bauwerkes eingewiesen ist. Sie erstreckt sich auf den allgemeinen baulichen Zustand der Bauwerke, soweit dies für die Sicherheit und Ordnung der Anlagen und deren Verkehrssicherheit erforderlich ist.

Die Tragfähigkeit: wird im Eurocode (DIN EN 1990 -1999) definiert als: die mechanische Eigenschaft eines Bauteils oder eines Bauteilquerschnitts im Hinblick auf Versagensformen, z. B. Biege- und Knickwiderstand, Zugwiderstand. Nach VV-WSV 2101 wird sie definiert als die Fähigkeit des Tragwerks und seiner tragenden Teile, allen auftretenden mechanischen Kräften oder Zwangsverformungen zu widerstehen, denen es während der Errichtungs- und Nutzungsdauer planmäßig standhalten soll. Bei fehlender Tragfähigkeit kommt es zum Einsturz oder zu anderen Formen des Tragwerks- bzw. Bauteilversagens. Die Grenzzustände der Tragfähigkeit sind im EuroCode beschreiben als: „Zustände, die im Zusammenhang mit Einsturz oder anderen Formen des Tragwerksversagens stehen.“

Die Gebrauchstauglichkeit: ist gemäß dem Merkblatt „Schadensklassifizierung an Verkehrswasserbauwerken“ (BAW, 2015) die Fähigkeit des Tragwerks und seiner Teile, die planmäßige Nutzung entsprechend festgelegter Bedingungen zu ermöglichen. Dazu zählt auch die Betriebssicherheit. Bei fehlender Gebrauchstauglichkeit kann die Anlage nicht entsprechend ihrer Funktion verwendet werden.

Schaden: Überschreitung des Toleranzbereiches für die Abweichung zwischen dem IST- und dem SOLL-Zustand eines Bauteils zum Zeitpunkt der Bauwerksinspektion im Hinblick auf die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit. Feststellungen, wie z. B. Betonabplatzungen, freiliegende Bewehrung, oder Korrosionsprodukte weisen dabei auf tiefergehenden Schäden hin.³

³ <http://wiki.baw.de/de/index.php/Schaden>

Nach DIN 1076 ist ein Schaden die Veränderung des Bauwerks- oder Bauteilzustandes, welcher zu einer Beeinträchtigung der Standsicherheit, der Verkehrssicherheit und oder der Dauerhaftigkeit führen kann.

Standsicherheit: In der RI-EBW-PRÜF wird unter Standsicherheit die Eigenschaft eines Bauwerkes bzw. einzelner Bauwerksteile verstanden, die planmäßigen Beanspruchungen (bei Nutzungsbeschränkungen entsprechend reduziert) schadlos aufnehmen zu können. Im BAWMerkblatt Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen⁴ ist die globale Standsicherheit definiert als die Sicherheit gegen Bruchzustände im Boden, bei denen die Gleitfläche verhältnismäßig tief in den Boden einschneidet. Die lokale Standsicherheit (auch: örtliche Standsicherheit) im Sinne des Merkblattes ist die Sicherheit gegen oberflächen-nahe Brüche im Boden.

Dauerhaftigkeit: nach den Richtlinien für die Erhaltung von Ingenieurbauten (RI-ERH-ING) - Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 RI-EBW-PRÜF - wird die Dauerhaftigkeit kennzeichnet durch die Widerstandsfähigkeit des Bauwerkes bzw. einzelner Bauwerksteile gegenüber Einwirkungen, um eine möglichst lange Nutzungsdauer unter Aufrechterhaltung der Standsicherheit und Verkehrssicherheit bei planmäßiger Nutzung und planmäßiger Bauwerksunterhaltung zu erreichen. Die Dauerhaftigkeit ist gegeben, wenn das Bauteil/Bauwerk keine oder lediglich geringfügige Mängel/Schäden aufweist, die im Rahmen der Bauwerksunterhaltung oder im Zuge von geringfügigen Instandsetzungsmaßnahmen behoben werden können. Es ist zu erwarten, dass das Bauteil/Bauwerk ohne Nutzungseinschränkungen entsprechend der Verkehrsbedeutung der Straße seine Nutzungsdauer erreicht.

Somit bedeutet Dauerhaftigkeit, dass die verlangten Gebrauchseigenschaften während einer festgelegten Zeitdauer (Nutzungsdauer, Lebensdauer) unter den planmäßigen Beanspruchungen und unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit (angemessene Herstellungs- und Instandhaltungskosten) erhalten bleiben.⁵

Verkehrssicherheit: Laut Richtlinien für die Erhaltung von Ingenieurbauten (RI-ERH-ING) - Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 RI-EBW-PRÜF - ist die Verkehrssicherheit ein Maß für die Bauwerksausbildung nach anerkannten Regeln der Technik zum jeweiligen Prüfzeitpunkt, welche die Anforderungen an Sicherheit und Ordnung hinsichtlich der gefahrlosen und bestimmungsgemäßen Nutzung des Bauwerkes beinhaltet. Sie schließt damit sowohl die Sicherheit für Verkehrsteilnehmer und Fahrzeuge als auch die Sicherheit für Personen und Sachen im Bauwerksumfeld ein. Dabei werden eine verständige, unter Würdigung der äußeren Umstände gebotene Vorsicht und die im Verkehr übliche Sorgfalt der Verkehrsteilnehmer vorausgesetzt. Somit bedeutet Verkehrssicherheit die Abwesenheit von unvermeidbaren Risiken und Gefahren bei Ortsveränderung von Personen oder Sachgütern (sogenannte Verkehrsobjekte), die beispielsweise in Verkehrsmitteln unter Einbezug der Verkehrsinfrastruktur und Verkehrsorganisation transportiert werden. Verkehrssicherheit bezeichnet in der Verkehrswissenschaft die Abwesenheit von unvermeidbaren Risiken und Gefahren bei der Ortsveränderung von Personen oder Sachgütern (soge-

⁴ BAWMerkblatt Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen (MSD), Ausgabe 2011

⁵ <https://www.beton.wiki>

nannte Verkehrsobjekte), die beispielsweise in Verkehrsmitteln unter Einbezug der Verkehrsinfrastruktur und Verkehrsorganisation transportiert werden⁶. Es handelt sich dabei (im Gegensatz zum maßnahmenbezogenen Verkehrssicherungswesen) um einen Oberbegriff, der grundsätzlich für alle Verkehrszweige Gültigkeit hat, häufig jedoch auf die Sicherheit im Straßenverkehr reduziert wird.

Zustandsanalyse: Maßnahmen zur Feststellung und Beurteilung des IST-Zustands, z.B. von Bauwerken. Hierzu gehören die Erstellung eines Plans zur Feststellung des IST-Zustands, die vorbereitenden Arbeiten, die Durchführung der Zustandsanalyse (die quantitative Ermittlung bestimmter Kenngrößen), die Vorlage und Auswertung der Ergebnisse und ihre Interpretation.

Instandsetzung: Maßnahmen zur Erhaltung oder Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit des Tragwerks, die über Maßnahmen der Bauwerksunterhaltung (DIN EN 1990-1999). Unter Instandsetzung wird also das Wiederherstellen des SOLL-Zustands oder der vollen Gebrauchstauglichkeit eines Bauwerks oder Bauteils in einer Ausführung, die dem gegenwärtigen Stand der Technik entspricht, verstanden. Die wesentlichen Schritte bei durchzuführenden Instandsetzungsmaßnahmen sind:

- Bewertung des IST-Zustands des Tragwerks (Zustandsanalyse)
- Feststellen der Schadensursachen
- Festlegen der Zielsetzungen von Schutz und Instandsetzung
- Auswahl von geeigneten Schutz- und Instandsetzungsprinzipien
- Auswahl von Instandsetzungsmethoden
- Festlegen der Produkt- und Systemeigenschaften
- Festlegen der Anforderungen an die Instandhaltung im Anschluss an Schutz und Instandsetzung

Instandhaltung: In DIN EN 1990-1999 wird unter Instandhaltung die Gesamtheit der Maßnahmen, die während der geplanten Nutzungsdauer des Tragwerks durchgeführt werden, um dessen Funktionsfähigkeit zu erhalten. Anders formuliert wird unter Instandhaltung die Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen während des Lebenszyklus eines Objekts zur Erhaltung des funktionsfähigen Zustands oder der Rückführung in diesen verstanden. Sie kann in Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Verbesserung unterteilt werden. Veränderungen bzw. Modifikationen zur Steigerung der Leistungsfähigkeit (Verstärken) zählen nicht zur Instandhaltung.

Prävention⁷: bezeichnet Maßnahmen zur Abwendung von unerwünschten Ereignissen oder Zuständen, die mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit eintreffen könnten, wenn nichts getan würde. Prävention setzt zunächst voraus, dass geeignete Maßnahmen verfügbar sind, um den Eintritt dieser Ereignisse zu beeinflussen. Der Begriff der Vorbeugung wird synonym verwendet.

Um einen gemeinsamen Konsens zu finden muss definiert/festgehalten werden, welche Begriffe und welche Begriffsdefinitionen in diesem Projekt zugrunde gelegt werden bzw. ob es inhaltliche Ergänzungen oder Änderungen gibt, um dem hier entwickelten Konzept gerecht zu werden.

⁶ Jörn Drewes: Verkehrssicherheit im systemischen Kontext. ,Techn. Univ., Inst. f. Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik, 2009, ISBN 3-9803-3631-X, Seite 104

⁷ <https://de.wikipedia.org/wiki/Prävention>

Appendix D Alterungs- und Schädigungsmechanismen

Im Folgenden werden betonschädigende Mechanismen, resultierende Schadensbilder, die entstehenden Auswirkungen auf das Bauwerk und die jeweilige Beseitigung der Schäden kurz erläutert. Die entsprechenden Schutz- und Instandsetzungsprinzipien werden in der DIN EN 1504 und der Richtlinie „Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen“ (RL-SIB) des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) geregelt.

D.1 Bewehrungskorrosion infolge von Carbonatisierung

Bei der chemischen Umsetzung von Portlandzementen mit Wasser entstehen aus den Klinkerphasen des Zementes (C_3S = Tricalciumsilikat, C_2S = Dicalciumsilikat, C_3A = Tricalciumaluminat, C_4AF = Tetracalciumaluminatferrit) verschiedene Hydratphasen, die im Wesentlichen den Zementstein bilden. Daneben werden je nach Zementtyp bis zu 20 Massen-% Calciumhydroxid, bezogen auf das Zementgewicht, freigesetzt. Durch dieses alkalische Reaktionsprodukt wird die hohe Alkalität des Betons (pH von ca. 12.3) sichergestellt, in der Praxis zu beobachtende höhere Werte sind auf die Gegenwart von Alkalihydroxiden im Portlandzement zurückzuführen (pH-Werte zwischen 13 und 13.8).

Die Carbonatisierung bezeichnet nun eine Reaktion von CO_2 mit Zementsteinphasen, vorzugsweise mit dem Reaktionsprodukt Calciumhydroxid, in Gegenwart von Wasser. Dabei diffundiert das CO_2 zunächst in das Porensystem des Werkstoffes, das zu mindestens teilweise mit der alkalischen Porenlösung gefüllt ist. Dort löst sich eine geringe Menge an CO_2 im Porenwasser unter Bildung von „Kohlensäure“ (H_2CO_3), die im nächsten Schritt nach einer klassischen Säure-Base-Reaktion zu Calciumcarbonat und Wasser reagiert. Der pH-Wert der Porenlösung und damit des Zementsteins sinkt dabei auf Werte zwischen 8 und 9 ab. Damit verbunden ist der Verlust der Passivschicht der Bewehrung, die sich kurz nach der Herstellung des Stahlbetons bei den dann vorherrschenden höheren pH-Werten als Eisenoxid-Schicht in Dicke der Größenordnung von Nanometern bildet und so Korrosionsprozesse verhindert. Der Verlust der Passivschicht ist aber nur eine Vorbedingung für eine Bewehrungskorrosion, auch Sauerstoff und Wasser müssen in ausreichender Menge vorhanden sein, damit alle Bedingungen für eine Bewehrungskorrosion erfüllt sind.

Darüber hinaus wird durch das gebildete Calciumcarbonat das Porengefüge verdichtet, da das Molvolumen des Calciumcarbonats höher ist als die des Calciumhydroxids. Weitere Zementsteinphasen, wie das aus dem C_3S und C_2S gebildete CSH-Gel, können über längere Zeiträume ebenfalls durch eine Carbonatisierung chemisch abgebaut und in Carbonate und andere Reaktionsprodukte umgewandelt werden. Das hat nicht nur eine Veränderung der Porenstruktur und eine Absenkung des pH-Werts der Porenlösung zur Folge, sondern kann zum vollständigen Abbau des Zementsteins führen (Stark and Wicht, 2013).

Je nachdem wie weit die Bewehrungskorrosion vorangeschritten ist, können leichtere Schäden, wie lokale Abplatzungen des Überdeckungsbetons, aber auch letztendlich ein Verlust der Tragfähigkeit bzw. Standfestigkeit eines Bauteils auftreten. Optische Indikatoren für die Bewehrungskorrosion sind Verfärbungen der Betonoberflächen durch Korrosionsprodukte (Rost), Rissbildungen und Abplatzungen des Betons. Eine weitergehende Beurteilung des Korrosionsfortschritts bzw. -umfangs kann mit Hilfe zerstörungsfreier Prüfmethode, wie Potenzialfeldmessungen oder durch minimalinvasive lokale Probenentnahmen mit anschließenden Laboruntersuchungen erfolgen.

Die Carbonatisierung ist im Wesentlichen ein diffusionskontrollierter Prozess, mittels einer Bestimmung der Carbonatisierungstiefe als Teil eines indikatorgestützten Lebenszyklusmanagements kann das Vorschreiten der Carbonatisierung und damit die zeitliche Entwicklung eines Korrosionsrisikos mit hoher

Sicherheit vorhergesagt werden. Eine in der Praxis eingeführte Gegenmaßnahme als Teil eines Präventionskonzepts ist die Applikation von acrylatbasierten Beschichtungssystemen, die den CO_2 -Transport in das Bauteil praktisch unterbinden, ein Voranschreiten der Carbonatisierungsfront als Voraussetzung der Absenkung des pH-Wert in unmittelbarer Nähe des Bewehrungsstahls wird so verhindert. Der technisch und wirtschaftlich optimale Zeitraum kann anhand des festgelegten Indikators mit vergleichsweise hoher Präzision festgelegt werden.

Die Instandsetzung eines Betonbauteils, bei dem durch die Carbonatisierung bereits eine vorangeschrittene Bewehrungskorrosion abläuft, wird zunächst mit dem Abtrag des Bewehrungsbetons bis zur Bewehrung begonnen. Die Bewehrung wird bspw. durch Feststoffstrahlen oder Höchstdruckwasserstrahlen gereinigt und anschließend gegebenenfalls mit einer Beschichtung vor weiterer Bewehrung geschützt. Anschließend werden die ursprünglichen Bauteildimensionen mit Instandsetzungsmörteln wiederhergestellt.

Alternativ kann auch das Verfahren des kathodischen Korrosionsschutzes eingesetzt werden. Dabei wird durch den Einbau einer technischen Vorrichtung eine elektrische Spannung zwischen Bewehrung (Katode) und einer als Anode wirkenden Gegenelektrode, häufig ein Titannetz oder Titanbänder, angelegt. Mit den, an den Elektroden ablaufenden elektrochemischen Teilprozesse kann die Korrosion sicher unterbunden werden (Stark and Wicht, 2013). Eine weitere technische Maßnahme beruht auf der Absenkung des Wassergehalts (z.B. Hydrophobierung), sodass die die Korrosionsgeschwindigkeit durch den zu geringen Wassergehalt auf ein vernachlässigbares Maß reduziert wird.

D.2 Bewehrungskorrosion durch Chloride

Nutzungsbedingt können chloridhaltige Wässer auf die Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur einwirken. Diese werden via Diffusion oder kapillares Saugen in die Betonrandzone transportiert. Erreicht die Chloridfront die Bewehrung und überschreitet dort eine kritische Chloridkonzentration starten die Korrosionsprozesse, unabhängig davon, ob eine Absenkung des pH-Wertes wie bei der Carbonatisierung stattgefunden hat.

Die chloridinduzierte Korrosion ist aufgrund seiner hohen technischen und wirtschaftlichen Bedeutung seit langer Zeit Gegenstand umfangreicher Studien. Der Chlorid-Grenzwert ist in erster Näherung proportional zum OH^- -Gehalt der Porenlösung des Betons (Tuutti, 1982). Wird der Chlorid-Grenzwert im Bereich des Bewehrungsstahls überschritten, dann wird die Depassivierung der Stahloberfläche aufgehoben. In Gegenwart von Feuchtigkeit und Sauerstoff kann es daraufhin zu einer lokalen Korrosion („Lochfraß“) kommen. Die chloridinduzierte Korrosion ist ein elektrochemischer Vorgang, der durch Potentialdifferenzen auf der Stahloberfläche verursacht wird (Stark and Wicht, 2013). Durchdringen die Chloride die Passivschicht des Stahls, reagieren sie mit dem Eisen unter Bildung von leicht löslichen Eisenchloriden bzw. beweglichen Eisenkomplexen, wobei die Chloride jedoch nicht verbraucht werden, sondern nach einer Folgereaktion der Eisenchloride mit OH^- -Ionen für weitere Umsetzungen wieder zur Verfügung stehen (Stark and Wicht, 2013). Weil in der genannten Folgereaktion OH^- -Ionen gebunden und damit der Porenlösung entzogen werden, sinkt der Chlorid-Grenzwert lokal ab und die Reaktionsgeschwindigkeit in der Korrosionszelle wird beschleunigt. Im Gegensatz zu diesen lokal ablaufenden Korrosionsprozessen ist eine, durch eine Carbonatisierung bedingte Bewehrungskorrosion durch eine flächige, langsam voranschreitende Korrosion gekennzeichnet.

Der Chloridgehalt in der Betonrandzone kann als Indikator für ein Korrosionsrisiko herangezogen werden. Die mathematische Beschreibung des Chloridtransportes in der Betonrandzone ist im Vergleich zur

Carbonatisierung deutlich komplexer. In diesem Fall überlagern sich der kapillare Transport und der diffusive Transport, der durch die chemisch-physikalische Interaktion (Physiosorption und Chemiesorption) zwischen Zementstein und Chloriden stark beeinflusst, d.h. verzögert wird. Wissenschaftliche Untersuchungen haben dabei gezeigt, dass die chloridhaltige Lösung während des Transports separiert wird oder anders ausgedrückt, die Wasserfront eilt der Chloridfront deutlich voraus. Man spricht hier vom „Huckepack-Transport“ oder „Chromatographie-Effekt“.

Prognosemodelle gehen im Allgemeinen von vereinfachten Annahmen, was eine langfristige Prognose zur Entwicklung der Chloridkonzentration auf Grund der Komplexität des Chloridtransports erschwert. Im Rahmen des indikatorgestützten Lebenszyklusmanagementkonzepts ist daher eine regelmäßige Beprobung an Bauwerke, für die ein hohes Risiko für das Stattfinden von chloridinduzierter Korrosion besteht, aber auch zur Kontrolle und zur Validierung der Prognosen und Prognosemodelle wichtig. Die regelmäßigen Beprobungen kann während der Hauptprüfungen der Bauwerksüberwachung vorgenommen werden. Die Größe der Proben, die entnommen werden müssen, ist abhängig von der für den Beton genutzten Sieblinie der Gesteinskörnung. Für den Verschluss der Bauwerksoberfläche müssen quellende, schwindkompensierende Mörtel eingesetzt werden. Auf diese Weise wird die Bauwerksintegrität nicht geschädigt. Ein so gestaltete Probenentnahme muss nicht an jedem Bauwerk vorgenommen werden. Für die Validierung der Prognosemodelle sowie für die Kontrolle der Bauwerksüberwachung können einzelne exemplarische Bauwerke für eine definierte Gruppe von Bauwerken ausgewählt werden. Eine solche Bauwerksgruppe muss vergleichbare Kriterien erfüllen: Zeitraum der Bauwerkserrichtung, Art der Konstruktion, verwendete Materialien, umgesetzte Präventionsmaßnahmen und äußere Randbedingungen wie Klima und Verkehrsbelastung. Alternativ können zukünftig entsprechende Daten auch durch den Einsatz von in Bauwerken eingebauten Sensoren ermittelt werden. Allerdings wird deren örtliche Auflösung als Nachteil angesehen, wenn eine Beurteilung größerer Bauteile oder Bauwerke ansteht.

Als Präventionsmaßnahmen zur Unterbindung des Chloridtransports sind sogenannte Oberflächenschutzmaßnahmen geeignet. Dazu gehören neben der Tiefenhydrophobierung auch Beschichtungen auf Basis von Polymeren oder zementgebundenen Systemen. Bei Letzteren haben sich aber in der Praxis immer wieder Schäden in Form von Abplatzungen und Ablösungen gezeigt, die sich zum Teil auf Applikationsfehler oder den chemisch-physikalischen Eigenschaften der Beschichtungsmaterialien zurückführen ließen. Im Gegensatz dazu werden die Tiefenhydrophobierungen, bereits seit mehr als 10 Jahren wissenschaftlich begleitet, unter anderem durch die Autobahndirektion Bayern-Süd erfolgreich bei neuen und Bestandsbauwerken eingesetzt. Bisherige Ergebnisse zeigen, dass bei einer sachgerechten Ausführung der Tiefenhydrophobierung über einen Zeitraum von mehr als 10 Jahren keine Chloride in den Beton eingedrungen sind. Vor allem bei großen Qualitätsschwankungen, ausgedrückt durch große, lokale Schwankungen in der Gesamtporosität, konnte so das Saugverhalten der Bauteile homogenisiert werden, was die Überwachung des Bauwerks wesentlich erleichtert und das Korrosionsrisiko deutlich reduziert.

Laufen bereits großflächige Korrosionsprozesse ab, muss im Zuge einer Instandsetzungsmaßnahme, der mit einem kritischen Chloridgehalt belastete Randbeton entfernt werden. Die weiterführenden Maßnahmen, wie Ersatz des chloridbelasteten Betons mit anschließender Reprofilierung oder der katodische Korrosionsschutz, sind denen vergleichbar, die auch bei durch Carbonatisierung geschädigten Bauteilen durchgeführt werden. Eine zusätzliche, alternative Maßnahme ist die elektrochemische Chloridextraktion, die sich trotz neuer Ansätze aus technischen Gründen in der Praxis bisher nicht durchgesetzt hat.

D.3 Frostangriff mit und ohne Tausalze

Der Schadensmechanismus von Frost- bzw. Frost-Tausalz-Schäden liegt im thermodynamischen System Zementsteinmatrix - Porenlösung begründet und ist nach neueren wissenschaftlichen Erkenntnissen wesentlich komplexer als in der Vergangenheit gedacht (Stark and Wicht, 2013).

Durch den Übergang von flüssigem zu gefrorenem Wasser findet unter Wärmeabgabe eine Volumenausdehnung um ca. 9 % statt. Der umgekehrte Prozess (Schmelzen) entzieht der Umgebung Wärme. Im Porengefüge des Betons können Druck, gelöste Stoffe in der Porenlösung und Oberflächenkräfte eine Gefrierpunktniedrigung bewirken. Die Folgen der Schadensmechanismen werden in makroskopische Spannungen und mikroskopische Veränderungen des Porengefüges unterteilt (Stark and Wicht, 2013).

Makroskopische Mechanismen:

- Unterschiedliche Temperatursausdehnungskoeffizienten von Zementstein, Gesteinskörnung und Eis können zu Zugspannungen führen, die im Bereich der Zugfestigkeit von Beton liegen. Die auftretenden Spannungen können in Gefügeschäden resultieren.
- Sinkt die Umgebungstemperatur unter 0 °C bildet sich ein Temperaturgradient aus, der dazu führt, dass die oberflächennahe Porenlösung bereits gefriert, während tieferliegende Bereiche des Betons für ein Gefrieren noch nicht ausreichend erkaltet sind. Bei der Anwendung von Tausalzen entsteht in oberflächennahen Bereichen des Betons ein Salzgradient, welcher in Abhängigkeit der Salzkonzentration den Gefrierpunkt erniedrigt. Bestehen diese Gradienten gleichzeitig, dann ist es möglich, dass die Oberflächentemperatur und die Temperatur einer tiefer liegenden Schicht unterhalb des Gefrierpunkts liegen, während die Temperatur einer Zwischenschicht durch die Einwirkung des Salzgradienten oberhalb des Gefrierpunkts liegt. Sinkt die Temperatur der Zwischenschicht daraufhin ebenfalls unter den Gefrierpunkt, dann kann es zu Abplatzungen der Betonoberfläche kommen. Dieser Prozess wird schichtweises Gefrieren genannt.

Mikroskopische Mechanismen:

- Die gefrorene Porenlösung verdrängt durch ihre Volumenzunahme ein äquivalentes Lösungsvolumen. Wenn kein Ausweichraum, wie wasserfreie Poren zur Verfügung steht, kann dadurch innerhalb des Betongefüges ein hydraulischer Druck auf die Porenlösung ausgeübt werden. Überschreitet der hydraulische Druck die Zugfestigkeit des Betons, wird dessen Gefüge geschädigt. Der hydraulische Druck ist einer der wichtigsten Faktoren der Schadensbildung durch den Frostangriff.
- Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Gefriertemperatur und der Porengröße: je geringer der Porendurchmesser, desto mehr wird die Gefriertemperatur herabgesetzt. Deshalb gefriert die Porenlösung in großen Poren zuerst, während die Porenlösung in Poren mit kleinen Radien flüssig bleibt. Weil der Dampfdruck über Wasser höher ist als derjenige über Eis, wird die Porenlösung aus kleineren Poren hin zu sich bildenden Eiskristallen in größeren Poren transportiert. Dieser Vorgang wird kapillarer Effekt genannt, dessen Folge die Schädigung des Werkstoffgefüges ist.

Derzeit gibt es keine, allgemein anerkannte einheitliche Theorie zum Schadensmechanismus des Frost- bzw. Frosttausalzangriff, aber es existiert nach (Stark and Wicht, 2013) ein guter Überblick über die wichtigsten schadigungsrelevanten Einflussgrößen. Diese sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Betonzusammensetzung	Technol. Einflüsse	Äußere Einflüsse
w/z-Wert	Transport	Temperaturverhältnisse
Zusatzmittel	Verdichtung	Feuchtigkeitsangebot
Gesteinskörnung	Nachbehandlung	Taumittel
Zement	Schutzmaßnahmen	

Tabelle 1: Wichtige Einflussgrößen auf den Frostangriff mit und ohne Tausalze (nach Stark und Wicht 2013)

D.4 Auslaugung durch anstehende Wässer

Grundsätzlich kann eine Auslaugung nur dann stattfinden, wenn sich der Baustoff in Kontakt mit Wasser befindet. Dies kann beispielsweise an voll oder teilweise gesättigten Bodenzonen stattfinden, oder auch durch den direkten und ständigen Kontakt mit Wasser wie in Trinkwasserbehältern, Kanälen oder bei Brückenpfeilern.

Beton bzw. der Zementstein bestehen unter anderem aus Calciumhydroxid und anderen mineralischen Verbindungen, die leicht bis sehr schwerlöslich sind. Je nach Randbedingungen können diese mehr oder minder wasserlöslichen Substanzen, durch anstehendes Wasser aus der Feststoffmatrix herausgelöst werden (s. Abbildung 3).

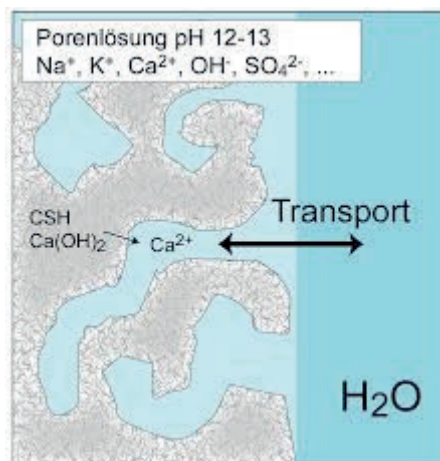


Abbildung 3: Auslaugung durch weiches Wasser (Vortrag von Wolfgang MEYER, Landesgütegemeinschaft für Bauwerks- und Betonerhaltung Rheinland-Pfalz / Saarland e.V. in Kaiserslautern am 6.3.2012)

Ist die gesamte Struktur wassergesättigt und in Kontakt mit Wasser, werden die gelösten Substanzen auf Grund von Diffusionsvorgängen aus dem Werkstoff in das Wasser transportiert. Dabei löst sich zuerst die Calciumhydroxidphase auf, bevor später die CSH-Phasen angegriffen werden. Als besonders werkstoffaggressiv gilt weiches Wasser, also Wasser, welches wenig gelöste Mineralien enthält.

Aber auch wenn sogenanntes hartes Wasser vorhanden ist, kann es zu Abbauprozessen kommen, zur sogenannten hydrolytischen Korrosion. Die hydrolytische Korrosion führt im Ergebnis zum Aufweichen und zur Zersetzung der Randzone zementgebundener Werkstoffe. Sie basiert auf Transportprozessen, die an komplexe chemische Reaktionen gekoppelt sind. Der Mechanismus lässt sich vereinfacht wie folgt beschreiben.

In hartem Wasser sind Hydrogencarbonationen in höherer Konzentration vorhanden. Diese werden auf Grund eines Konzentrationsgefälles in die Betonrandzone transportiert, was zu einer Verschiebung des Kalk-Kohlesäure-Gleichgewichts führt. Dadurch kommt es zur Ausfällung von Calciumcarbonat unter dem Verbrauch von Calciumhydroxid. Ist dieses vollständig umgesetzt, werden auch hier die CSH-Phasen abgebaut.

D.5 Sulfatangriff

Der Sulfatangriff steht für einen Schadensmechanismus, der vor allem für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur eine hohe Bedeutung hat. Gerade in Tunneln und bei Brücken sind in der jüngeren Vergangenheit durch die Einwirkung sulfathaltiger Wässer erhebliche Schäden entstanden, die nur mit hohem Aufwand Instand zu setzen sind.

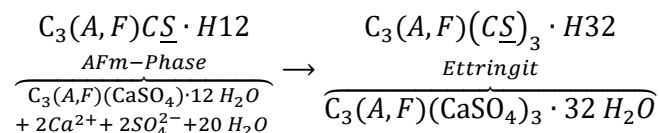
Generell unterscheidet man zwischen innerem und äußerem Sulfatangriff. Bei einem inneren Sulfatangriff wird durch gipshaltige Verunreinigungen in den Rohstoffen oder durch Mischfehler das werkstoffschädigende Sulfat bereits in der Werkstoffherstellung in das Bauteil eingebracht. Dieses tritt verhältnismäßig selten auf, sollte aber bei Fehlen anderer Erklärungen für einen Sulfatangriff nicht vollständig ausgeschlossen, sondern dann gezielt überprüft werden. Im weiteren Verlauf dieser Ausführungen wird auf diesen Typ eines Sulfatangriffs nicht weiter eingegangen werden. (Müllauer, 2013)

Ein äußerer Sulfatangriff wird nach seiner Erscheinungsform und seinen Mechanismen in zwei Arten unterteilt:

- a. treibender Sulfatangriff durch Ettringit und/oder Gips (im englischen auch als ESA (Ettringite Sulfate Attack bezeichnet)) und
- b. Sulfatangriff durch Thaumasit (im englischen auch als TSA (Thaumasite Sulfate Attack) bezeichnet).

Die chemischen Grundlagen lassen sich vereinfacht wie folgt beschreiben. Bei der Umsetzung mit Wasser reagieren die im Portlandzement neben einem geringen Anteil an Gips bzw. Halbhydrat enthaltenen vier Klinkerphasen Tricalciumsilikat (C_3S mit 60-70 Massen-%), Dicalciumsilikat (C_2S mit 10-20 % Massen), Tricalciumaluminat (C_3A mit 0-10 Massen%) und Tetracalciumaluminatferrit (C_4AF mit 0-10 Massen-%) zu den sogenannten Hydratphasen. Diese Hydratphasen und das bei der Hydratation gebildete Calciumhydroxid bilden den porösen Zementstein, der wie eine Art „Leim“ die Gesteinskörnung „verklebt“.

Wirken nun auf diesen Zementstein sulfathaltige Wässer (Sulfatquellen sind Niederschlagswasser, Grundwasser, Abwasser oder im Boden gelöste Sulfate) reagiert die Hydratphase des C_3A (C_4AH_{13}), bzw. das während der Hydratation ebenfalls gebildete „Monosulfat ($C_3AxCaSO_4x12H_2O$) mit dem Sulfat unter Bildung von Ettringit, das auch als „Trisulfat“ bezeichnet wird. Ettringit ist eine kristalline Verbindung mit der Zusammensetzung $C_3Ax(CaSO_4)_3x32H_2O$.



Mit der Bildung von Ettringit ist eine erhebliche Volumenzunahme im Vergleich zu den Ausgangsstoffen verbunden. Nachdem die Festigkeit durch das Auskristallisieren von Ettringit in den Poren zunächst ansteigt, bauen sich im weiteren Verlauf der Ettringitbildung mechanische Spannungen auf, die zunächst

zu feinen Rissen im Gefüge führen. Diese feinen Risse wachsen zu größeren bzw. großen Rissen zusammen einen kompletten Festigkeitsverlust bedingen.

Ein Sulfatangriff auf Beton wird von zahlreichen chemischen und physikalischen Parametern (z.B. Temperatur, Sulfatgehalt im anstehenden Wasser, etc.) beeinflusst und ist immer eine Kombination aus den für die Sulfationen maßgebenden Transportbedingungen und den chemischen Reaktionen der Sulfationen mit dem Bindemittel bzw. dessen Hydratationsprodukten.

Durch die zunehmende Verwendung von Zusatzstoffen, wie Carbonatfiller in den Portlandkalksteinzementen, ist eine Zunahme in dem „Sulfatangriff unter Thaumasitbildung“ zu beobachten, dem ein komplexer chemischer Prozess zugrunde liegt. Zu einen tritt er nur bei Temperaturen unterhalb von 10 °C und in Gegenwart von sulfat- und carbonathaltiger Wässer auf.

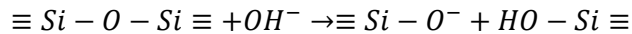
Im Gegensatz zu einem „Sulfatangriff unter Ettringitbildung“ wird bei diesem Mechanismus das festigkeitsbildende CSH-Gel angegriffen und reagiert zu Thaumasit ($\text{Ca}_3\text{Si}(\text{OH})_6(\text{CO}_3)(\text{SO}_4)\cdot 12\text{H}_2\text{O}$). Es ist nachvollziehbar, dass dies mit einer vollständigen „Entfestigung des Betons“ verbunden ist. Deshalb und durch die verhältnismäßig hohe Schädigungsgeschwindigkeit wird das potenzielle Risiko für ein Bauwerk bei einer Thaumasitbildung als deutlich höher als bei einer Ettringitbildung eingestuft.

D.6 Schäden durch Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR)

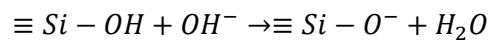
Auch wenn die ersten Schäden infolge der Alkali-Kieselsäure-Reaktion bereits vor rund 90 Jahren entdeckt wurden, sind bis heute nicht alle Einzelheiten der AKR abschließend geklärt (Chappex and Scrivener, 2012). Dennoch konnten auf Grundlage der zahlreichen Untersuchungen Richtlinien und Testverfahren in den betroffenen Ländern erarbeitet werden, welche aus betontechnologischer Sicht weitgehend die Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion ermöglichen (Malvar et al. 2001). In Deutschland wurde 1973 vom Deutschen Ausschuss für Stahlbeton die erste Fassung der sogenannten Alkali-Richtlinie herausgegeben (DAfStb, 2013). Sie regelt die Überwachung, Prüfung und Anwendung sogenannter alkaliempfindlicher Zuschläge.

Bei der Alkali-Kieselsäure-Reaktion reagieren Kieselsäurebestandteile der Zuschläge mit der alkalihaltigen Porenflüssigkeit. Dabei bildet sich als Reaktionsprodukt ein Gel, das bestrebt ist, Wasser aufzunehmen. Die damit verbundene Volumenvergrößerung führt lokal zu Quelldrücken, die die Expansion und Deterioration des Betons zur Folge haben. Der auf diese Weise grob skizzierte Mechanismus der Alkali-Kieselsäure-Reaktion wird im Folgenden detailliert dargelegt.

Die Reaktion der alkaliempfindlichen Zuschläge mit der Porenflüssigkeit beschränkt sich zunächst auf die Oberflächen der reaktiven Zuschlagspartikel. Dabei werden in einem ersten Schritt die Siloxan-Gruppen der Kieselsäure durch die Hydroxid-Ionen aufgebrochen und durch Silanol-Gruppen ersetzt (Prezzi 1997):



In einem zweiten Schritt reagieren die Silanol-Gruppen mit weiteren Hydroxid-Ionen (Dent Glasser and Kataoka, 1981):



Die aus den obigen Reaktionen resultierenden negativen Ladungen ziehen Alkali-Ionen (Na^+ , K^+) aus der Porenflüssigkeit an. Diese positiv geladenen Ionen diffundieren zu den Reaktionszonen hin und gleichen

die negativen Ladungen der angelösten Kieselsäure aus. Beide Reaktionen wiederholen sich kontinuierlich, wobei sich - die Hydroxid und Alkali-Ionen immer weiter in die Zuschlagspartikel hineinbewegen.

Die Ausführungen machen deutlich, dass letztlich drei Dinge in hinreichender Menge vorhanden sein müssen, damit die Alkali-Kieselsäure-Reaktion ablaufen kann: (Bangert, 2004)

- alkaliempfindliche Kieselsäurebestandteile in den Zuschlägen
- gelöste Alkalien in der Porenflüssigkeit
- Feuchtigkeit im Beton

Während die ersten beiden Punkte baustofftechnische Einflussfaktoren sind, stellt der dritte Punkt einen umgebungsbedingten Einflussfaktor dar.

Treten Schäden durch AKR bei Bauwerken bzw. Bauteilen mit Gesteinskörnung aus einem bestimmten Abbaugbiet häufig auf, so sollte die Gesteinskörnung aus diesen Abbaugebieten vor Auslieferung auf Alkaliempfindlichkeit untersucht werden. Des Weiteren zeigen wissenschaftliche Untersuchungen, dass bspw. die Verwendung puzzolanischer Zusatzstoffe wie Silikastaub oder Steinkohlenflugasche eine schädigende AKR vermieden werden kann⁸.

D.7 Schadensmechanismen durch Schwinden und Kriechen

Zementgebundene Werkstoffe sind heterogene Werkstoffe, die ein komplexes chemisch-physikalisches Werkstoffverhalten zeigen. Viele dieser Prozesse lassen sich auf die Porenstruktur des Werkstoffes zurückführen. Dazu gehört auch das Schwinden und Kriechen des Mörtels oder Betons.

Nach der Herstellung des Werkstoffes ist dieser zunächst wassergesättigt. Je nach den Umgebungsbedingungen (z.B. Temperatur, relative Feuchtigkeit) beginnt das Bauteil von der Oberfläche her beginnend unmittelbar nach dem Ausschalen zu trocknen. Der Prozess läuft solange ab, bis das Bauteil im Gleichgewicht mit der umgebenden Atmosphäre steht. Beispielsweise reduziert sich der Wert für die Wassersättigung von 100% im neuhergestellten Bauteil auf den Wert von 60%, falls die relative Luftfeuchtigkeit im umgebenden Raum 60% beträgt. Je nach Bauteildimension kann dieser Prozess über Monate oder Jahre gehen bis sich das Feuchtegleichgewicht eingestellt hat.

Mit dieser Trocknung ist auch eine Volumenkontraktion des Werkstoffes verbunden, dass allgemein als Schwinden bezeichnet wird. Das Schwinden bewirkt einen Aufbau mechanischer Spannungen, die vor allem bei jungen Bauteilen – die mechanische Festigkeit ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht ausreichend hoch – zur Rissbildung (Krakelee-Risse) oder bei Putzen und Beschichtungen zur Ablösung vom Untergrund führt. Das Ausmaß des Schwindens hängt unter anderem vom Zementgehalt im Werkstoff bzw. von der relativen Luftfeuchtigkeit in der Atmosphäre ab.

Von Schwinden spricht man, wenn die beschriebene Volumenkontraktion des Werkstoffes ohne äußere Lasteinwirkung stattfindet. In realen Bauwerken ist dies aber beitragenden Bauteilen praktisch nicht der Fall. Die beobachtete Verformung bei diesen Bauteilen ist höher Neben der trockenungsbedingten Verformung (Schwinden) gibt es einen zusätzlichen lastabhängigen Anteil an der Verformung, der als Kriechen bezeichnet wird. Darunter versteht man die Zunahme der Verformungen unter konstanter Spannung. Das Kriechen wird durch einen weiteren Prozess überlagert, der als Relaxation bezeichnet wird.

⁸ K. Schmidt, Verwendung von Steinkohleflugasche zur Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion im Beton, Dissertation, TU München, 2009

Dabei nimmt die Spannung bei konstanter Dehnung ab, was auf Umlagerungen im Werkstoff zurückzuführen ist. Schwinden, Kriechen und Relaxation treten bei statisch relevanten Bauteilen zudem in der Regel gleichzeitig auf. Einfachheitshalber werden sie üblicherweise aber getrennt betrachtet, wobei empirische, an Versuchsdaten kalibrierte Modelle zur Anwendung gelangen.

D.8 Unzureichende Baustoffqualität bzw. mangelhafte Baustoffverarbeitung

Werkstoffe des Bauwesens setzen sich aus einer Vielzahl von mineralischer bzw. polymerer Komponenten zusammen, die in ihrer Wechselwirkung zur Entwicklung der gewünschten Werkstoffeigenschaften beitragen. Mängel bei den Rohstoffen oder Fehler bei der Herstellung der Werkstoffe können einen erheblichen Einfluss auf die Funktionsfähigkeit, noch stärker aber auf die Dauerhaftigkeit der damit hergestellten Bauteile bzw. -werke haben. Das soll am Beispiel des Betons aufgezeigt werden.

Für die Dauerhaftigkeit ist hauptsächlich die Betonqualität der entscheidende Faktor. Diese ist abhängig von den Rohstoffen, der Herstellung des verarbeitungsfähigen Betons und nicht zuletzt von dessen Einbau bzw. der Nachbehandlung der damit hergestellten Bauteile. Typische Beispiele für die Ursachen der Mängel sind:

- dass der Wasserzementwert erhöht wird, da das Material zu zähflüssig ist
- dass der Werkstoff nicht richtig oder unzureichend verdichtet wird
- dass keine bzw. eine nicht sachgemäße Nachbehandlung des Betonbauteils erfolgt ist.

Abhängig von der gewünschten Festigkeitsklasse wird eine Betonrezeptur auf Grund von Erfahrungswerten und empirischen Versuchen formuliert. Ein angemischter Beton ist schnellstmöglich zu verarbeiten und mit geeigneten Geräten zu verdichten, wodurch der formbare Werkstoff entlüftet wird, so dass ein möglichst dichtes Betongefüge entsteht. Rütteln, Schleudern, Stampfen, Stochern, Spritzen und Walzen sind je nach Betonkonsistenz und Einbaumethode geeignete Verdichtungsverfahren. Eine Entmischung des Frischbetons ist zu vermeiden, da sich diese negativ auf die Zementhydratation bzw. die Gefügeentwicklung und damit auf die Dauerhaftigkeit auswirkt. Der Vorgang der Entmischung kann neben einer zu hohen Fallhöhe in die Schalung auch durch zu langes Verdichten entstehen. Frischbeton sollte ausschließlich im Temperaturbereich zwischen +5 und +30°C verarbeitet werden. Liegt die Temperatur außerhalb dieses Bereichs muss ggf. die Schalung geheizt oder der Beton gekühlt werden.

Des Weiteren ist eine Nachbehandlung erforderlich. Diese dient zum Schutz der Betonoberfläche gegen Austrocknung, was eine geschlossene, dichte und dauerhafte Betonoberfläche gewährleistet. Dabei ist darauf zu achten, dass für die Hydratationsreaktion des Zementes in der Betonrandzone genügend Wasser zur Verfügung steht.

D.9 Schädigungen durch veränderte Nutzungs- und/oder Umweltbedingungen

Veränderte Klimabedingungen, welche zu extrem Wetterlagen führen, wie beispielsweise extrem heiße Sommer mit wenig Niederschlag und feuchte milde Winter mit viel Niederschlag und hohen Temperaturschwankungen, können die verwendeten Werkstoffe und damit Bauwerk schädigen. Das gilt insbesondere für den Zeitraum, in dem das Bauwerk erstellt wird.

Aber auch Veränderungen der Nutzungsbedingungen haben häufig einen negativen Einfluss auf die Substanz. Beispiele sind: erhöhtes Verkehrsaufkommen im Großen und Ganzen, aber auch die vermehrte

Verlagerung des Gütertransports auf die Straße oder auch Umleitungsstrecken auf Strecken, welche ursprünglich nicht für Schwerlasttransport ausgelegt waren. Diese Faktoren haben schädigende Auswirkungen auf die Bausubstanz, insbesondere von Brücken.

Im Bereich Wasserstraßen können klimatische Veränderungen, wie längere Perioden von Niedrigwasser oder immer häufigeres Auftreten von Hochwasser gravierende Schäden auslösen.

Um Schäden durch Umwelteinflüsse und Lasten von vornherein hinauszuzögern oder zu verhindern wurden Beton-Expositionsklassen etabliert, welche in der folgenden Tabelle den potenziellen Schadensmechanismen ausgelöst durch herrschende Umweltbedingungen gegenübergestellt werden.

Auf der Objektebene sollen die wahrscheinlichsten Schadensmechanismen an Ingenieurbauwerken, in Bezug auf die für die Bauteile verwendeten Materialien, identifiziert werden. Dabei ist von vorrangigem Interesse welche Bauteile des Bauwerks, mit welchem Risiko, bestimmten Alterungs- bzw. Schadensmechanismen ausgesetzt sind. Dafür ist es unabdingbar, dass ein Ingenieurbauwerk unterteilt in seine einzelnen Bauteile betrachtet wird und dabei jeweils die lokalen Umgebungsbedingungen miteinbezogen werden.

Klasse	Potentieller Schadensmechanismus aufgrund von Umgebungsbedingungen
X0	Alle Umgebungsbedingungen, ausgenommen Frostangriff, Verschleiß, chemischer Angriff
XC (1-4)	Bewehrungskorrosion durch Carbonatisierung, Exposition in Luft und Feuchte
XD (1-3)	Bewehrungskorrosion durch chloridhaltiges Wasser/Taumittel, ausgenommen Meerwasser
XS (1-3)	Bewehrungskorrosion durch Chloride aus Meerwasser
XF (1-4)	Frostangriff mit und ohne Taumittel (Frost-Tau-Wechsel bei durchfeuchtetem Beton)
XA (1-3)	Betonkorrosion durch chemischen Angriff (natürlich. Böden, Grund-, Meer- und/oder Abwasser)
XM (1-3)	Betonkorrosion durch Verschleißbeanspruchung (mechanische Beanspruchung)
W-O,F,A,S	Betonkorrosion infolge Alkali-Kieselsäurereaktion und

Tabelle 2: Expositionsklassen und potenzielle Schadensmechanismen, gemäß DIN 1045 - 2, Tabelle 1 (Stand 2016-11)

Auf Basis der Unterteilung können die jeweiligen Bauteile bestimmten Expositionsklassen zugeordnet werden, welche in DIN 1045 - 2 in Tabelle 2 aufgeführt und erläutert sind. In der nachfolgenden Tabelle ist eine Zusammenfassung der genannten Expositionsklassen aufgeführt. Je nach dem welchen Umgebungsbedingungen die Bauteile lokal ausgesetzt sind, können bestimmte Schadensmechanismen ausgelöst werden. Von besonderer Bedeutung ist hierbei inwiefern/in welcher Häufigkeit/ob dauerhaft oder wechselnd die Bauteile Feuchtigkeit bzw. Wasser ausgesetzt sind. Denn über das Transportmedium Wasser können betonaggressive/-schädigende Stoffe in die Werkstoffmatrix der Bauteile eingetragen werden und bei Vorhandensein von Feuchtigkeit und CO₂ aus der Umgebungsluft können reaktive Prozesse an den Werkstoffoberflächen stattfinden, welche langfristig eine Schädigung der Betonbewehrung zur Folge haben können.

In der folgenden Grafik wird die Idee der Expositionsklassen am Beispiel einer Brücke verdeutlicht. Dargestellt ist der Querschnitt einer Brücke, dabei ist der Brückenpfeiler auf einer Seite in direktem Kontakt mit dem Wasser eines Kanals und auf der anderen Seite verläuft eine Straße parallel zur Brücke. Jedem

einzelnen Bauteil wurden die entsprechenden Expositionsklassen zugeteilt. Am Beispiel des Brückenpfeilers in der Abbildung 4 kann deutlich gemacht werden, dass die Expositionsklassen eines einzelnen Bauteils verschieden sein können, je nachdem welche lokalen Umgebungsbedingungen vorliegen. Auf der linken, der dem Wasser des Kanals zugewandten Seite müssen die Expositionsklassen XC4, XF1 und XA 1 angesetzt werden, weil diese Seite direkt an den Kanal angrenzt und deshalb wechselnd nass und trocken, in Abwesenheit von Taumitteln mäßig wassergesättigt und in geringem Maß der potentiellen Schadstofffracht des Kanalwassers ausgesetzt ist. Der rechten Brückenpfeilerseite werden die Klassen XD1 und XF2 zugeordnet, weil diese Seite der Fahrzeugstraße zugewandt ist und damit potenziell dem mit Taumittel versetzten Sprühnebel der Fahrbahn ausgesetzt ist.

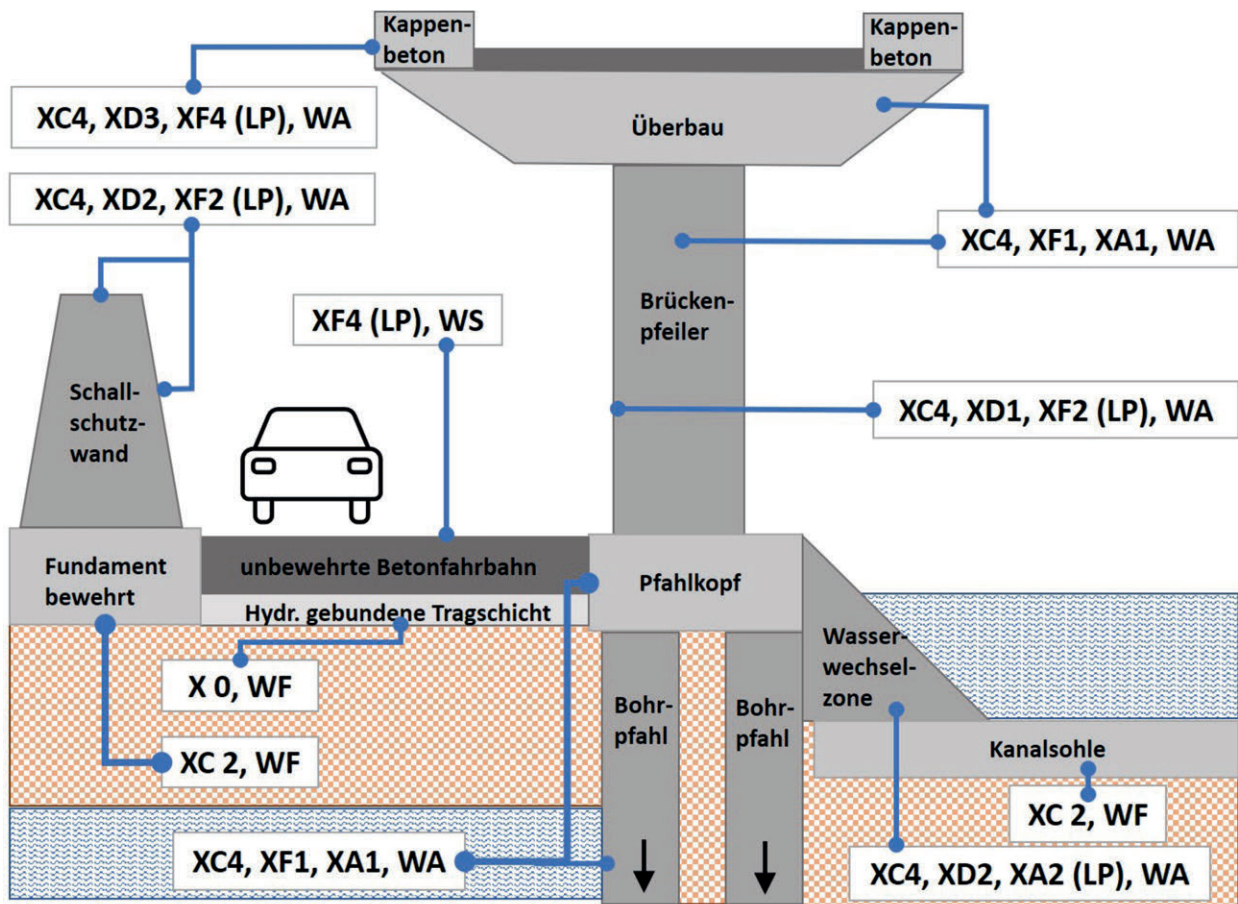


Abbildung 4: Expositionsklassen an einer Stahlbetonbrücke⁹

⁹ <http://www.zimmermann-beton.de/transportbeton/?ingenieurbau>

Appendix E Prognosemodelle für ausgewählte Alterungs- und Schädigungsmechanismen

Alle in Appendix D vorgestellten Alterungs- und Schädigungsmechanismen sind chemisch induziert, ihnen liegen reaktive Transportprozesse zu Grunde. Diese Prozesse und ihre zeitliche Veränderung können mathematisch beschrieben werden, bspw. mittels partieller Differentialgleichungen. Durch das Aufstellen dieser mathematischen Gleichungen werden sogenannte Vorhersage- oder Prognose-Modelle entwickelt, mit deren Hilfe die Schadensentwicklung vorhergesagt werden kann. Im Folgenden werden für wichtigsten Alterungs- und Schädigungsmechanismen Beispiele für solche Prognosemodelle vorgestellt.

E.1 Carbonatisierung

Die älteste und allgemein anerkannte Theorie zur Beschreibung des Carbonatisierungsfortschritts stützt sich auf das Prinzip der Quadratwurzel, d.h. auf das zweite Fick'sche Gesetz siehe (Nygaard and Leemann, 2012):

$$x = \sqrt{\frac{2Dc}{a}} \cdot \sqrt{t}$$

wobei D die effektive Diffusionsfähigkeit von Kohlendioxid ist, c die entsprechende Konzentration in der Umgebungsluft, a die Konzentration reaktiver Verbindungen und x die Tiefe der Carbonatisierung als Funktion der Zeit t .

Bei der Anwendung des zweiten Fick'schen Gesetzes gilt es, eine Reihe vereinfachender Annahmen zu machen: Zunächst ist D keine Konstante, sondern eine Größe, die sich im Verlauf der Zeit aufgrund der Hydratation und der Carbonatisierung ändert, wobei beide die Mikrostruktur verändern. Aber auch das Mikroklima im Beton und besonders der Feuchtigkeitsgehalt im Zementstein beeinflussen D .

Daher wird die Carbonatisierungsraten-Konstante k eingeführt, die die verschiedenen entscheidenden Faktoren miteinbezieht. Damit stellt sich in vereinfachter Form das Fick'sche Gesetz wie folgt dar siehe auch ((Thomas et al., 2000), (Wierig, 1984), (Lagerblad, 2005)):

$$x = k \cdot \sqrt{t}$$

Wie aus der Gleichung ersichtlich ist, schließt der k -Faktor folglich die Eigenschaften des Betons, das Alterungsverhalten und auch variierenden Umweltbedingungen mit ein.

Die „Quadrat-Wurzel-Regel“ ist allgemein akzeptiert und in Wissenschaft und Praxis weit verbreitet. Es sei hier aber erwähnt, dass basierend auf die Arbeiten von Schiessl (Schiessl, 1976) eine modifizierte Form der Gleichung verwendet wird. Danach schlägt er (Schiessl, 1976) vor, dass auf der Grundlage empirischer Werte, die zeigen, dass der Exponent für Zeit geringer als 0.5 ist, eine mathematische Beziehung mit einem Verzögerungsfaktor b und einem unabhängigen infiniten Wert für die Carbonatisierungsfront, x_{∞} vor verwendet wird (siehe Abbildung 5):

$$t = -\frac{a}{b} \left(x + x_{\infty} \cdot \ln \left(1 - \frac{x}{x_{\infty}} \right) \right)$$

Wobei

$$x_{\infty} = \frac{D_{eff} \cdot \Delta c}{b}$$

Parameter	Bezeichnung
D_{eff}	Effektiver Diffusionskoeffizient
Δc	Konzentrationsunterschied
a	Konstante
b	Verzögerungsfaktor

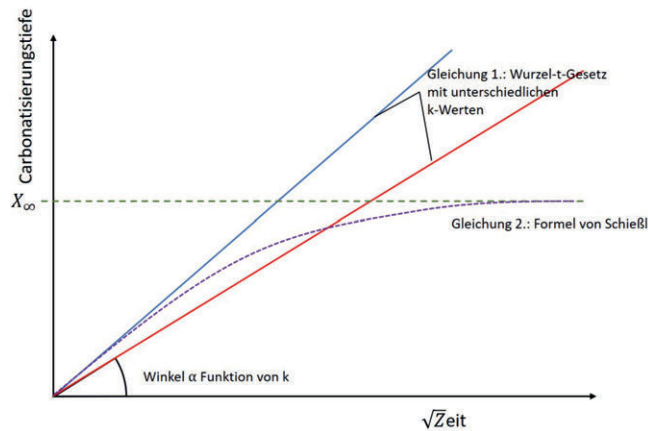


Abbildung 5: Schematische Darstellung zweier unterschiedlicher mathematischer Ansätze zur Beschreibung der Tiefe der Carbonatisierungsfrent (Equ.1 Wurzel-t-Gesetz mit unterschiedlichen k -Werten, Equ.2 Formel von Schießl)

Obwohl Abweichungen vom Fick'schen Gesetz in mehreren Versuchen mit unterschiedlichen Expositionsbedingungen, Betonmischungen usw. immer wieder festgestellt wurden, sind der k -Faktor und die "Quadrat-Wurzel-Regel", wie von Thomas et al. (Thomas et al., 2000) festgestellt, eine vernünftige Approximation für die zu erwartende Eindringtiefe der Carbonatisierung und gelten inzwischen mehr oder weniger als Standard, um die Carbonatisierung zu berechnen bzw. vorherzusagen.

Eine komplexere Beschreibung des Carbonatisierungsfortschritts ist das Modell der CEB Task Group V(1997) (siehe (Lindvall, 1998) und (Gehlen, 2000)):

$$x_c(t) = \sqrt{\frac{2 \cdot k_e \cdot k_c \cdot D_{Eff,0} \cdot \Delta C_s}{a}} \cdot \sqrt{t} \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^w$$

$$\frac{D_{Eff,0}}{a} = R_{NAC,0}^{-1}$$

$$R_{NAC,0}^{-1} = k_t \cdot R_{NACC,0}^{-1} + \varepsilon_t R_{NAC}^{-1} = k_e \cdot k_c \cdot R_{NAC,0}^{-1}$$

$$W(t) = \left(\frac{t_0}{t}\right)^w$$

Appendix E

Die vereinfachte Form dieses Modells zur Bestimmung der Carbonatisierungstiefe $x_c(t)$ lautet^{10,11}:

$$x_c(t) = \sqrt{2 \cdot k_e \cdot k_c \cdot (k_t \cdot R_{NACC,0}^{-1} + \varepsilon_t) \cdot \Delta C_s \cdot \sqrt{t} \cdot W(t)}$$

Im Detail sind folgende Parameter zu berücksichtigen:

Parameter	Beschreibung
$D_{Eff,0}$:	effektiver CO_2 - Diffusionskoeffizient von trockenem, carbonatisiertem Beton, bestimmt an definiert hergestellten und vorgelagerten Prüfkörpern in $[m^2/s]$
a:	CO_2 - Bindekapazität von Beton in $[kgCO_2/m^3]$
$R_{ACC,0}^{-1}$:	inverser effektiver Carbonatisierungswiderstand von trockenem Beton, bestimmt an definiert hergestellten und vorgelagerten Prüfkörpern mit Hilfe der Schnellcarbonatisierungsmethode ACC in $[m^2/s/kgCO_2/m^3]$
$R_{NAC,0}^{-1}$:	inverser effektiver Carbonatisierungswiderstand von trockenem Beton, bestimmt an definiert hergestellten und vorgelagerten Prüfkörpern mit Hilfe der Normalcarbonatisierungsmethode NAC in $[m^2/s/kgCO_2/m^3]$
R_{NAC}^{-1} :	inverser effektiver Carbonatisierungswiderstand von trockenem Beton, bestimmt an individuell hergestellten und trocken vorgelagerten Prüfkörpern mit Hilfe der Normalcarbonatisierungsmethode NAC in $[m^2/s/kgCO_2/m^3]$
k_t :	Verhältniswert, der Carbonatisierungswiderstände, die unter diffusionsbeschleunigenden Bedingungen (ACC) ermittelt werden, in Widerstände überträgt, die unter natürlichen Carbonatisierungsbedingungen im Labor bestimmt werden (NAC) in [-]
ε_t :	Errorterm in der Einheit von $R_{ACC,0}^{-1}$ zur Berücksichtigung prüftechnisch bedingter Fehler beim Prüfverfahren ACC
ΔC_s :	CO_2 -Konzentrationsgradient, der als Variable der Einwirkung bei der Bemessung zu berücksichtigen ist in $[kgCO_2/m^3]$
k_e :	Parameter zur Berücksichtigung der Feuchteabhängigkeit von R_{NAC}^{-1} in [-], $k_e = f(RH)$ mit $RH =$ relative Luftfeuchte
$W(t)$:	Witterungsfunktion in [-]
w:	Parameter (Exponent) zur Berücksichtigung der mikroklimatischen Bedingungen an der betrachteten Betonoberfläche (z. B. $w = f(ToW, pSR)$, mit ToW: Häufigkeit der Beregnung, pSR: Schlagregenwahrscheinlichkeit für vertikale Bauteile)
kc:	Parameter zur Berücksichtigung der Nachbehandlungsabhängigkeit von R_{NAC}^{-1} in [-]
t:	Betonalter in [s]
t0:	Referenzzeitpunkt in [s]

Auf der Widerstandsseite befindet sich der inverse Grundwiderstand $R_{ACC,0}^{-1}$, der sich aus der Diffusionseigenschaft $D_{Eff,0}$ und der Bindekapazität a des Materials ergibt und einige Übertragungsparameter, die den unter definierten Bedingungen geprüften Materialwiderstand in einen Materialwiderstand übertra-

¹⁰ Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): Prüfung von Beton: Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048. Berlin: Beuth. - In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (1991), Nr. 422

¹¹ Comité Euro-International du Béton (CEB): Durable Concrete Structures CEB Design Guide; Second Edition 1989. Lausanne: Comité Euro-International du Béton. - In: Bulletin d'Information (1989), Nr. 182

gen helfen, der sich unter individuellen Randbedingungen im Rahmen der Vorhersagegenauigkeit einstellt. Auf der Einwirkseite befinden sich die Grundeinwirkung ΔC_s und zwei Übertragungsparameter der Umwelteinwirkung. Im Einzelnen sind dies:

- Grundmaterialwiderstand (inverser Widerstand): $R_{ACC,0}^{-1}$
- Grundeinwirkung: ΔC_s
- Übertragungsparameter Testmethode: k_t, ε_t
- Übertragungsparameter Bauausführung: k_c
- Übertragungsparameter Umwelteinwirkung: k_e, w

E.1.1 Bestimmung der Korrosionswahrscheinlichkeit - Depassivierungswahrscheinlichkeit

Der Bewehrungsstahl wird dann depassiviert, wenn die Carbonatisierungsfront $x_c(T)$ größer als die Bewehrungsdeckung d_c ist. Analog zu der oben aufgestellten Gleichung die folgende Grenzzustandsgleichung (Gehlen, 2000)

$$d_c = x_c(t) = \sqrt{2 \cdot k_e \cdot k_c \cdot (k_t \cdot R_{NACC,0}^{-1} + \varepsilon_t) \cdot \Delta C_s \cdot \sqrt{t} \cdot W(t)}$$

Die Versagenswahrscheinlichkeit auf Grund des Carbonatisierungsfortschritts:

$$p_f = p \left\{ d_c - \sqrt{2 \cdot k_e \cdot k_c \cdot (k_t \cdot R_{NACC,0}^{-1} + \varepsilon_t) \cdot \Delta C_s \cdot \sqrt{t} \cdot W(t)} < 0 \right\} < p_{Ziel}$$

Wobei p_{Ziel} der maximal zulässige Wert für die Bemessung der Versagenswahrscheinlichkeit p_f ist.

Der Bewehrungsstahl ist dann korrosionsfähig, wenn der Chloridgehalt im Tiefenbereich des Betondeckungsmaßes d_c den Grenzwert C_{crit} überschritten hat. Die dazugehörige Grenzzustandsgleichung lautet:

$$C_{crit} = C_{S,\Delta x} \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \frac{d_c - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{k_e \cdot k_t \cdot D_{RCM,0} \cdot T \cdot \left(\frac{t_0}{T}\right)^a}} \right]$$

Parameter	Bezeichnung
d_c	Betondeckung in [m]
T	Zeitpunkt der chloridinduzierten Depassivierung des Bewehrungsstahls in [s]

Die Versagenswahrscheinlichkeit analog zur Versagenswahrscheinlichkeit auf Grund der Carbonatisierung:

$$p_f = p \left\{ C_{crit} - C_{S,\Delta x} \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \frac{d_c - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{k_e \cdot k_t \cdot D_{RCM,0} \cdot T \cdot \left(\frac{t_0}{T}\right)^a}} \right] < 0 \right\} < p_{Ziel}$$

Zur Berechnung der Grenzzustandüberschreitungswahrscheinlichkeit p_f müssen nun die am Prozess beteiligten Parameter, unter Umständen weiter aufgeschlüsselt, statistisch quantifiziert werden.

E.2 Chlorideindringtiefe

Für den konvektiven Transsport von Schadstoffen, z.B. Chloridionen ist das kapillare Saugvermögens der Zementsteinmatrix entscheidend. Bei praxisüblichen Feuchtegehalten von Betonen werden Chlorideindringtiefen von 40-70% der Wassereindringtiefen erreicht.¹²

Für das hier zu beschreibende Eindringen von Chlorid in den Beton kommen prinzipiell folgende Transportmechanismen in Betracht, wobei in der Praxis auch eine Überlagerung dieser verschiedenen Mechanismen beobachtet wird:

- **Diffusion:** Der energetische Antrieb für Stofftransporte infolge Diffusion sind Unterschiede in der Konzentration des zu transportierenden Mediums innerhalb und außerhalb des porösen Feststoffes.
- **Kapillares Saugen:** Der Antrieb für das kapillare Saugen von Flüssigkeiten in luftgefüllten Kapillarporen sind Adhäsionskräfte zwischen den Molekülen der Flüssigkeit mit den darin enthaltenen Ionen und denen des Feststoffes.
- **Permeation:** Der Antrieb für die Permeation von Stoffen in Kapillarporen ist ein von außen auf das durchströmende Medium wirkender Druck Δp .

Viele Literaturquellen, z. B. (Gehlen, 2000), (Bamforth, 1997), (Costa and Appelton, 1999), (Swamy et al., 1994) stimmen darin überein, dass sich sowohl der effektive Chloriddiffusionskoeffizient $D_{Eff,C}$, als auch die Chloridoberflächenkonzentration C_s nicht unabhängig von der Auslagerungszeit t verhalten.

Darüber hinaus ist insbesondere bei intermittierender Chloridbeaufschlagung, wie z. B. Praxisbeobachtungen von (Tang, 1997) und (Costa and Appelton, 1999) belegen, zusätzlich davon auszugehen, dass der Ansatz des 2. Fick'schen Diffusionsgesetzes nicht ohne Einschränkungen dazu geeignet ist, analysierte Chloridprofile über den gesamten Tiefenbereich x zufriedenstellend abzubilden.

Die Chloridoberflächenkonzentration wird unter Berücksichtigung des schwankenden Feuchtehaushaltes der sogenannten Konvektionszone bereits in der Ersatztiefe Δx angesetzt. Für den Chloridgehalt des Betons in der Tiefe x (Bauteiloberfläche: $x = 0$ m) zum Zeitpunkt t gilt:

$$C(x, t) = C_{s,\Delta x} \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{Eff,C}(t) \cdot t}} \right]$$

Und der effektive Diffusionskoeffizient wird bestimmt durch:

$$D_{Eff,C}(t) = k_e \cdot D_{RCM,0} \cdot k_t \cdot A(t)$$

$$A(t) = \left(\frac{t_0}{t} \right)^a$$

Im Detail sind demnach folgende Eingangsparameter zu berücksichtigen:

¹²Th. Teichmann, Schriftreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 12, Einfluss der Granulometrie und des Wassergehalts auf die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Zementstein

Parameter	Beschreibung
$D_{\text{Eff},c}(t)$:	Effektiver Chloriddiffusionskoeffizient von Beton zum Beobachtungszeitpunkt t , [10-12m ² /s]
$D_{\text{RCM},0}$:	Chloridmigrationskoeffizient von wassergesättigtem Beton, bestimmt zum Referenzzeitpunkt t_0 an definiert hergestellten und vorgelagerten Prüfkörpern, [10-12m ² /s]
$C_{S,\Delta x}$:	Chloridkonzentration in Tiefe Δx in Abhängigkeit der anstehenden Chlorideinwirkung, zum Zeitpunkt t [M.-%/z]
k_e :	Parameter zur Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit von $D_{\text{Eff},c}(t)$
a :	Exponent zur Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit von $D_{\text{Eff},c}(t)$, Altersexponent, [-]
k_t :	Übertragungsparameter, um Abweichungen zwischen Chloridmigrationskoeffizienten, die unter beschleunigten Bedingungen (Rapid Chloride Migration - DRCM,0) ermittelt werden, und Diffusionskoeffizienten, die unter natürlichen Bedingungen z. B. im Labor bestimmt werden (Chloride Profiling Method - DCPM,0), berücksichtigen zu können, [-]
A :	Alterungsterm, [-]
t :	Betonalter in [s]
t_0 :	Referenzzeitpunkt in [s]
Δx :	Tiefenbereich in [m], der durch ggf. intermittierende Chlorideinwirkung bedingt, vom Fick'schen Verhalten abweichende Chloridkonzentrationen, zeigt.
x :	Tiefe in [m], mit einem korrespondierenden Chloridgehalt $C(x,t)$

E.3 Lösender Angriff

Ein typisches Prognosemodell für die Säurekorrosion von Zementstein hat wurde von Gunter Herold (Herold, 1999) erstellt. Bei diesem Prognosemodell kann auf Grundlage eines beobachteten Massenverlustes eine Prognose für den verwendeten Beton bei veränderten Randbedingungen erstellt werden. Einflussfaktoren in diesem Modell sind der w/b -Wert, der pH-Wert der angreifenden sauren Lösung und die Temperatur. Die resultierende Gleichung für den Betonabtrag in Abhängigkeit der genannten Parameter ist in der folgenden Gleichung dargestellt:

$$X(t) = (a_I \cdot t^{a_{II}}) \cdot [1 + (T_x - T_0) \cdot a_{III}] \cdot \frac{c_x}{c_0} \cdot 0,4074 \cdot \left(1 + w/z_x - \frac{w}{b_0}\right) \cdot 2,5$$

Parameter	Beschreibung
a_I :	Parameter=0,162404[mm/d]
a_{II} :	Parameter=0,8181[-]
a_{III} :	Parameter=0,0214[1/K]
c_0 :	Konzentrationskonstante=0,0001[mol/l]
t :	Korrosionsaktive Zeit[d]
T_0 :	Temperatur = 288,0[°K]
w/z :	Wasser-Zement-Wert = 0,5[-]
$X(t)$:	Betonantrag [mm]

Die hier verwendeten Parameter a_I , a_{II} und a_{III} wurden entsprechend der Vorgehensweise (Herold, 1999) für die eigenen Untersuchungen aus den Schädigungsprozessen der Versuchsbauwerke ermittelt.

E.4 Treibender Angriff bei Einwirkung von Sulfaten

Der Sulfatangriff ist ein treibender Angriff auf den Beton, der sich vor allen auf das Porengefüge auswirkt. Hierbei müssen unterschiedliche Reaktions- und Transportprozesse berücksichtigt werden. Zum einen die Ionendiffusion durch ein wassergesättigtes, poröses Material. Hierbei müssen der Konzentrationsgradient und der chemische Aktivitätskoeffizient berücksichtigt werden. So kann die Diffusion der Ionen mittels der folgenden modifizierten Diffusionsgleichung beschrieben werden¹³:

$$\frac{\partial(\varphi c_i)}{\partial t} = \text{div} \left(\frac{D_i^0}{\tau} (\text{grad}(c_i)) + c_i \text{grad}(\ln \gamma_i) \right)$$

- c_i : Konzentration des i-ten Ions
 D_i^0 : Diffusionskoeffizient des i-ten Ions in freier Lösung
 φ Porosität
 τ Tortuorosität
 γ_i chemische Aktivitätskoeffizient des i-ten Ions

Beim Sulfatangriff liegen häufig hohe Ionenkonzentrationen vor. Deshalb wird nicht die Größe Konzentration c , sondern die Aktivität a verwendet. Zur Bestimmung der chemischen Aktivität a der Ionen wird die modifizierte Davies-Gleichung zur Bestimmung verwendet, da sie für diese Fälle bessere Ergebnisse als andere Formulierungen liefert:

$$\ln \gamma_i = \frac{Az_i^2}{1 + a_i B \sqrt{I}} + \frac{(0.2 - 4.17e - 5I)Az_i^2 I}{\sqrt{1000}}$$

- z_i : Valenz des Ions
 I : Ionenstärke der Lösung dargestellt durch:

$$I = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N z_i^2 \cdot c_i$$

Dabei sind A und B die temperaturabhängigen Parameter gegeben durch:

$$A = \frac{\sqrt{2} F^2 e_0}{8\pi(\varepsilon_k RT)^{3/2}}$$

$$B = \sqrt{\frac{2 F^2}{\varepsilon_k RT}}$$

- e_0 : elektrische Ladung eines Elektrons ($1,602e^{-19}\text{C}$)
 a_i : spezieller Parameter abhängig von der Species
 F : Faraday-Konstante (96488.46 C/mol)
 R : universelle Gaskonstante (8.3143 J/mol/K)
 T : Temperatur (298 K)
 ε_k : elektrische Leitfähigkeit des Mediums, bei Wasser gg. durch

¹³ Numerical simulation of cementitious materials degradation under external sulfate attack, S. Sarkar a,1, S. Mahadevan a,*, J.C.L. Meeussen b,2, H. van der Sloot b,2, D.S. Kosson a,1 a Dept. of Civil and Environmental Engineering, Vanderbilt University, Nashville, TN 37235, United States, b Environmental Risk Assessment Group, Energy Research Center of the Netherlands, Petten, The Netherlands

Appendix E

$$\varepsilon_k = \varepsilon_0 \varepsilon_r$$

ε_0 : elektrische Leitfähigkeit von Vacuum ($8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m)

ε_r : Dielektrizitätskonstante von Wasser (80)

Veränderung der Porosität:

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta V_S$$

φ aktuelle Porosität

φ_0 Anfangsporosität

ΔV_S : Veränderung des Feststoffvolumens

$$\Delta V_S = \sum_{m=1}^M (V_m - V_m^{init})$$

M Anzahl der festen Phasen

V_m^{init} : Anfangsvolumen der m-ten Festphase

V_m : berechnetes Volumen der m-ten Festphase

Durch die Veränderung des Porenvolumens verändert sich auch der Diffusionseigenschaften, beschrieben mittels des Korrekturfaktors $H_D(\varphi)$ definiert als:

$$H_D(\varphi) = \frac{e^{\frac{4.3\varphi}{V_p}}}{e^{\frac{4.3\varphi_0}{V_p}}}$$

V_p : Zementsteinvolumen

$H_D(\varphi)$ ist der Korrekturfaktor mit dem der Diffusionskoeffizient (D_i^0/τ) multipliziert werden muss.

Für eine verlässliche Prognose muss auf Langzeituntersuchungen mit realitätsnahe Sulfatkonzentrationen zurückgegriffen werden. Hohe Sulfatkonzentrationen, wie sie bspw. zur Beschleunigung des Schädigungsprozesses unter Laborbedingungen verwendet werden, lösen gleichzeitig Gipstreiben aus, das so in der Praxis nur selten vorkommt. Solche Langzeituntersuchungen zum Ettringittreiben wurden vom US Bureau of Reclamation (USBR, Denver, m Colorado) durchgeführt. In diesen Studien wurden Mörtelprismen in eine 2,1%ige Na_2SO_4 -Lösung bei Raumtemperatur eingelagert. Die experimentell ermittelten Resultate bildeten dann die Grundlage für das Prognosemodell von (Kurtis et al., 2000). Danach lassen sich folgende Beziehungen aufstellen: Es gilt für $C_3A < 8$ Gew.-%, bezogen auf den Zementgehalt:

$$\text{Exp} = 0,0246 + 0,0180 \cdot (t \cdot w/b) + 0,00016 \cdot (t \cdot C_3A)$$

Für $C_3A > 10$ Gew.-%, bezogen auf den Zementgehalt, gilt:

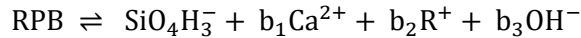
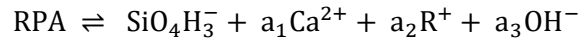
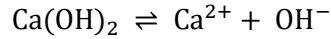
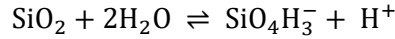
$$\ln \text{Exp} = -3,753 + 0,930 \cdot t + 0,0997 \cdot \ln(t \cdot C_3A)$$

mit

Parameter	Beschreibung
C_3A :	C_3A -Gehalt in Gew.-% bezogen auf den Zementgehalt
Exp:	prozentuale lineare Treibdehnung
t:	Zeit in Jahren
w/z:	Wasser-Zement-Wert

E.5 Alkali-Kieselsäure-Reaktion

Die Beschreibung der AKR ist nicht ganz einfach, da es sich hierbei um einen reaktiven Transportprozess handelt, durch den es Veränderungen der Feststoffmatrix kommt. Im Modell von (Liaudat et al., 2015) wird für die Reaktionen angenommen:



Die Reaktionen 1-4 beschreiben Lösungs-/Ausfällungsreaktionen von Kieselsäure, Portlandit, RPA und RPB. a_i und b_i sind hierbei stöchiometrische Koeffizienten, die zu bestimmen sind. Die letzte Reaktion beschreibt die Selbstionisierung von Wasser.

Für den Transport im Porenraum wird das 2. Fick'schen Gesetz beschrieben:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi c^\beta) = \nabla^T(D^\beta \nabla c^\beta) + q^\beta$$

mit $\beta = s$ (Silikate), c (Calcium) und r (Alkali), ϕ bezeichnet die Gesamtporosität des Systems, c^β [mol/m³] steht für die Konzentration der gelösten Spezies in der Porenlösung, D^β [m²/s] ist der effektive Diffusionskoeffizient im porösen Medium. Für q^β [mol/(m³ · s)].

Für die Reaktionsgeschwindigkeitsrate der einzelnen Spezies gilt:

$$q^\beta = - \sum_{\alpha} a_{\alpha}^{\beta} \Gamma^{\alpha}(\mathbb{C}, \mathcal{N})$$

Dabei ist a_{α}^{β} ist der dimensionslose stöchiometrische Koeffizient der verschiedenen Spezies β bei der Bildungsreaktion der Feststoffe α . Γ^{α} [mol/(m³ · s)] ist die Reaktionsgeschwindigkeit der Feststoffe.

Die Bestimmung der Geschwindigkeitsraten q^β erfordert die Aufstellung der kinetischen Gesetze für die oben genannten Reaktionen, um die entsprechenden Reaktionsraten Γ^{α} zu erhalten.

Für die Lösungs- und Fällungsreaktionen wird angenommen, dass diese nicht gleichzeitig, sondern abwechselnd in Abhängigkeit von ψ_{α} , dem Sättigungsindex, stattfinden. Für die festen Spezies α gilt $(1 - \psi_{\alpha})$. Für $\alpha > 1$ ist die Lösung übersättigt, in diesem Fall läuft dann die Ausfällungsreaktion ab. Ist $\psi_{\alpha} < 1$, ist die Lösung untergesättigt und es kommt zur Lösung der Feststoffe. Für $\alpha = 1$ herrscht thermodynamisches Gleichgewicht.

Für die obigen Reaktionen gelten folgende Sättigungsindizes:

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi^S = \frac{a^s a^h}{K_{sp}^S} \\ \psi^C = \frac{a^c (a^{oh})^2}{K_{sp}^C} \\ \psi^{RPA} = \frac{a^s (a^c)^{a_1} (a^{r_1})^{a_2} (a^{oh})^{a_3}}{K_{sp}^{RPA}} \\ \psi^{RPA} = \frac{a^s (a^c)^{a_1} (a^{r_1})^{a_2} (a^{oh})^{a_3}}{K_{sp}^{RPA}} \end{array} \right.$$

wobei a^β die thermodynamische Aktivität der gelösten Spezies β ist, K_{sp}^a die Sättigungskonstante der Lösungsreaktion der Feststoffe α ist und a_i, b_i die stöchiometrischen Koeffizienten der RPA- und RPB-Reaktionen sind. Die thermodynamische Aktivität der gelösten Spezies wird berechnet als

$$\alpha^\beta = \gamma^\beta c^\beta$$

wobei γ^β der Aktivitätskoeffizient bestimmt mittels der Davies-Gleichung. Um die Aktivitäten der chemischen Spezies zu bestimmen, die in die oben beschriebenen kinetischen Gesetze eingreifen, ist es unerlässlich, die Gleichgewichtskonzentrationen von H^+ und OH^- für bestimmte Konzentrationen von Silikaten (c_s), Kalzium (c_c) und Alkalien (c_r) in der Lösung zu bestimmen. Dies wird durch das Lösen eines nicht-linearen Gleichungssystems erreicht, das durch die Gleichgewichtsgleichung der Dissoziationsreaktion des Wassers sowie die elektrische Ladungsbilanz der Porenlösung gegeben ist. Die Massenbilanzgleichung der Feststoffe α ist gegeben durch

$$\frac{\partial(\mathcal{N}^\alpha \mathcal{U})}{\partial t} = \mathcal{U} \Gamma^\alpha$$

wobei $\mathcal{N}^\alpha \mathcal{U}$ die Gesamtstoffmenge in Mole) der Feststoffe α ist. Das Gesamtvolumen des porösen Mediums oder der Diskontinuität, $[m^3]$, wird angegeben durch

$$\mathcal{U} = \mathcal{U}^{cp} + \sum_{\alpha} \mathcal{U}^{\alpha} + \sum_{\vartheta} \mathcal{U}^{\vartheta}$$

wobei \mathcal{U}^{α} das Volumen der reaktiven Feststoffe α , \mathcal{U}^{ϑ} das Volumen der inerten festen Phase \mathcal{U}^{ϑ} und \mathcal{U}^{cp} Materialvolumen der Festphase ist bzw. Volumenanteil, der mit freiem Wasser gefüllt ist:

$$\mathcal{U}^{\alpha} = \left(\frac{\eta^{\alpha}}{1 - \phi^{\alpha}} \right) \mathcal{N}^{\alpha} \mathcal{U}$$

wobei η^{α} das Molvolumen und ϕ^{α} die Porosität der Feststoffe α ist. Die Porosität ist definiert als das Verhältnis zwischen dem Gelwasservolumen und dem gesamten scheinbaren Volumen der Phase α . Zu beachten ist, dass die Porosität für Silica und Portlandit Null ist ($\phi^S = \phi^C = 0$). Die \mathcal{U}^{cp} in Diskontinuitäten und das kontinuierliche poröse Medium werden berechnet mit

$$\mathcal{U}^{cp} = \left\langle 1 - \sum_{\alpha} \mathcal{U}^{\alpha} + \sum_{\vartheta} \mathcal{U}^{\vartheta} \right\rangle$$

Appendix E

wobei die Macaulay-Klammern $\langle X \rangle$ für "den positiven Teil von X " steht, d.h. wenn $X < 0$, $\langle X \rangle = 0$ sonst $\langle X \rangle = X$.

Unter der Annahme, dass der Beton vollständig Wasser gesättigt ist, ist das Gesamtvolumen der Porenlösung U_p , welche sowohl freies als auch Gelwasser enthält, gleich dem Gesamtporenvolumen und der sauberen Rissöffnung, d.h.

$$u^{ps} = u^{cp} + \sum_{\alpha} \phi^{\alpha} u^{\alpha} + \sum_{\vartheta} \phi^{\vartheta} u^{\vartheta}$$

Die Gesamtporosität ϕ wird bestimmt durch

$$\phi = \frac{u^{ps}}{u}$$

Das Volumen der Reaktionsprodukte (RPA und RPB) kann so lange wachsen, bis der verfügbare Raum erschöpft ist, z.B. $u^{cp} = 0$. Wird dieser Wert überschritten, so führen die weitere Zunahme der Volumina der RPA und RPB zu Dehnungen oder Verschiebungen im Gefüge. Die Größe dieser auferlegten Dehnungen oder Verschiebungen ergibt sich aus der Hypothese, dass die RPs inkompressibel sind und dass ihr scheinbares Molvolumen unabhängig von ihrem Spannungszustand ist. Diese Annahmen führen zu folgenden Ausdrücken für die volumetrische Dehnung auf Grund der AK-Reaktion (ε_v^o) im porösen Medium.

$$\frac{\partial \varepsilon_v^o}{\partial t} = \begin{cases} 0 & \text{if } u^{cp} > 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} & \text{if } u^{cp} = 0 \end{cases}$$

und die von der ASR Rissbildung a_n^o in Diskontinuitäten

$$\frac{\partial a_n^o}{\partial t} = \begin{cases} 0 & \text{if } u^{cp} > 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial a_n^{ep}}{\partial t} & \text{if } u^{cp} = 0 \end{cases}$$

Mit $\frac{\partial a_n^o}{\partial t}$ steht für die Rissbildung aufgrund mechanischer Belastungen. Positive Werte für $\frac{\partial a_n^o}{\partial t}$ vergrößert den Raum, der für die Reaktionsprodukte zur Verfügung steht, und reduziert die Rate der chemischen Rissbildung. Hierbei wurde die Volumenveränderung durch die mechanische Belastung vernachlässigt wurde, da davon zu erwarten ist, dass $\frac{\partial \varepsilon_v^o}{\partial t} \ll \frac{\partial u}{\partial t}$.

Das kinetische Gesetz, welches die Lösung-/Fällung von Portlandit-, RPA- und RPB berücksichtigt wird, hat folgende Form:

$$\Gamma^{\alpha} = \begin{cases} \phi k_d^{\alpha} (\psi^{\alpha} - 1) & \text{if } \psi^{\alpha} < 1; \mathcal{N}^{\alpha} > 0 \\ \phi k_f^{\alpha} (\psi^{\alpha} - 1) & \text{if } \psi^{\alpha} > 1 \end{cases}$$

Im Falle der Silica-Reaktionen dagegen kann die Porosität ϕ vernachlässigt werden

$$\Gamma^S = \begin{cases} k_d^S (\psi^S - 1) & \text{if } \psi^S < 1; \mathcal{N}^S > 0 \\ k_f^S (\psi^S - 1) & \text{if } \psi^S > 1 \end{cases}$$

E.6 Auslaugung

Im Modell von (Bangert, 2004) wird für die Calcium Auslaugung der Zusammenhang zwischen den verschiedenen Calcium-Konzentration s^h als Feststoff und in Lösung wie folgt dargestellt. Diese Formulierung basiert auf der Beschreibung von (Delagrave et al., 1997), (Gerard et al., 1998)

$$s^h = s_0^h \quad \text{für } \kappa_c > c_0^i$$

$$s^h = s_0^h - [s_p^h - s_{csh}^h] \left[1 - \frac{\kappa_c}{10} + \frac{\kappa_c^2}{400} \right] - \frac{s_0^h - s_p^h}{1 + \left[\frac{\kappa_c}{c_p^i} \right]^n} - \frac{s_{csh}^h}{1 + \left[\frac{\kappa_c}{c_{csh}^i} \right]^m} \quad \text{für } 0 \leq \kappa_c \leq c_0^i$$

c_0^i, s_0^h : initialen Gleichgewichtskonzentrationen des chemisch intakten Materials

c_{csh}^i, s_{csh}^h : mit der vollständigen Entkalkung der CSH-Phasen korrelierenden Konzentrationen

n, m : dimensionslose Parameter zur Steuerung der $s^h(\kappa_c)$ -Beziehung bei den Konzentrationen $c^i \approx c_p^i$ und $c^i \approx c_{csh}^i$

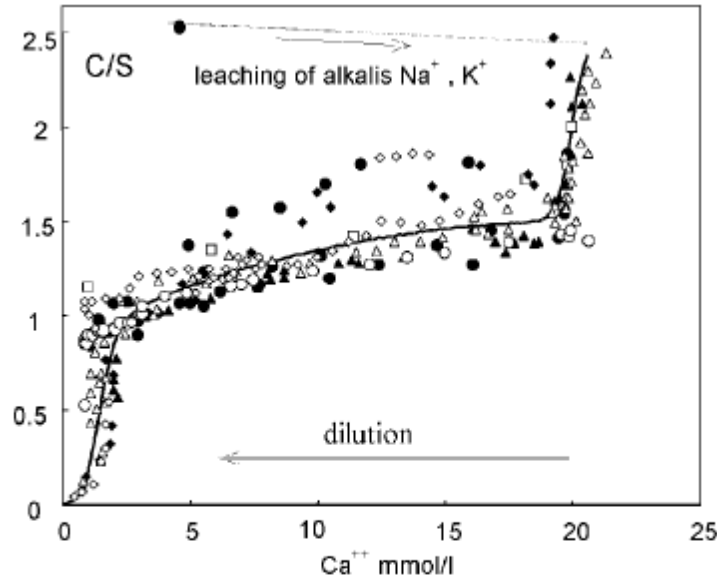


Abbildung 6: Darstellung der Calciumauslaugung nach (Delagrave et al., 1997)

Für die Volumenanteile der Feststoffmatrix und der gelösten Stoffe gilt:

$$\phi^s = \phi_0^s - \frac{\mathcal{M}^h}{\rho^h} [s_0^h - s^h], \text{ bzw. } s^h = 1 - \phi_0^s - \frac{\mathcal{M}^h}{\rho^h} [s_0^h - s^h]$$

Für die Massenbilanzgleichung des gelösten Stoffes φ^i gilt hier:

$$\frac{\partial(\phi^i c^i)}{\partial t} + \text{div}(q^i) = -\frac{\partial s^h}{\partial t}$$

Mit c^i und $s^h = \phi^h c^h$ sind die auf das Porenvolumen bezogene Calcium-Konzentration der Porenflüssigkeit und die auf das Mischungsvolumen bezogene Calciumkonzentration der Hydratationsprodukte. $q^i = \phi^i c^i w_i$ ist der diffuse Massenstromvektor des gelösten Calciums, wobei w_i die Relativgeschwindigkeit der Lösung bezeichnet.

Die Lösungsfronten korrelieren direkt mit einer lokalen Materialschwächung und bewegen sich von der Bauteiloberfläche aus ins Bauteilinnere fort. Das Fortschreiten der Lösungsfronten und damit der Schädigung erfolgt insbesondere unter nicht dauerhaft feuchten Umgebungsbedingungen nur sehr langsam (einige Zentimeter pro Jahrzehnt). Deshalb wird die Betondeterioration infolge des Calcium-Auslaugens für herkömmliche Betonbauwerke oftmals als unkritisch eingestuft (siehe z.B. (Locher, 2000), (VDZ, 2000)). Dies gilt aber nicht für Wasserbauwerke.

E.7 Zusammenfassung

Bei den oben beschriebenen und aufgeführten Modellen handelt es sich um eine kleine Auswahl. Hier wurden die Wechselwirkungen zwischen unterschiedliche Schädigungsmechanismen, auf Grund der Komplexität der Betrachtung unterschiedlicher parallelablaufender Prozesse, nicht berücksichtigt.

Zur Ermittlung der notwendigen Messgrößen ist folgendes zu beachten: betrachtet man den Neubau, so können Bauwerksdaten, wie Bewehrungsüberdeckung oder auch Porosität schon während der Bauphase bei der Qualitätskontrolle gemessen werden. Diese Daten müssen nur einmal im Lebenszyklus eines Bauwerks erhoben werden.

Mit Hilfe der im Bericht in den Abschnitten 2.2.3 und 3.5.2 beschriebenen SWOT-Analyse werden die für das einzelne Bauwerk wahrscheinlichsten Schädigungsmechanismen ermittelt, so dass häufig nur ein relevanter Schädigungsmechanismus zu betrachten ist, wo durch sich die Anzahl der zu ermittelnden Parameter im Bereich Bestand stark beschränken lässt. Allerdings sollten bauwerksspezifische Größen, wie bspw. Porosität oder Bewehrungsüberdeckung nachträglich auch für Bestandsbauwerke ermittelt werden, da diese Größen eine zentrale Rolle spielen, allerdings müssen sie, wie bereits oben erwähnt im Allgemeinen nur einmal bestimmt werden.

Appendix F Beispiele für Programmsysteme zur Prognose der Schädigungsentwicklung

Für die Lebenszyklusbetrachtungen und das Lebenszyklus-Management von Infrastrukturbauwerken ist die Vorhersage der Schadensentwicklung ein entscheidender Parameter. Viele verschiedene Arbeitsgruppen haben sich in den vergangenen Jahren mit solchen Modellen beschäftigt und Software-Lösungen für die wichtigsten Schädigungsmechanismen von zementgebundenen Materialien entwickelt. In folgenden wird eine Auswahl an Software-Lösungen für verschiedene Bereiche und Ansprüche vorgestellt:

F.1 Programmsystem TRANSREAC

Kurzbeschreibung des Programmsystems TRANSREAC Für die Simulationsberechnung mit dem Transport-Reaktions-Modell „TRANSREAC“ wird der zu berechnende Baukörper einzelne diskrete Finite-Volumen-Elemente (VE) geteilt. Im Programm wird dann für jedes VE ein thermodynamisch und kinetisch stabiler Ausgangsphasenbestand berechnet, als Basis für den nachfolgenden Berechnungsschritt. In kontinuierlicher Abfolge werden zwischen den benachbarten VE Wärme-, Feuchte- und weitere Stofftransporte TRANSREAC berechnet.

Anschließend wird für jedes einzelne VE der thermodynamisch und kinetisch stabile Phasenbestand berechnet. Durch Algorithmen wird dann der berechnete stabile Phasenbestand im VE hinsichtlich der Veränderung der einzelnen Transportparametern, der Festigkeit und weiterer korrosiver Effekte bewertet. Diese aktualisierten Parameter dienen als Berechnungsgrundlage für die Transportberechnungen des Folgezeitschritts.

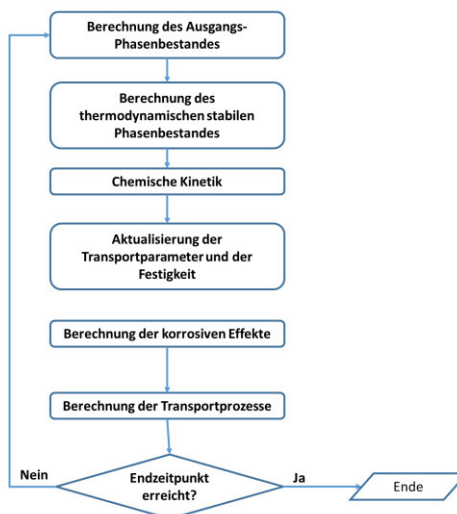


Abbildung 7: Algorithmusabfolge von TRANSREAC

Der für das Simulationsprogramm benötigte baustoffspezifische Eingangsdatensatz zur physikalischen Beschreibung des Baustoffes beinhaltet u.a. Kennwerte:

- zur Porosität des Baustoffes, wie u.a. die freie Wasseraufnahme, die Wasseraufnahme im Vakuum, die Porenradienverteilung und die Trockenrohddichte;
- zu den Stofftransporten, wie z.B. den Flüssigkeitsaufnahmekoeffizienten, die Diffusionskoeffizienten

Appendix F

- gelöster Teilchen und die Sorptionsisotherme;
- zum Wärmetransport, wie z.B. die Wärmeleitfähigkeit, die spezifische Wärmekapazität und Koeffizienten zur Feuchteabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit.

Der Eingangsdatensatz zur chemischen Beschreibung beinhaltet u.a. Kennwerte:

- zur Phasenzusammensetzung des verwendeten Zementes
- zum Zementgehalt;
- zu reaktiven Zusatzstoffen.

F.2 Programmsystem COMLEAM¹⁴

Die an der HSR Hochschule für Technik Rapperswil, Schweiz, entwickelte Software COMLEAM (CONstruction Material LEAching Model) dient dazu, die Auswaschung von potenziell umweltschädlichen Stoffen aus berechneten Gebäudebauteilen abzuschätzen, die vertikal oder horizontal exponiert bzw. der Witterung ausgesetzt sind (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**)¹⁵.

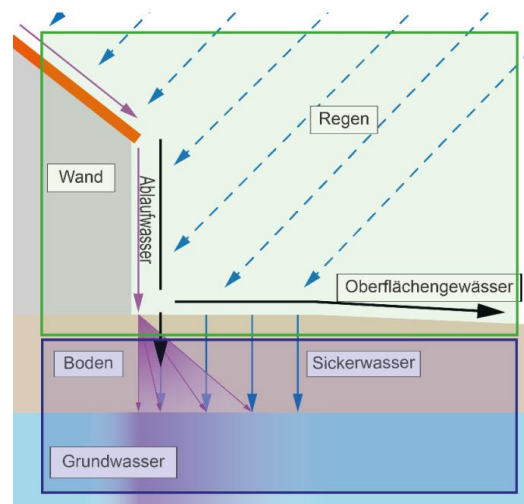


Abbildung 8: Systemübersicht zur Auslaugung von Stoffen aus horizontal und vertikal berechneten, Eigene Darstellung, Hochschule für Technik, Rapperswil.

Die Software stellt eine Plattform dar, mit der sich für vorgegebene Randbedingungen (z. B. Stoffe, Emissionsfunktionen) und Szenarien die Auswaschung und Umweltexposition abschätzen lassen. Der Anwender kann die Modellparameter und die entsprechenden Anforderungen aber auch individuell festlegen und dann simulieren. Das auf ein Bauteil auftreffende Wasser wird aus den Wetterdaten abgeleitet: bei horizontalen Bauteilen wird der Niederschlag berücksichtigt und bei vertikalen Bauteilen der Schlagregen

¹⁴ Olaf Tietje, Emissions- und Übertragungsfunktionen für die Modellierung der Auslaugung von Bauprodukten, Im Auftrag des Umweltbundesamtes

¹⁵ Burkhardt, M., Engelke, D., Gehrig, S., Hochstrasser, F., Rohr, M. and Tietje, O., 2018, Introduction and application of the software COMLEAM - Manual Version 1.0. HSR University of Applied Sciences Rapperswil, Switzerland 50 p.

berechnet¹⁶. Unter Berücksichtigung der Wassermenge am Bauteil wird mit einer Emissionsfunktion die Stoffauswaschung (Emission aus dem Bauteil) bestimmt. Ein System von Differentialgleichungen berechnet aus dem Abflusswasser und den Emissionen die Wasser- und Stoffgehalte in den nachfolgenden Kompartimenten, das heißt in Schnittstellenkompartimenten (SK) und in den Zielkompartimenten Boden und Gewässer.

Der Kern der Software, der Calculator, berechnet die Stoffflüsse anhand von Eingangsparametern aus den vier Modulen Geometrie, Baumaterial, Emissionen und Wetter, wie in Abbildung 9 dargestellt.

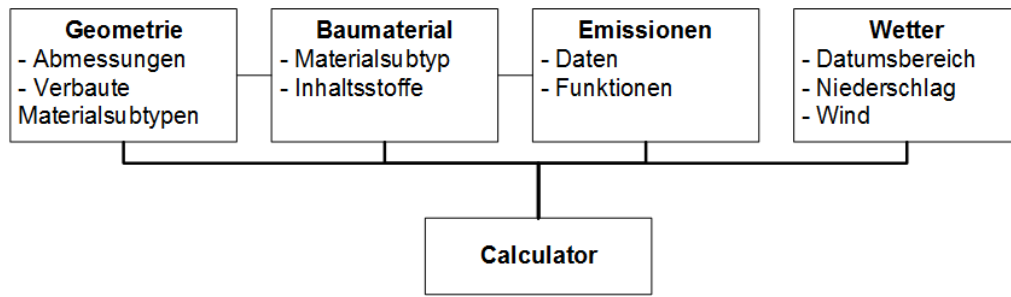


Abbildung 9: Parameterbereiche, aus denen die Eingangsgrößen für COMLEAM stammen. Eigene Darstellung, Hochschule für Technik, Rapperswil

F.3 Programmsystem GEMS

GEMS TM ist ein Akronym für „Gibbs Energy Minimization Software for Thermodynamic Modelling“, deren Entwicklung seit 2000 von Dr. D.A. Kulik (LES) in Zusammenarbeit mit der ETHZ, Empa, PSI AHL, Universität Helsinki und anderen Institutionen koordiniert wird. GEMS ist eine kostenlose, wissenschaftliche Software zur Berechnung thermodynamischer Gleichgewichte in komplexen (geo-) chemischen Systemen durch Gibbs Energieminimierung ((Kulik et al., 2013), (Wagner et al., 2012)). Im Vergleich zu alternativen Methoden und Codes ist GEMS besonders effizient bei der Lösung von Gleichgewichten mit mehreren nicht-idealen Lösungen, Phasen (wässriger Elektrolyt, gasförmige Flüssigkeit, feste Lösungen, Sorption) und mit zunächst unbekanntem Redoxzuständen. Aus diesem Grund wurde GEMS bei LES als Schlüsselkomponente bei der geochemischen Modellierung für das Schweizerische Management Programm für Radioaktive Abfälle (Nagra) verwendet.¹⁷ Das GEMS3-Softwarepaket wird ständig weiterentwickelt. GEMS wird „wie besehen“ vom Labor für Abfallwirtschaft (LES) des Paul Scherrer Instituts (PSI) zu zwei Zwecken vertrieben:

- Förderung der GEM-Methode und der Software in der Forschungsgemeinschaft;
- um das Feedback der Benutzer zu sammeln - wichtig, um die Software funktionaler und zuverlässiger zu machen.

Wichtige Informationen zur Nutzung von GEMS:

¹⁶ Hochstrasser, F., Burkhardt, M. and Tietje, O., 2016, Schlagregenberechnung für Gebäudefassaden. Exemplarische Anwendung der Simulationssoftware COMLEAM, Report, DIBt

¹⁷ <http://gems.web.psi.ch/>

Die Erlaubnis zur Nutzung der GEM-Selektor-Software ist kostenlos für Bildungs- und Forschungszwecke, vorbehaltlich der Anerkennung der Allgemeinen Geschäftsbedingungen. Insbesondere bei der Veröffentlichung von Ergebnissen unter Verwendung des GEM-Selektor-Codes muss die folgende Website-Adresse (<http://gems.web.psi.ch>) und die folgenden Dokumente angegeben werden:

Kulik D.A., Wagner T., Dmytrieva S.V., Kosakowski G., Hingerl F.F., Chudnenko K.V., Berner U. (2013): GEM-Selektor geochemisches Modellierungspaket: überarbeiteter Algorithmus und GEMS3K numerischer Kernel für gekoppelte Simulationscodes. Computational Geosciences 17, 1-24. doi.

Wagner T., Kulik D.A., Hingerl F.F., Dmytrieva S.V. (2012): GEM-Selektor geochemisches Modellierungspaket: TSolMod-Bibliothek und Datenschnittstelle für Mehrkomponenten-Phasenmodelle. Kanadischer Mineralogie 50, 1173-1195. doi.

Es ist zu beachten, dass die TSolMod-Bibliothek ein integraler Bestandteil der GEMS-Codes ist, der zur Lösung des Gleichgewichts in jedem System verwendet wird, das mindestens eine Lösungsphase (Mehrkomponentenphase) enthält. Selbst die einfachste Wassergleichgewichtsberechnung nutzt Davies- oder Debye-Hückel-Modelle, die konsequent in der TSolMod-Bibliothek implementiert sind. Wenn ausgeklügelte Modelle für nicht-ideale Flüssigkeiten oder feste Lösungen verwendet werden, wird das Manuskript rationalisiert und verkürzt durch Zitieren des Papiers über TSolMod, so dass sich der Fokus auf den relevanten Problemstellungen und Ergebnissen liegt.

F.4 Programmsystem PHREEQC^{18,19}

PHREEQC Version 3 - ist ein Computerprogramm für Speziation, Batch-Reaktion, 1-dimensionaler Transport und Inverse Geochemische Berechnungen. PHREEQC Version 3 ist ein in den Programmiersprachen C und C++ geschriebenes Computerprogramm, das für eine Vielzahl von wässrigen geochemischen Berechnungen konzipiert ist. Es implementiert mehrere Arten von wässrigen Modellen: zwei wässrige Ionenassoziationsmodelle (das Lawrence Livermore National Laboratory Modell und WATEQ4F), ein wässriges Pitzer-spezifisches Ionen-Interaktions-Modell und das wässrige Modell SIT (Specific ion Interaction Theory). Unter Verwendung eines dieser wässrigen Modelle verfügt PHREEQC über Fähigkeiten für (1) Speziations- und Sättigungsindex-Berechnungen; (2) Batch-Reaktions- und eindimensionale (1D) Transportberechnungen mit reversiblen und irreversiblen Reaktionen, die wässrige, mineralische, gasförmige, feste Lösung, Oberflächenkomplexation und Ionenaustauschergleichgewichte sowie spezifische Moltransfers von Reaktanden, kinetisch kontrollierte Reaktionen, Mischen von Lösungen sowie Druck- und Temperaturänderungen beinhalten; und (3) inverses Modellieren, das Sätze von Mineral- und Gas-molekülübertragungen findet, die Unterschiede in der Zusammensetzung zwischen Wässern innerhalb bestimmter Unsicherheitsgrenzen für die Zusammensetzung berücksichtigen. (freeware)

¹⁸ https://wwwbrr.cr.usgs.gov/projects/GWC_coupled/phreeqc/

¹⁹ <https://www.swmath.org/software/7853>

F.5 Programmsystem STADIUM

STADIUM® ist eine numerische Software zur Vorhersage des Eindringens von Chlorid und anderen Verunreinigungen in zementgebundene Materialien. Mit dieser Software kann der Transport von chemischen Spezies in zementgebundenen Materialien, die durch den Austausch an der Material-Umwelt-Grenzfläche in den Werkstoff eindringen, simuliert werden.

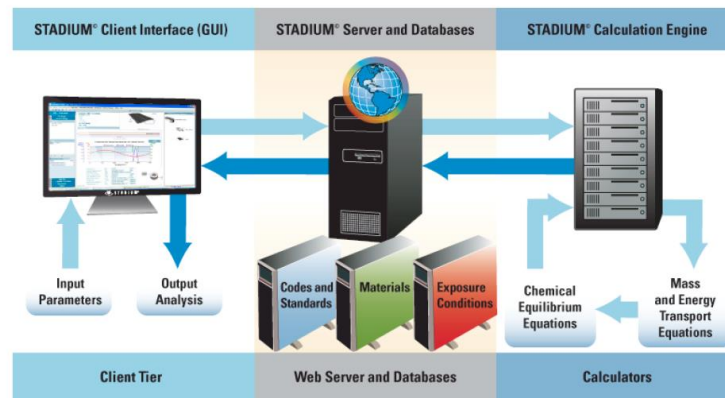


Abbildung 10: Vernetzung des STADIUM-Programm-Systems

STADIUM® ist eine hochentwickelte, kommerzielle Finite-Elemente-Analyse-Software, die zuverlässig die Kinetik des Betonabbaus und die Zeit vor Beginn der Bewehrungskorrosion vorhersagt. Es wird hier eine Vielzahl physikalischer und chemischer Phänomene, die einen starken Einfluss auf die Langzeitperformance und die Gesamtlebensdauer von Bauwerken haben berücksichtigt. STADIUM® basiert auf der Modellierung von Ionen-Transports und Reaktionen in gesättigten und ungesättigten Betonen.

Die komplexen Wechselwirkungen zwischen den Verunreinigungen, die in das poröse Betonporengefüge eindringen können, und den hydratisierten Phasen des Zementleims werden berücksichtigt und ermöglicht es Ingenieuren, die Auswirkungen verschiedener chemischer Zusammensetzungen zu quantifizieren, die durch bestimmte Arten und Mischungen von Zementen, Flugasche, Siliziumdioxidrauch und Hochofenschlacke bei Verwendung mit bestimmten Aggregaten entstehen.

Das Programm Tool STADIUM® Infrastructure Asset Management kann beim effektiven Management der Nutzungsdauer einer Betoninfrastruktur unterstützen.

STADIUM® Infrastructure Asset Management besteht aus einer Reihe von Modulen, von denen jedes speziell auf die Behandlung einer bestimmten Phase des Asset-Management-Prozesses ausgerichtet ist (von der Bestandsdatenbankbelegung über die Inspektionsdatenerfassung und -verarbeitung bis hin zur Identifizierung optimaler Reparaturszenarien und Risikoanalysen). Es wurde entwickelt, um jede Bestandsgröße und jede Art von konkreter Infrastruktur wie Brücken, Durchlässe, Tunnel, Kernkraftwerke und andere Kraftwerke, Industrieanlagen, Kaianlagen und andere Meeresbauten usw. zu verwalten.

Im Bereich Neubau, ermöglicht es dieses Software-Tool Eigentümern, Managern, Ingenieuren und Bauunternehmern, die anfänglichen Baukosten zu senken, unnötige Inspektions- und Wartungskosten zu vermeiden und die Investitionskosten zu priorisieren. Sie bietet Unterstützung bei der Auswahl der optimalen Materialien und der Identifizierung kostengünstiger Sanierungsstrategien für eine maximale Lebensdauererlängerung.

Die Anbieter geben noch die folgenden Hinweise zu ihrem Produkt. Die Entwicklung dieses Ansatzes im Neubau wurde mit dem Ziel motiviert, Probleme im Zusammenhang mit vorzeitiger Betonbelastung durch Optimierung der Materialkonstruktion und Durchführung spezifischer Labortests im Rahmen der baubegleitenden Qualitätssicherung zu vermeiden. Bei Verwendung mit gutem technischem Urteilsvermögen ist diese Methodik ein Werkzeug, das die Anzahl der zukünftigen Strukturen, die unter vorzeitiger Verschlechterung leiden, deutlich reduzieren kann. Die STADIUM[®]-Lösung von SIMCO wurde umfassend validiert und in Hunderten von Projekten eingesetzt, darunter der Bau des neuen Panamakanals (Third Set of Locks Project) und die Verwaltung aller Werften im Hafen von Rotterdam.

Folgende Input-Parameter sind notwendig, die können in drei Kategorien eingeteilt werden:

- 1) Geometrie: Abmessungen der modellierten Strukturelemente. Da sich die meisten Fälle auf 1D vereinfachen lassen, muss die charakteristische Länge der Bauelemente angegeben werden (z.B. Decksdicke). Da STADIUM[®] auf der Finite-Elemente-Methode basiert, werden auch Informationen über die Diskretisierung der räumlichen Domäne benötigt.
- 2) Expositionsbedingungen (Umgebung): Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Zusammensetzung der Lösungen in Kontakt mit der Struktur. Im Falle von Meerwasser wird seine Zusammensetzung üblicherweise als der Salzgehalt ausgedrückt, der in die Konzentration der einzelnen Arten umgewandelt werden muss. So entspricht beispielsweise ein 32 ppt Meerwasser-Salzgehalt (alle Werte in mmol/L): 426,1 Na⁺, 9,0 K⁺, 25,6 SO₄²⁻, 9,3 Ca²⁺, 48,6 Mg²⁺, 3,8 HCO₃⁻ und 495,8 Cl⁻. Je nach Art der Exposition können alle diese Parameter zeitabhängig sein.
- 3) Materialeigenschaften: Sie lassen sich in zwei Kategorien einteilen. Die Parameter sind mit dem 1. Modul: Transportgleichungen (Transporteigenschaften) verknüpft, während andere mit dem 2. Modul: chemischen Modul, verbunden sind.

F.6 Zusammenfassung

Für die in Appendix D beschriebenen Schädigungsmechanismen und die zugehörigen Modelle in Appendix E gibt es bereits die oben aufgeführten Softwarelösungen. Ob eines der beschriebenen Tools bzw. welches dieser Tools später im LzM-System Anwendung findet, steht noch zu Diskussion. Die Überprüfung der Praktikabilität bzw. wie groß der Kosten-Nutzen-Aufwand der vorgestellten Programmsysteme ist, war nicht Gegenstand des Projekts und wurde daher nicht ermittelt.

Appendix G Methoden zur Zustandsanalyse

Die genauen Kenntnisse über einen Bestandsbau sind unerlässlich für eine kostengünstige und effiziente Sanierung. Um ein Bauwerk zu erfassen, bieten sich vielerlei Möglichkeiten an: Das Studieren vorhandener Planunterlagen, erneute umfangreiche Bauaufnahmen, sorgfältige Baubegehungen, energetische Bestandsaufnahmen oder das genaue Erfassen von Bauschäden.

G.1 Vor Ort Methoden - Zerstörungsfreie Verfahren und Methode

Kurze Darstellung einer Auswahl an Verfahren, welche Vororte verwendet werden können und die zerstörungsfrei oder minimal invasiv sind, diese Aufstellung erhebt nicht den Anspruch der Vollständigkeit.

G.1.1 Pulsinduktionsverfahren zur Bestimmung der Bewehrungsüberdeckung

Präzise Erkennung von Bewehrungsstäben sowie einfache Ermittlung von Bewehrungsgröße und Höhe der Betonüberdeckung, was besonders bei der zerstörungsfreien Strukturanalyse erforderlich ist. Anwendungen:

- Überprüfung der Betonüberdeckung großer Flächen für strukturelle Reparaturarbeiten
- Überprüfung und Analyse von Bewehrungsstäben
- Gebäude-Abnahmeprüfung und Qualitätskontrolle
- Erstellung struktureller Gutachtenprotokolle einschließlich Statistiken und visueller Präsentation in 2D-/3D-Ansichten von Flächen von bis zu 45x45 m
- Max. Detektionstiefe zur Objektlokalisierung: 180 mm
- Scantyp: Bereiche (Imagescan oder Blockscan), Quickscan-Detektion, Quickscan-Aufnahmen
- Maximale Tiefe zur Bestimmung des Betoneisendurchmessers: 60 mm



Abbildung 11: Bewehrungssuchgerät FerroScan PS 200, Hilti

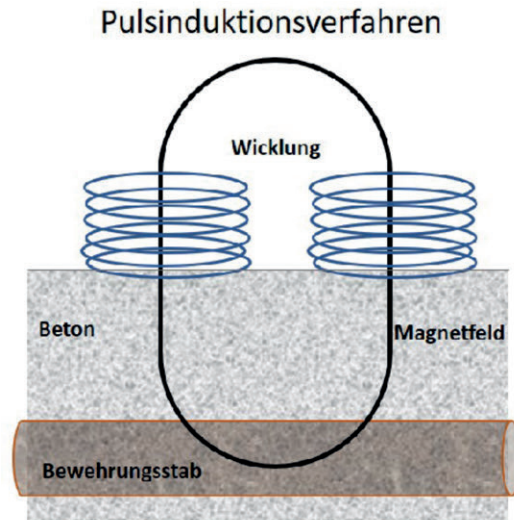


Abbildung 12: Schematische Darstellung des Pulsinduktionsverfahrens

Vorteile: genaue Bestimmung der Überdeckung der Bewehrung bis zu 100 mm Tiefe. Schnelle und einfache Handhabung bei der Messung auch von großen Flächen. Vor-Ort-Analyse durch detaillierte 2D- oder 3D-Darstellung der Bewehrung auf dem Tablet und direkte Bestimmung der Betonüberdeckungsstärke. Automatisches Aufzeichnen von großen Datensätzen (Scandaten über Längen von bis 30 Metern und bis zu 9 Imagescans). In Verbindung mit weiteren Verfahren können viele Aussagen über den Bauwerkszustand.

G.1.2 Druckfestigkeit mit Beton-Rückprallhammer (Silver-Schmidt-Hammer)

Die Druckfestigkeit wird mit Hilfe der Rückprallprüfung mittels des Silver-Schmidt-Hammers bestimmt.

Dazu wird der vorne leicht gerundete Schlagbolzen des Rückprallhammers langsam senkrecht gegen die Betonoberfläche gedrückt und dadurch im Inneren eine Feder gespannt. Ist eine bestimmte Spannung erreicht, wird die Federmechanik ausgelöst und dadurch ein Schlaggewicht beschleunigt. Das Schlaggewicht trifft über den Schlagbolzen mit einer bestimmten Energie auf die Betonoberfläche und prallt anschließend zurück. Die Rückprallstrecke wird am Hammer in Skalenteilen abgelesen. Die Rückprallstrecke ist umso größer, je größer der im Beton federnd gespeicherte Anteil der Schlagenergie ist, je weniger sich also der Beton plastisch verformt und je höher sein Elastizitätsmodul im Oberflächenbereich ist. Damit wird ein Kennwert für das elastische Verhalten des Betons in oberflächennahen Schichten ermittelt, aus dem auch auf die Druckfestigkeit geschlossen werden kann.

Bei geschädigten Betonoberflächen versagt diese Methode zur Beurteilung der der Druckfestigkeit. Die Wirkung der Schwerkraft muss bei nicht waagerechter Schlagrichtung berücksichtigt werden.



Abbildung 13: Betonrückprallhammer SilverSchmidt, Proceq

Unter bestimmten Voraussetzungen kann aus der Rückprallstrecke auf die Druckfestigkeit des Betons geschlossen werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Beton bei gleicher Festigkeit einen ganz unterschiedlichen E-Modul haben kann, da sich der E-Modul des Zuschlags stark auf den E-Modul des Betons, aber oberhalb einer bestimmten Grenze kaum auf die Druckfestigkeit auswirkt.

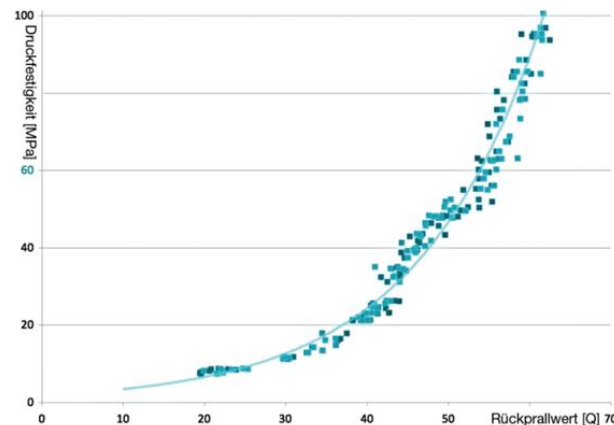


Abbildung 14: : Korrelation Rückprallwert und Druckfestigkeit

Nachteile: Fehleranfällig bei schwingenden Bauteilen bzw. Oberflächen. Ferner unterliegt das elastische Verhalten des durch die Schlagprüfung erfassten Randbereichs häufig Einflüssen, die sich nicht in gleichem Maße auf die Druckfestigkeit des Kernbetons auswirken. Beispielsweise bewirkt die Carbonatisierung des Betons eine Erhöhung der Messstellenwerte und täuscht eine scheinbar höhere Druckfestigkeit vor. Weitere Einflüsse sind Entmischen, unterschiedliche Hydratation, Durchfeuchtung, Abwitterungerscheinungen, Tiefenwirkung einer Vakuumbehandlung oder Dampfbehandlung und Betonalter. Die Ermittlung der Druckfestigkeit funktioniert nur im oberflächennahen Bereich.

Vorteile: Mobile Einsatzfähigkeit, zerstörungsfrei und einfache Handhabung, zeitnahe Ergebnisse.

G.1.3 Ultraschallgeschwindigkeit zur Bestimmung der Gefügehomoogenität und des dynamischen E-Moduls

Für das langfristige Verhalten zementgebundener Werkstoffe ist dessen Verformbarkeit, ausgedrückt durch das Elastizitätsmodul (E-Modul), eine wichtige Kenngröße. Dieser Wert hängt maßgeblich vom Porengefüge ab, dessen Entwicklung wesentlich durch den W/Z-Wert, aber auch durch herstellungsbedingte Fehlstellen in der Zementsteinmatrix bestimmt wird.

Appendix G

Eine Möglichkeit das Material in dieser Hinsicht zu untersuchen ist die Messung der Ultraschallgeschwindigkeit. Mit Ultraschall (oft als US abgekürzt) bezeichnet man Schall mit Frequenzen, die oberhalb des vom Menschen wahrgenommenen Bereiches liegen. Das umfasst Frequenzen zwischen 16 kHz (obere Hörschwelle) und 1,6 GHz. In Gasen und Flüssigkeiten breitet sich Ultraschall nur als Longitudinalwelle aus. In Festkörpern kommt es wegen der auftretenden Schubspannungen zusätzlich auch zur Ausbreitung von Transversalwellen. Der Übergang von Luftschall in Festkörper oder Flüssigkeiten erfolgt nur, wenn die Schallwellen in unmittelbarer Nähe abgestrahlt werden oder ein Koppelmedium mit angepassten akustischen Eigenschaften sowie einer bestimmten Dicke dazwischen ist.

Ultraschall wird je nach Material eines Hindernisses an diesem reflektiert, in ihm absorbiert oder tritt hindurch (Transmission). Wie bei anderen Wellen tritt auch Brechung, Beugung und Interferenz auf. Luft dämpft den Ultraschall, diese Dämpfung steigt mit wachsender Frequenz. In Flüssigkeiten breitet sich Ultraschall dagegen bis zu einer bestimmten Intensität dämpfungsarm aus.

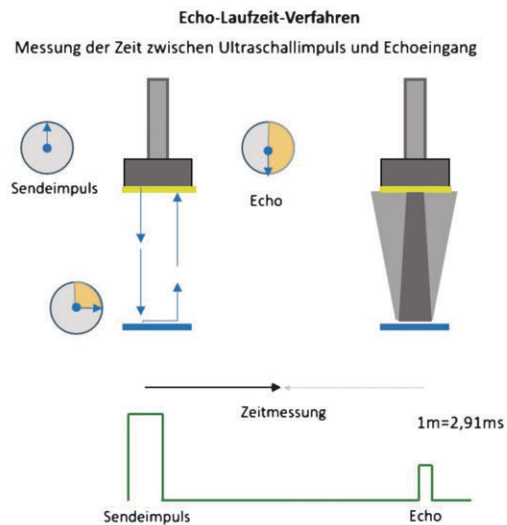


Abbildung 15: Messprinzip Echo-Laufzeit-Verfahren



Abbildung 16: Beispiel für ein Ultraschallmessgerät

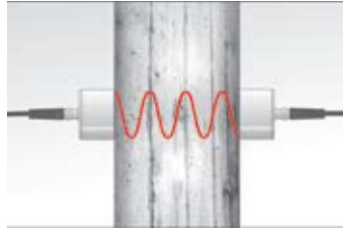


Abbildung 17: Sender und Empfänger für die Ultraschallwellen

Nachteile: Mehrfachmessungen sind aufgrund der Heterogenität von z.B. zwingend notwendig, Ergebnisse sind stark von der Werkstofffeuchte abhängig. Vorteile sind die mobile Einsatzfähigkeit der zerstörungsfreien Methode, die sich auch zur Rissdetektion einsetzen lässt.

G.1.4 Impact-Echo-Verfahren²⁰

Eingesetzt wird das Impact-Echo-Verfahren zur Dickenmessungen, aber auch Lokalisierung von Fehlstellen und Konstruktionselementen und Ermittlung des Verbundaufbaus bei nur einseitig zugänglichen Stahl- und Spannbetonkonstruktionen. Insbesondere kommt sie u.a. im Tunnelbau als Kontroll- und Qualitätsprüfung von Tunnelinnenschalen zum Einsatz. Die Tiefe wird über die gemessene Frequenz und die vorher gemessene oder geschätzte Schallausbreitungsgeschwindigkeit errechnet.²¹

Dieses Verfahren gehört zu den akustischen zerstörungsfreien Prüfverfahren und basiert auf niederfrequente Ultraschallwellen. Diese Schallenergie entsteht durch eine mechanische Impulsanregung an der Oberfläche eines Betonbauteils. Ein mechanisch oder elektrisch betriebener Federmechanismus (z.B. Hammerschlag, Stahlkugel) erzeugt einen elastischen Stoß, dadurch kommt es zu einer elastischen Verformung am Ansetzpunkt. Der Stoßimpuls enthält alle Frequenzen. Dort breiten sich die Wellen im Bauteil aus und reflektieren an Grenzflächen. Die Dickenresonanz aus mehreren reflektierten Signalen (Frequenzbereich: 1 -60 kHz) wird über einen Empfänger ermittelt und ausgewertet.²²

²⁰ R. Beutel; Zerstörungsfreie Prüfung von Betonbauteilen im jungen und erhärteten Zustand mit der Impact-Echo-Technik, Dissertation, 2009

²¹ Prof. Dr.-Ing. Rainer Auberg; Zerstörungsfreie Schadensanalyse -Anwendung und Grenzen bei Betonbauwerken; WISSBAU ®

²² D. Algernon; Zerstörungsfreie Untersuchung von Betonbauteilen mit dem Impact-Echo-Verfahren; SVTI Schweizerischer Verein für technische Inspektionen

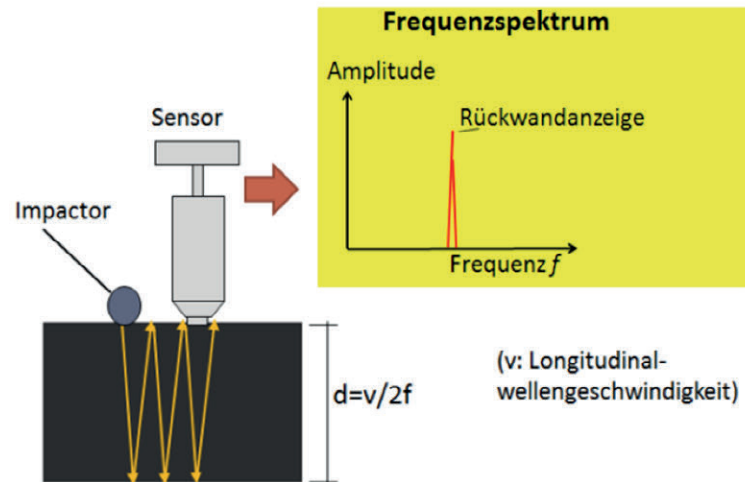


Abbildung 18: Prinzip des Impact-Echo-Verfahrens (Quelle: SVTI -Schweizerischer Verein für technische Inspektion)

Vorteile: Anwendung bei nur einseitig zugänglichen Konstruktionen. Bauteildicken bis zu 1 m können gemessen werden. Bildgebende Auflösung der inneren Struktur mittels neuester Auswertetechnik. Schnelle und wiederholbare, breitflächige Auswertung durch die Automatisierung. Weitere Vorteile im Bezug der Geometrieeffekte bietet eine berührungslose Messung mithilfe von luftgekoppelten Sensoren. Komplexere Messsysteme liefern zudem den Erstarrungs- und Erhärtungsverlauf einer Betonmischung bei bekannter Dicke im jungen und erhärteten Zustand.



Abbildung 19: Impact-Echo System MIRADOR mit umfangreichen Visualisierungsmöglichkeiten für universellen Feldeinsatz

Nachteil: Unerwünschte Geometrieeffekte und Störanteile führen zu Fehlinterpretationen und müssen berücksichtigt werden. Durch spezielle Signalverarbeitungsmethoden können sie aber auf ein Minimum reduziert werden. Theoretisch können zeitaufwendige Einzelpunktmessungen, die Linien- bzw. Rastermessungen erfordern können durch automatisierte flächige Bauteilprüfungen ersetzt werden, allerdings muss hierfür Ultraschalllaufzeit im Bauteil bekannt sein, diese ist an Bohrkernen zu ermitteln (nicht zerstörungsfrei).

G.1.5 Remanenzmagnetismus-Verfahren

Zur Schadensbeurteilung und die damit verbundene Standsicherheitsanalyse von Spannbetonbauwerken, insbesondere bei fehlenden oberflächigen Anzeichen einer Beschädigung von Spannstahl im Beton eignet sich das Remanenzmagnetismus-Verfahren, auch magnetische Streufeldmessung genannt. Diese Bauschäden können sein: altersbedingte Empfindlichkeit, mangelnder Korrosionsschutz aber auch äußere Einflüsse (bspw. Chloride).

Spannstahl besitzt im Gegensatz zum Beton ferromagnetische Eigenschaften. Die Untersuchung erfolgt in mehreren Schritten: das zu untersuchende Spannglied wird zuerst von der Bauteiloberfläche aus magnetisiert, dies erfolgt sukzessiv mittels einem regelbaren Elektromagnet bis zur Sättigung (Remanenz). Nach diesem Schritt ist die Bewehrung nur geringfügig magnetisiert, zu beachten ist, dass Stahlbeton andere magnetische Eigenschaften als Spannstahl besitzt.

Die Magnetsensoren (z.B. Hallsonden) an der Betonoberfläche nehmen die magnetische Flussdichte entlang der Spannglieder auf, Sie besteht aus einer Komponente orthogonal zur Betonoberfläche (transversal) und einer parallel zur Betonoberfläche (axial). Die Ortung von Rissen, Brüchen und Korrosionsbereiche erfolgt über den Signalverlauf, da bspw. an Bruchstellen magnetische Streufelder auftreten. Die Stärke des Signals gibt Auskunft den Schadensausmaß.

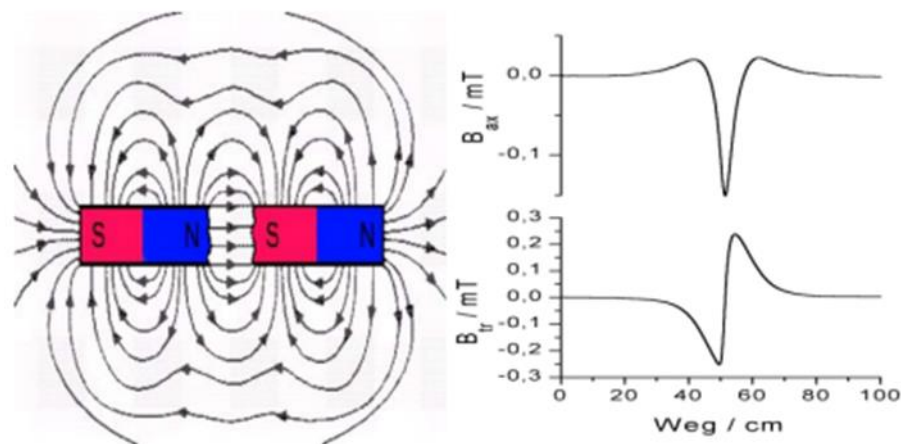


Abbildung 20: (Links) Ausbildung eines Streufeldes an der Bruchstelle eines Spanndrahts, vergleichbar mit einem gebrochenen Stabmagneten; (Rechts) an der Betonoberfläche gemessene Flussdichtekomponente an einer Bruchstelle²³

Vorteile: Es ist eine schnelle und effiziente Zustandsanalyse der Spannglieder. Anwendbar bei Spannbetonfertigteile im sofortigen Verbund, wie auch Spannstähle im nachträglichen Verbund (in verpressten Hüllrohren). Schwerzugängliche oder großflächige Bauwerke sind kontrollierbar.

Nachteile: Einflüsse auf die Messung nehmen die Betondeckung (bis etwa 20 cm), die unregelmäßige Anordnung und der Grad der Stahlbetonbewehrung, stählerne Einbauteile und metallkaschierte Dichtungsbahnen.

²³ M. Wilcke et al.; Betoflux-Stand der Technik in der Spannstahlbruchortung; Fachtagung Bauwerksdiagnose 2018

G.1.6 Bestimmung der Luft- bzw. Gaspermeabilität

Der Widerstand zementgebundener Werkstoffe gegen das Eindringen werkstoffaggressiver Lösungen und Gase hängt im Wesentlichen vom Porengefüge ab. Dieser Eindringwiderstand wird auch mit dem Begriff „Betonqualität“ beschrieben, wobei die des Überdeckungsbetons für die Dauerhaftigkeit eines Betonbauteils besonders wichtig ist. Physikalisch lässt sich das Porengefüge durch Werkstoffkenngrößen, wie die Gesamtporosität und Porengrößenverteilung charakterisieren. Das Porengefüge bestimmt auch eine weitere Werkstoffeigenschaft, die Wasser- oder Luftpermeabilität.

Während die Werte für die Gesamtporosität und Porengrößenverteilung nach Bohrkernentnahme im Labor ermittelt werden, kann die Luftpermeabilität auch am Bauwerk zerstörungsfrei bestimmt werden.

Das ist auch aussagekräftiger, als diese Werkstoffeigenschaften an einem separat hergestellten Prüfkörper zu untersuchen. Bei Messungen am fertigen Bauteil werden neben den werkstoffbedingten auch die herstellungsbedingten Einflüsse auf die Betonqualität erfasst. Das Gerät für die Luftpermeabilitätsmessungen am Bauwerk wurde in der Schweiz entwickelt und dort auch in das Schweizer Regelwerk implementiert. In der Schweizer Norm SIA 262: 2003 - „Betonbau“ ist deshalb in Ziffer 6.4.2.2 festgehalten: „Die erreichte Dichtigkeit des Überdeckungsbetons ist mit Durchlässigkeitsprüfungen (z.B. Luftpermeabilitätsmessungen) am Bauwerk oder an vom Bauwerk entnommenen Bohrkernen zu überprüfen.“

Mit dem Gerät mit der Bezeichnung Permea-TORR™, können die Messungen zur Luftpermeabilität auf eine schnelle, wiederholbare, zuverlässige und zerstörungsfreie Art durchgeführt werden.

In diversen Untersuchungen wurde gezeigt, dass die Ergebnisse der Luftpermeabilitätsmessungen einen engen Zusammenhang mit anderen dauerhaftigkeitsrelevanten Eigenschaften, wie beispielsweise dem Eintrag von Chloriden, dem Carbonatisierungsfortschritts, der kapillaren Wasseraufnahme und der Sauerstoffpermeabilität (RILEM-Cembureau) aufweisen.

Der Permea-TORR™ misst die Luftpermeabilität k_T unter den vorhandenen Feuchtigkeitsbedingungen. Da die Feuchtigkeit im Überdeckungsbeton die Luftpermeabilität k_T stark beeinträchtigen kann, ist die Feuchtigkeit im Beton vorab zu messen, mit z. B. impedanzbasierten Messgeräten oder der Messung des spezifischen elektrischen Widerstands (Wenner-Methode).



Abbildung 21: Permeabilitätsmessgerät Permea-Torr, TFB

Nachteile: Bestimmung der Permeabilität kann nur im oberflächennahen Bereich vorgenommen werden, allerdings sind die mobile Einsatzfähigkeit, sowie zerstörungsfrei, aber auch die Möglichkeit der Rissdetektion als Vorteile zu nennen.

G.1.7 Bauradar

Die überwiegende Zahl der am Bauwerk anzuwendenden zerstörungsfreien Prüfmethode hat eine räumlich begrenzte Tiefenauflösung, die von weniger als einem Zentimeter bis zu zehn Zentimeter reicht. Eine Ausnahme in diesem Zusammenhang ist das Bauradar, das eine Strukturaufklärung mit deutlich höheren Eindringtiefen erlaubt.

Das Bauradarverfahren hat sich aus dem Bereich der Geophysik entwickelt. Hierbei handelt es sich um ein Messverfahren, welches elektromagnetische Impulse im Frequenzbereich zwischen 400 MHz und 1,6 GHz in ein Bauteil einleitet.

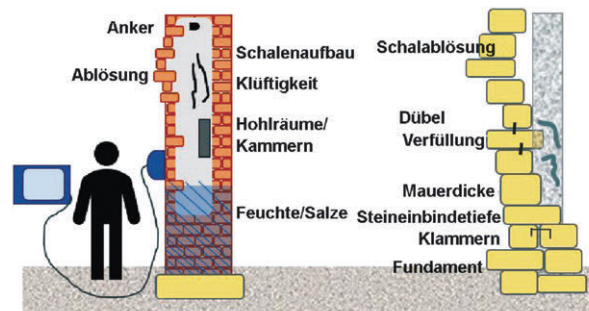


Abbildung 22: Einsatzmöglichkeiten von Radar zur zerstörungsfreien Prüfung an Bauwerken²⁴

Je nach Beschaffenheit werden die Impulse reflektiert oder transmittiert. Die maximal mögliche Eindringtiefe beträgt je nach Werkstoff und Konstruktion sechs Meter. Mithilfe dieses Verfahrens lässt sich unter anderem der Zustand von Mauerwerks-, Beton-, Naturstein- und Mischkonstruktionen beurteilen. Dabei wird das Radargerät, das je nach Ermittlungsziel mit unterschiedlichen Radarsensoren bestückt werden kann, langsam an der Bauteiloberfläche entlanggeführt. Erkenntnisse, die durch dieses Verfahren gewonnen werden, sind jedoch nur von erfahrenen Experten interpretierbar, da die Methode bei der Auswertung spezielles Fachwissen erfordert. Mit dem Bauradarverfahren lassen sich in historischen Mauerwerksbauten Wanddicken, eventuelle Hohlräume im Wandaufbau oder Bauteilanker aufspüren. Auch die Verteilung von Feuchtigkeit in der Wand ist mit dieser Technik ermittelbar. Innerhalb von Geschossdecken kann die Lage und Art der Stahlträger oder einer anderen Tragkonstruktion ermittelt werden. Um Aufschluss über Stahlbetongebäude oder entsprechende Konstruktionen im Brückenbau zu erlangen, lassen sich mit dem Bauradarverfahren z. B. die vorhandene Lage und der Abstand der Bewehrung auffindig machen. Dabei können auch Hinweise über eventuelle vorhandene Korrosionsschäden aufgrund der dadurch verursachten Gefügeveränderungen gegeben werden. Mit dieser Methode sind auch der

²⁴ <https://www.ggukarlsruhe.de/>

Zustand und die Qualität des Betons, z.B. Hohlräume oder größere Risse im Bauteilinneren, auffindbar. Beispielsweise kann selbst unterhalb von alten Fundamentplatten die genaue Lage von Versorgungsleitungen oder der Grundwasserspiegel geortet werden.²⁵

Vorteile: Zerstörungsfreies Verfahren mit hohem Erkenntnisgewinn bei Bauten im Bestand, insbesondere Denkmalgeschützte Bauwerke. Nachteile: Hohe Investitionen in die Geräte. Das Radarverfahren ist ein indirektes Verfahren, d.h. die Antwort auf die Fragestellung ist im Allgemeinen nicht direkt in den gemessenen Daten ablesbar. Je nach Fragestellung und Datenlage können die Auswertung und Interpretation zeitaufwendig sein. Es sind Fachkenntnisse und Erfahrungen des Messtrupps und des Auswertepersonals notwendig.

G.1.8 Durchstrahlprüfung - Röntgen

Eine Methode, die bereits seit langem im Bauwesen eingesetzt wird, basiert auf der Verwendung von Röntgen- oder Gammastrahlen. Bei der Anwendung der Durchstrahlungsprüfung im Bauwesen wird das Betonbauteil mit diesen Strahlen oder mit einem Linearbeschleuniger durchstrahlt. Das Bauteil muss von beiden Seiten zugänglich sein, da die zu belichtende Bildplatte gegenüber der Strahlenquelle angeordnet werden muss. Zur geometrischen Auflösung der zu ortenden metallischen Gegenstände, wie Bewehrung, Spannglieder, Ankerköpfe ist es häufig erforderlich, an einer Position mehrere Aufnahmen mit unterschiedlichen Einstrahlungswinkeln zu machen. Vorteil: Bei extrem dichter Bewehrung oder sehr tief liegenden Spanngliedern ist die Durchstrahlungsprüfung oft die einzige Möglichkeit, diese zerstörungsfrei zu orten. Nachteil: Wegen der immer erforderlichen, je nach Strahlenquelle jedoch unterschiedlichen Sicherheitsmaßnahmen wird die Durchstrahlungsprüfung nur in wenigen Sonderfällen zur Ortung von Bewehrung und Spanngliedern in der Praxis eingesetzt. Nur noch wenige öffentliche Materialprüfanstalten haben noch die Zulassung, mit diesen Geräten am Objekt zu messen.

G.1.9 Potentialfeldmessung zur Bestimmung des Korrosionsrisikos

Die meisten der Betonschäden sind mit einer Bewehrungskorrosion verbunden. Ist der Überdeckungsbeton bereits abgedrückt und liegt die korrodierende Bewehrung frei, ist der Schadensprozess bereits stark vorangeschritten. Präventionsmaßnahmen sind dann praktisch nicht mehr möglich, eine Instandsetzung unvermeidbar.

Eine zerstörungsfreie Früherkennung des Korrosionsprozesses erweitert beträchtlich den Handlungsspielraum. Eine dazu geeignete Methode ist die Potentialfeldmessung.

Mit dieser Methode können mögliche Korrosionsaktivitäten im Stahlbeton geortet und Aussagen zum Status (z.B. Lochfrasskorrosion) gemacht werden. Die Methode ist bei Bauwerken unterschiedlicher Nutzung, wie bei Brücken, aber auch bei Parkhäusern/Tiefgaragen einsetzbar.²⁶

Das Messprinzip lässt sich wie folgt zusammenfassen. Die Korrosion von Stahl, auch im Beton, ist ein elektrochemischer Prozess. Wenn Bereiche der Bewehrung im Beton korrodieren, fließt daher ein Korrosionsstrom von der Anode (korrodierende Stelle) zu den nicht korrodierenden Bereichen der Bewehrung. Der Beton ist dabei ebenfalls Teil des Stromkreises, was aber eine gewisse Bauteilfeuchte voraussetzt. Mit dem Stromfluss ist der Aufbau eines elektrischen Feldes verbunden. Durch Vermessung dieses elektrischen Feldes (Äquipotentiallinien, Messung einer Spannung in mV) gegen eine Bezugselektrode (Cu/CuSO₄-Elektrode) lassen sich korrodierende Bereiche von passiven Bereichen unterscheiden, Lochfraß Bereiche lokalisieren und die Intensität des Korrosionsprozesses insgesamt bewerten.

²⁵ <https://www.baunetzwissen.de/altbau/fachwissen/bestandsanalyse/bauradarverfahren-3125339>

²⁶ <http://www.mt-qualitest.ch/potentialfeldmessung.html>

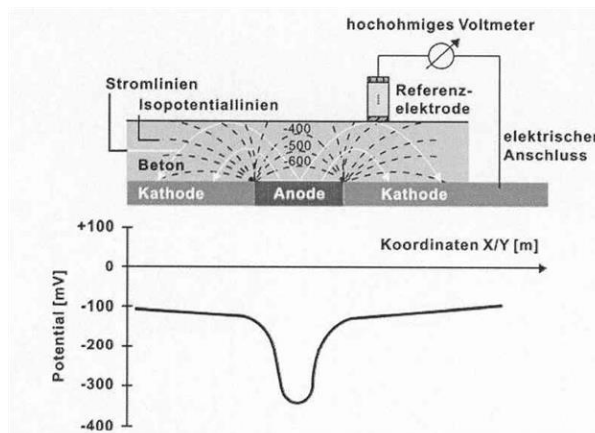


Abbildung 23: Schematische Darstellung des Messprinzips der Potentialfeldmessung

- In der Regel ist aber erforderlich die Potentialfeldmessungen durch folgende Messungen zu ergänzen, um die Ursachen und der Umfang der Bauteilschädigung zu erfassen: Bestimmung der Bewehrungsüber- bzw. Betondeckung
- Bohrmehl/Bohrkernentnahme zur Erstellung eines Chloridprofils
- Kartierung von Rissen, Hohl- bzw. Fehlstellen
- Bewehrungs sondierung (stichprobenartig)
- Bestimmung der Carbonatisierungstiefe

Zustand des Betons	Potential [mV]
wassergesättigter Beton ohne O ₂ :	-1.000 bis -900
feuchter, mit Chlorid kontaminierter Beton:	-600 bis -400
feuchter, chloridfreier Beton:	-200 bis +100
feuchter, carbonatisierter Beton:	-400 bis +100
trockener, carbonatisierter Beton:	±0 bis +200
trockener, nicht carbonatisierter Beton:	±0 bis +200

Abbildung 24: Wertebereiche für Messung des Potentials bei unterschiedlichen Betonen



Abbildung 25: Potentialfeldmessung mit Potentialfeldmessgerät

Die Methode ist minimalinvasiv, da eine elektrische Verbindung zwischen dem Messgerät (hochohmiges Voltmeter) und dem Bewehrungsstahl hergestellt werden muss. Dazu genügt eine Öffnung mit einem Durchmesser von ca. 20 mm oberhalb des Bewehrungsstahls.

Nachteile: keine Aussage über Querschnittsverlust bei Korrosion und der Korrosionsgeschwindigkeit.

Vorteil: minimal invasiv, hohe Aussagekraft der Daten in Kombination mit weiteren Verfahren wie die Untersuchung der Bewehrungsüberdeckung und Chloridprofil, wichtige Voraussetzung für eine geplante Instandsetzungsplanung.

G.2 Invasive Verfahren - Vorort Verfahren

Darunter werden Verfahren verstanden, die vor Ort durchgeführt werden können, aber nicht zerstörungsfrei sind.

G.2.1 Haftzugfestigkeitsmessung und Oberflächenzugfestigkeitsmessung

Für die Funktionsfähigkeit und Dauerhaftigkeit von Instandsetzungsmaßnahmen oder Beschichtungen spielt die Eigenfestigkeit des Untergrunds (Kohäsion) bzw. der Verbund von Putzen, Beschichtungen und Anstrichen und Untergrund (Adhäsion) eine entscheidende Rolle. Die Prüfung der Haftzugfestigkeit ist deshalb unverzichtbarer Teil einer Zustandsanalyse bzw. Qualitätskontrolle.

Ermittelt wird die Haft- und die Oberflächenzugfestigkeit mittels der Haftzugprüfung. nach DIN EN 13813, indem unter definierten Bedingungen (Messfläche, Temperatur, Abzugsgeschwindigkeit u.a.) ein auf der Beschichtung des betreffenden Prüfkörpers aufgeklebter Stempel (so genannter Prüfstempel) mittels einer Zugprüfmaschine senkrecht zur Betonoberfläche gleichmäßig langsam bis zum Abriss (Bruch) abgezogen wird. Dabei ist neben dem Messwert ebenfalls die Beschreibung des Bruchortes (wo ist der Bruch entstanden) maßgebend. Die Haftzug-Abrissfestigkeit kann im Messwert nie höher liegen als die Eigenfestigkeit der einzelnen Komponenten, wobei in einem Verbund immer das schwächste Glied maßgebend ist.



Abbildung 26: Beispiel Haftzugprüfung



Abbildung 27: Haftzugmessgerät Easy M, BPS

Technische Daten:

- Prüfstempel: $d = 50 \text{ mm}$; $h = d/2$.
- Prüfgerät: momentenfreie, zentrische Krafteinleitung Kraftsteigerung $0,05 \text{ N/mm}^2\text{s}$.
- Prüffläche: je nach Prüfzweck unbehandelt oder vorbehandelt; von Schmutz, losen Bestandteilen, Trennmitteln u.ä. befreien; mit oder ohne Ringnut (Tiefe $1/10$ bis $1/5$ Durchmesser; trocken oder nass gebohrt).
- Aufkleben: Prüffläche ausreichend trocken; schnell härtende, pastöse Reaktionsklebstoffe nach Herstellerangaben, Klebefuge möglichst gleichmäßig und dünn, keine Luftpinschlüsse, überstehender Klebstoff ist zu entfernen; Stempelfläche parallel zur Prüffläche.

Zusätzlich zu den Angaben der Norm ist laut Hinweisblatt zu beachten: Bei den Festigkeitsklassen E 40 bzw. B 25 sollte die Prüffläche mit einer geeigneten und in Schablonen geführten Diamantbohrkrone nass oder trocken vorgebohrt werden. Bei den übrigen Festigkeitsklassen ist das Vorbohren in der Regel nicht erforderlich. Für eine Prüfung sind mindestens fünf Prüfstellen erforderlich, die repräsentativ auszuwählen sind. Die Prüfung soll am mechanisch (z.B. mit Drahtbürste) aufgerauten und abgesaugten, aber sonst nicht vorbehandelten Untergrund oder im Fall einer Nachbesserung am nachgebesserten Untergrund vorgenommen werden. Ist bei Belägen bzw. Beschichtungen eine mechanische Vorbehandlung und/oder ein Voranstrich bzw. eine Grundierung des Untergrundes vorgesehen, soll auch mit dieser Vorbehandlung geprüft werden. Die obere, ggf. vorgebohrte Zone des Fußbodens muss zum Prüfzeitpunkt trocken sein. Der Klebstoff für das Kleben der Prüfstempel darf die Oberflächenbeschaffenheit des Untergrundes nicht verändern.

Nachteile: Nicht zerstörungsfrei, Vorteile: Mobile Einsatzfähigkeit, Ermittlung des Haftverbunds, z.B. vor und nach Instandsetzungsmaßnahmen.

G.2.2 Carbonatisierungstiefe

Die Carbonatisierung ist einer der wichtigsten Alterungsprozesse in Betonstrukturen, da sie ein Auslöser für Bewehrungskorrosion ist. Die Bestimmung der Carbonatisierungstiefe erfolgt über einen Indikator-test mit Phenolphthalein. Hierfür wird ein Probekörper, bspw. ein Bohrkern gespalten und mit Phenolphthalein-Lösung besprüht. Bereiche in denen der pH-Wert des Gefüges noch höher als pH 9 liegt verfärben sich durch das Phenolphthalein pink. Bereiche, in denen der pH-Wert unter pH 9 auf Grund der Carbonatisierung gesunken ist, verfärben sich nicht.

Die Carbonatisierung kann nun nach Behandlung mit Phenolphthalein durch einfache Messung des Abstandes von der Probenoberfläche zum Farbumschlag mittels Schieblehre oder Lineal gemessen werden.



Abbildung 28: Beispiel für eine mit Phenolphthalein behandelten Probe

Der Vorteil dieser Methode ist eindeutig die sehr einfache Anwendung. Nachteile: Das Verfahren ist nicht zerstörungsfrei. Es ist nur eine qualitative Bestimmung des Carbonatisierungsfortschritts, jedoch keine Beurteilung der „Restalkalität“ möglich.

G.3 Laboruntersuchungen

Die Laboruntersuchungen werden an Probekörpern, Bohrkernen oder Bruchstücken vorgenommen.

G.3.1 Röntgendiffraktometrie

Für die Identifikation mineralischer Komponenten in Werkstoffen des Bauwesens, wie z.B. Gesteinskörnung oder bauwerksschädliche Salze, ist die Röntgendiffraktometrie besonders geeignet.

Röntgendiffraktion (englisch X-ray diffraction, XRD), ist die Beugung von Röntgenstrahlung an geordneten Strukturen wie Kristallen oder Quasikristallen. Grundsätzlich zeigt Röntgenstrahlung die gleichen Beugungserscheinungen wie Licht und alle anderen elektromagnetischen Wellen. Röntgenbeugung wird in der Materialphysik, der Kristallographie, der Chemie und der Biochemie eingesetzt, um die Struktur von Kristallen zu untersuchen, die sogenannte Röntgendiffraktometrie.²⁷

Sie gilt als klassische Labormethode zur qualitativen und eingeschränkt auch zur quantitativen Untersuchung von mineralogischen Verbindungen. Wie bei vielen anderen Labormethoden ist auch für die Röntgendiffraktometrie eine aufwendige Probenvorbereitung Voraussetzung für aussagekräftige Ergebnisse.

²⁷ <https://de.wikipedia.org/wiki/Röntgenbeugung#Verfahren>

Appendix G

Die Probe wird unter verschiedenen Winkeln mit Röntgenstrahlen bestrahlt. Anhand des Reflektionswinkels können mineralische, kristalline Verbindungen qualitativ detektiert werden.



Abbildung 29: Röntgen

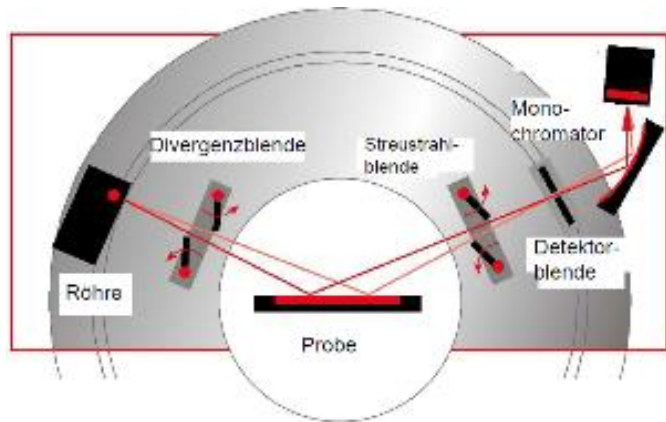


Abbildung 30: Schematische Darstellung des Meßprinzips der Röntgendiffraktometrie

Die Bragg-Gleichung ist die zugrunde liegende mathematische Beziehung für die Ermittlung der Struktur aus dem bei der Röntgenbeugung erhaltenen Beugungsbild:

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

Parameter	Bezeichnung
d	Abstand zwischen parallelen Gitterebenen/Netzebene
λ	die Wellenlänge des monochromatischen Röntgenstrahls mit dem die Probe bestrahlt wird
θ	Winkel zwischen Röntgenstrahl und Gitterebene, sogenannter <i>Glanz- oder Braggwinkel</i> (halber Winkel zwischen den Lichtstrahlen)
n	ist eine natürliche Zahl, die die Beugungsordnung angibt

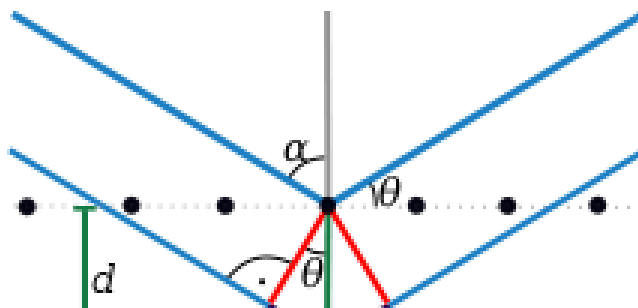


Abbildung 31: Schema der Beugungsgeometrie

Appendix G

Die Gleichung beschreibt die Bedingungen für eine konstruktive Interferenz. Die rechte Seite der Bragg-Gleichung beschreibt den Gangunterschied zweier an zwei Netzebenen mit dem Abstand d gebeugten Röntgenstrahlen. Beträgt dieser ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge, kommt es zu konstruktiver Interferenz. William Lawrence Bragg beschrieb diese Gleichung als „Reflexionsbedingung“, da makroskopisch der Eindruck entsteht, dass die Röntgenstrahlung vom Kristall unter dem Winkel 2θ reflektiert wird.

Wenn für eine Schar paralleler Netzebenen die Bragg-Gleichung erfüllt ist, überlagern sich die von den Einzelebenen „reflektierten“ Wellen also so, dass konstruktive Interferenz entsteht. Es gibt also für jede Netzebenenschar nur bestimmte Winkel, unter denen Reflexion stattfindet. Diese Winkel heißen Glanzwinkel oder Bragg-Winkel.

Die durch konstruktive Interferenz entstandene Strahlung kann von einem Detektor registriert werden. Der Ablenkungswinkel der aus konstruktiver Interferenz entstehenden Wellen vom einfallenden Strahl beträgt 2θ . Da die Wellenlänge λ der eingesetzten Röntgenstrahlung bekannt ist, lässt sich so der Netzebenenabstand berechnen.²⁸

Nachteile: Messungen werden beeinflusst von Überlappenden Reflexe und der Kristallinität der Probe.

Vorteile: Gleichzeitige Detektion von verschiedenen mineralogischen Verbindungen wie z.B. Calciumcarbonat und Calciumhydroxid, (qualitative Bestimmung (sehr aufwendig) möglich)

G.3.2 Thermogravimetrie

Die quantitative Bestimmung von Bestandteilen mineralischer Werkstoffe ist oft die Voraussetzung für die Bewertung des Bauwerkszustandes oder für die Auswahl von Präventiv- oder Instandsetzungsmaßnahmen.

Mit Hilfe der Thermogravimetrie können mineralogische Verbindungen, wie z.B. Carbonate, Hydroxide und andere wasserhaltige Minerale quantitativ bestimmt werden. Hierzu wird die Probe schrittweise erhitzt (bspw. von 30°C bis 1000°C in 10° Schritten) und der Gewichtsverlust bestimmt wird. Jede Verbindung besitzt eine spezifische Temperatur, bei der ihre Zersetzung stattfindet.



Abbildung 32: Thermogravimetrie - TG Waage

So kann durch die Bestimmung der Zusammensetzung die „Restalkalität“ der Probe beurteilt werden.

²⁸ L. Spieß et al., Moderne Röntgenbeugung, 2005, B. G. Teubner Verlag. Wiesbaden

Appendix G

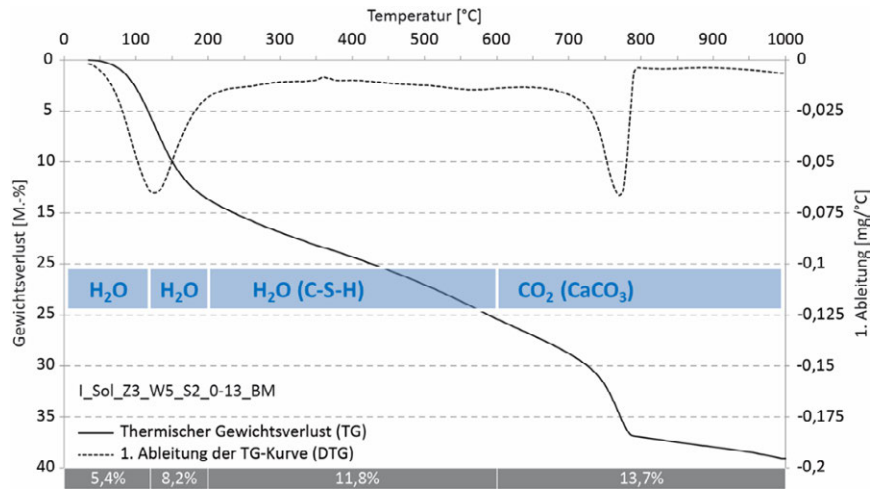


Abbildung 33: Beispiel für eine Auswertung der Thermogravimetrie

Durch die Aufnahme eines Tiefenprofilen kann ebenso der Carbonatisierungsfortschritts in einem Probekörper bestimmt werden:

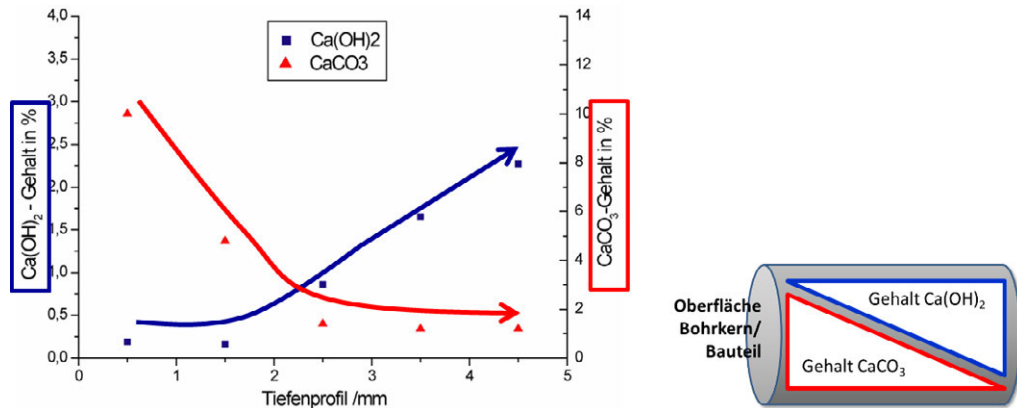


Abbildung 34: Darstellung des quantitativen Carbonatisierungsfortschritts

Nachteile: Für den qualitativen Nachweis der Verbindung muss ein weiteres Verfahren, wie bspw. Röntgendiffraktometrie durchgeführt werden. Die Auswertung erfordert über die Bestimmung des Gewichtsverlustes hinaus weitere Informationen über die Struktur der Verbindungen, wie z.B. die Molmasse beim Calciumhydroxid, erforderlich. **Vorteile:** Bei Kenntnis der chemischen Zusammensetzung kann eine quantitative Bestimmung mit hoher Genauigkeit erzielt werden.

G.3.3 Ionenchromatographie

Die überwiegende Zahl der Bauwerksschäden geht auf die Einwirkung wässriger Lösungen, d.h. in Wasser gelöster Salze, zurück. Die Bestimmung von Salzgehalten im angreifenden Wasser oder im Werkstoff selbst ist Voraussetzung für die Bewertung des Bauwerkszustandes.

Ein Verfahren zur Bestimmung von bauwerksschädlichen Salzen von Anionen (wie Chlorid-, Sulfat-, Nitrationen) und Kationen (Natrium-, Kalium-, Magnesium-, Calciumionen, etc...) ist die Ionenchromatographie.

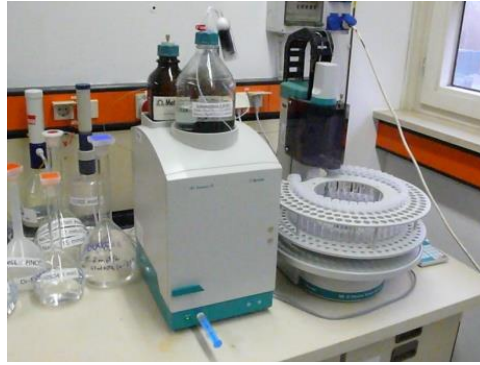


Abbildung 35: Ionenchromatograph 761 Compact IC, Metrohm

Hierzu werden die Proben zu einem feinen Pulver aufgemahlen und mit zwei unterschiedlichen Aufschlüssen (wässrig oder sauer) können die im Beton befindlichen Ionen herausgelöst werden. Praktisch wird dazu eine bestimmte Menge des Pulvers (z.B. 1g) in eine PE-Flasche eingewogen und mit 50 ml deionisiertes Wasser oder einer Säure versetzt. Nach einem mehrstündigen Schütteln wird die Lösung abfiltriert und mit dem Ionenchromatographen analysiert. Die Trennsäule als Herzstück der Methode muss je nach Aufgabenstellung/Problemstellung in Abhängigkeit der zu detektierenden Ionen ausgewählt werden.

Vorteile: Der Nachweis von Kationen und Anionen (in zwei verschiedenen Arbeitsschritten) geschieht mit sehr hoher Genauigkeit. Die Nachteile bestehen darin, dass das Verfahren eine sehr aufwendige Probenaufbereitung bedarf, der Typ oder mineralogische Verbindung ist nicht nachweisbar.

G.3.4 Quecksilberdruckporosimetrie

Die Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken hängt entscheidend vom Eindringwiderstand gegenüber bauwerksschädlichen Verbindungen ab, was wiederum durch das Werkstoffgefüge bestimmt wird. Die Charakterisierung des Gefüges kann mit Hilfe der Kenngrößen Gesamtporosität und Porengrößenverteilung erfolgen.

Die Bestimmung der Porenkennwerte, wie Gesamtporosität und Porengrößenverteilung erfolgt mit der Hg-Druck-Porosimetrie.



Abbildung 36: Quecksilberdruck-Porosimeter (Porotec)

Hierzu wird ein Probenstück mit ca. 1g Masse in ein sogenanntes Penetrometer eingebracht, das anschließend mit Quecksilber gefüllt wird. Quecksilber ist eine nicht benetzende Flüssigkeit, diese wird da-

her erst durch Druck in das Porensystem eingepresst. Dabei werden die Poren mit abnehmendem Durchmesser erst bei zunehmenden Drücken mit Quecksilber gefüllt. Auf diese Weise kann die Gesamtporosität, aber durch die Auswertung für jede einzelne Druckstufe kann auch die Porengrößenverteilung bestimmt werden.

Zur Auswertung wird dafür die Washburn-Gleichung verwendet, nach der der notwendige Druck umgekehrt proportional zum Porenradius ist ($p \sim 1/r$), es gilt also: Je höher der Druck, desto kleiner die Pore.

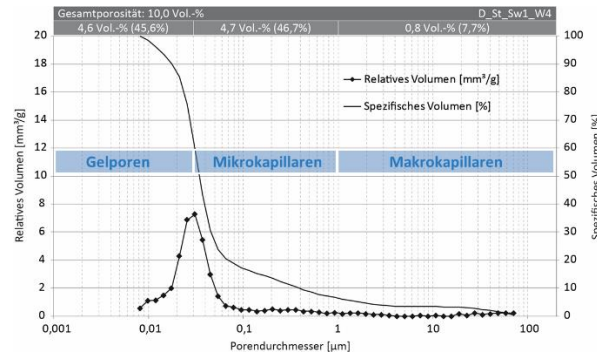


Abbildung 37: Exemplarische Porengrößenverteilung, Anteile der verschiedenen Poren an der Gesamtporosität

Vorteil des Verfahrens ist, dass die Ergebnisse quantitative vergleichbar der innerhalb eines Werkstoffes sind. Nachteile sind beispielsweise, dass bei dieser Methode sogenannte „Flaschenhalsporen“ nicht berücksichtigt werden, des Weiteren hat die Probenvorbereitung und Auswahl einen Einfluss auf die Messung.

G.3.5 Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten

Die Aufnahme von Wasser bzw. wässriger Lösungen ist Voraussetzung für viele werkstoffschädigende Reaktionen. Daher ist die Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten eine wichtige Voraussetzung für die Bewertung von Risiken für das Bauwerk.

Die gravimetrische Wasseraufnahme eines Probekörpers wird als Funktion der Zeit gemessen, bezogen auf die Einheitsfläche (1 m^2) kann daraus der Wasseraufnahmekoeffizient bestimmt werden, also die Fähigkeit des Materials Wasser mittels kapillaren Saugens aufzunehmen.

Der Versuch ist in der DIN EN ISO 15148 „Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen“ beschrieben.

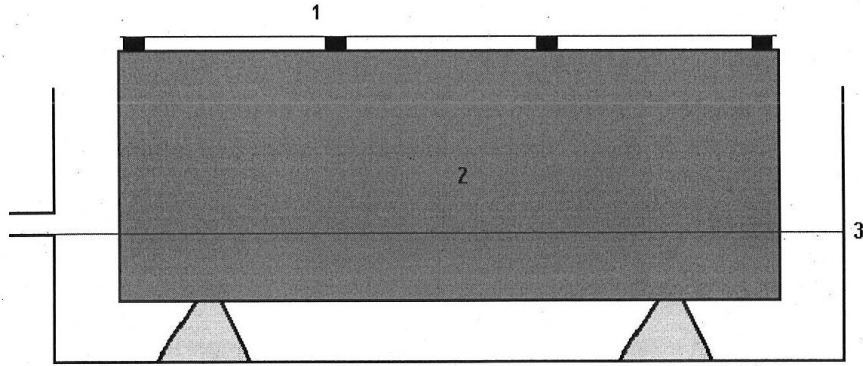
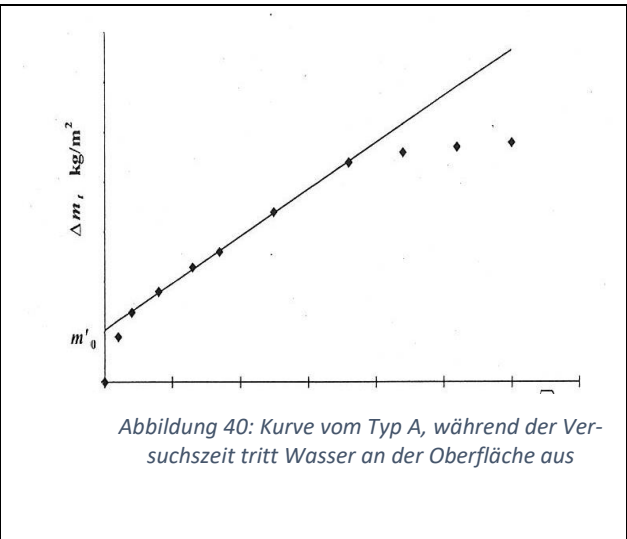
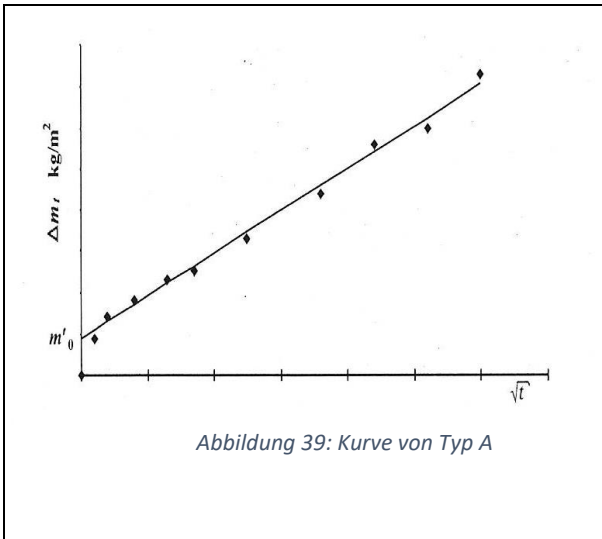


Abbildung 38: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

Hierzu werden in der Praxis Bohrkern an den Mantelflächen mit einer wasserundurchlässigen Schicht aus Epoxidharz beschichtet, so dass das Wasser allein über die bekannte Grundfläche eindringen kann. Die Masse der trockenen Proben werden vorab bestimmt, dann werden die Proben ins Wasser gestellt und nach definierten Zeitabständen gewogen, die Gewichtsveränderung dokumentiert. Dazu werden die Differenzen jeder Einzelwägung und der Ausgangsmasse, bezogen auf die Wasseraufnehmende Fläche, berechnet:

$$\Delta m_t = \frac{(m_t - m_i)}{A}$$

Diese Veränderungen werden dann nach der Wurzel der Zeit in ein kartesisches Koordinatensystem eingetragen. Bei Typ A werden die Punkte werden in einer Geraden extrapoliert.



Die Berechnung des Wasseraufnahmekoeffizienten erfolgt, je nachdem welcher Kurventyp (Typ A oder Typ B) vorliegt, mit der folgenden Formel für Typ A:

$$A_w = \frac{(m'_{ft} - m'_0)}{\sqrt{t}}$$

Appendix G

Falls die Punkte keine Gerade, sondern eine beliebige Kurve ergeben, wird zur Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten der Wert für Δm_t zum Zeitpunkt $t=24\text{h}$ als m'_{ft} verwendet werden.

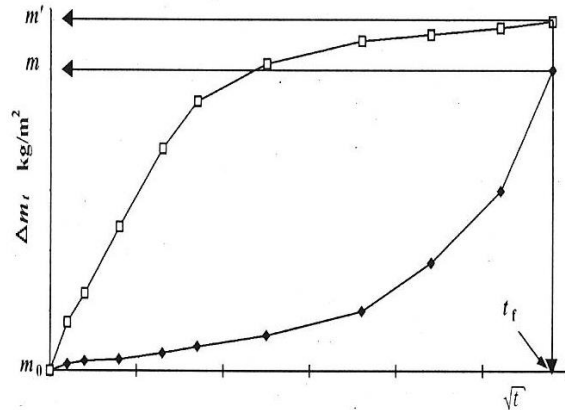


Abbildung 41: Kurve vom Typ B

Dann gilt für den Wasseraufnahmekoeffizienten nach Typ B:

$$A_{w,24} = \frac{\Delta m'_{ft}}{\sqrt{86400}}$$

Aus den Ergebnissen folgt die Klassifizierung des Materials und es lassen sich direkt Aussagen über das Verhalten treffen.

Klasse	Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m ² *h ^{0,5}]	Einstufung
I	W < 0,1	wasserundurchlässig
II	W = 0,1-0,5	wasserabweisend
III	W = 0,5 -2,0	wasserhemmend
IV	W > 2,0	wasserdurchlässig

Abbildung 42: Wasseraufnahmekoeffizient und Einstufung

Nachteile: Anfällig für Fehler bei der Versuchsdurchführung, daher ist eine größere Probenzahl erforderlich. **Vorteile:** Beschreibt das tatsächliche Saugverhalten in Abhängigkeit vom Porensystem (Zementstein + Gesteinskörnung). Die Versuchsdurchführung ist sehr einfach und die Proben können nach Abschluss des Versuchs für weitere Untersuchungen verwendet werden.

G.3.6 Bestimmung der Porenkennwerte - Kapillarfüllbare Porosität und Trockenrohichte

Neben der Bestimmung der Gesamtporosität und Porengrößenverteilung mittels Quecksilberdruckporosimetrie (siehe G.3.4) stehen noch weitere, mit geringerem technischem Aufwand durchzuführende Verfahren zur Bestimmung von Porenkennwerten zur Verfügung. Es sei an dieser Stelle aber darauf hingewiesen, dass die Werte nicht direkt vergleichbar sind, das Messverfahren muss bei der Interpretation der Messwerte unbedingt bekannt sein.

Die hier vorgestellte Methode zur Porositätsbestimmung zementgebundener Werkstoffe basiert auf den Wasseraufnahmeverfahren, SIA 262/1 Anhang K.

Appendix G

Danach werden die Proben durch geeignete Verfahren (z.B. im Vakuum, D-Drying oder im Trockenschrank bei 105°C) getrocknet und anschließend unter definierten Bedingungen mit Wasser gesättigt. Aus den Ergebnissen von Wägungen nach der Trocknung bzw. nach der Sättigung lassen sich die kapillarfüllbare Porosität ε_{kap} und die Gesamtporosität ε_{ges} berechnen. Das Probenvolumen wird aus den Wägungen der wassergesättigten Probe oberhalb und unterhalb des Wasserspiegels ermittelt.

$$\Delta\varepsilon_{kap} = \frac{\Delta m}{V \cdot \rho}$$

Für die Bestimmung der Porosität werden Betonzylinder mit 70 mm Durchmesser verwendet. Beginnend von der geschalteten Betonoberfläche werden in 2mm dicke Scheiben geschnitten. Diese Scheiben werden 3 Tage bis zur Gewichtskonstanz unter Wasser gelagert und anschließend wird das Gewicht durch Wägung über ($m_{\ddot{u}}$) und unter (m_u) Wasser bestimmt.

Nach der Gewichtsbestimmung wurden die Proben 3 Tage bei 105°C im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und dann gewogen (m_r), daraus ergibt sich die Trockenmasse. Mit Hilfe der Trockenmasse kann die Trockenrohddichte der Probe bestimmt werden:

$$V = \frac{m_{\ddot{u}} - m_u}{\rho_w}$$

Parameter	Bezeichnung
V	Probenvolumen [m ³]
ρ_w	Dichte des Wassers [kg/m ³]
$m_{\ddot{u}}$	Probenmasse nach der Sättigung unter Atmosphärendruck, Wägung über Wasser [kg]
m_u	Probenmasse nach der Sättigung unter Atmosphärendruck, Wägung unter Wasser [kg]
m_{105}	Trockenmasse Wägung über Wasser [kg]
ρ_{105}	Trockenrohddichte der Scheibe [kg/m ³]

Mit Hilfe, der eben bestimmten Größen lässt sich auch die Trockenrohddichte der Probe bestimmen:

$$\rho_{105} = \frac{m_{105}}{V}$$

Dann lässt sich die kapillarfüllbare Porosität bestimmen:

$$\varepsilon_{kap} = \frac{m_{\ddot{u}} - m_{105}}{\rho} \cdot 100$$

Wenn die Probe unter Vakuum gesättigt wird, kann sogar die Gesamtporosität bestimmt werden:

$$\varepsilon_{ges} = \frac{m_v - m_{105}}{\rho} \cdot 100$$

Parameter	Bezeichnung
ρ	Dichte des Wassers [kg/m ³]
m_v	Probenmasse nach der Sättigung unter Vakuum, Wägung über Wasser [kg]
ε_{kap}	kapillarfüllbare Porosität [%]
ε_{ges}	Gesamtporosität [%]

Bei der gravimetrischen Bestimmung der Porosität sind für die Beurteilung der Messmethode sowohl der Sättigungsgrad der Proben und die Messgenauigkeit der Waage zu berücksichtigen. Bei der Probenvorbereitung ist durch das Trocknen und die Durchführung der Saugversuche dafür zu sorgen, dass bei der kapillaren Wasseraufnahme ein Lufteinschluss möglichst ausgeschlossen wird.

Nachteilig ist also die Anfälligkeit für Fehler bei der Versuchsdurchführung. Der Vorteil ist, dass die Methode mit geringem technischem Aufwand durchzuführen ist.

G.3.7 Ionenselektive Elektrode

Die Bewertung betonaggressiver Wässer muss in der Praxis oft schon vor Ort erfolgen, um Planungsvorgaben zeitnah zu korrigieren bzw. Risiken für das Bauwerk abzuwenden. Bei einer hohen Probenzahl bietet sich dafür der Einsatz von ionenselektiven Elektroden an.

Ionenselektive Elektroden gestatten eine verhältnismäßig einfache und schnelle Bestimmung von Ionenkonzentrationen in verschiedenen Medien, so z.B. auch in getrübbten und gefärbten Lösungen. Mit Hilfe einer chloridselektiven Elektrode ist die Cl⁻-Konzentration einer Probelösung zu messen. Darüber hinaus ist der Einfluss von Störionen auf das Messergebnis am Beispiel des Systems Cl⁻/Br⁻ zu untersuchen. Unter Verwendung einer nitratselektiven Elektrode soll der Gehalt von NO₃⁻-Ionen in einer Trinkwasserprobe bestimmt werden.



Abbildung 43: Ionenselektive Elektrode Orion 4-Star, Thermo Fisher Scientific

Nachteile: Anfällig für individuelle Fehler, aufwendige Probenvorbereitung, Vorteile: Schnelle Ermittlung der gewünschten Kenngrößen

G.3.8 Photometrie

Mit Photometrie oder Fotometrie (altgr. φῶς phos ‚Licht‘ und μετρέειν metrein ‚messen‘) werden Messverfahren im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichtes mit Hilfe eines Photometers bezeichnet.²⁹

Die Photometrie ist ursprünglich ein Teilgebiet der Physik bzw. der Chemie, Astronomie und der Fotografie, inzwischen aber eine reguläre Ingenieurwissenschaft.

Unter anderem findet die Photometrie auch in der (bio-)chemischen und medizinischen Analytik Verwendung. Sie erlaubt den qualitativen und quantitativen Nachweis ebenso wie die Verfolgung der Dynamik chemischer Prozesse von strahlungsabsorbierenden chemischen Verbindungen.

²⁹ <https://de.wikipedia.org/wiki/Photometrie>

Appendix G

Eine Messung der Extinktion über verschiedene Wellenlängen wird als Spektroskopie bezeichnet, z. B. die UV/VIS-Spektroskopie oder die Infrarotspektroskopie. Eine aufgezeichnete Messung bei verschiedenen Wellenlängen wird als Spektrum bezeichnet.

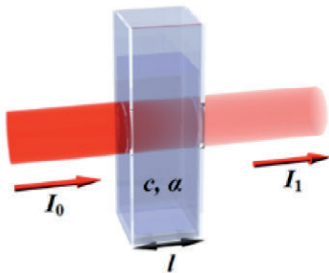


Abbildung 44: Messprinzip Photometer



Abbildung 45: Photometer Refletoquant, Merck

Nachteile: nicht zerstörungsfrei, da Probenentnahme notwendig, aufwendige Probenvorbereitung.

Vorteile: Schneller Nachweis von z.B. Chloriden, Sulfaten.

G.3.9 Kontaktwinkelmessgerät

Die Aufnahme von Wasser oder wässrigen Salzlösungen durch mineralische Werkstoffe kann durch eine Hydrophobierung (oder Imprägnierung) praktisch unterbunden werden. Dazu wird die innere und äußere Oberfläche des Werkstoffes durch einen Silikonharzfilm wasserabweisend ausgerüstet, d.h. wird durch Wasser nicht mehr benetzt (Kontaktwinkel $\Theta > 90^\circ$).

Mit Hilfe des Kontaktwinkelmessgeräts kann die Benetzbarkeit des Materials bestimmt werden. Als Kontaktwinkel Θ (Theta; auch Rand- oder Benetzungswinkel) wird der Winkel bezeichnet, den ein Flüssigkeitstropfen auf der Oberfläche eines Feststoffs zu dieser Oberfläche bildet.

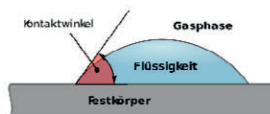
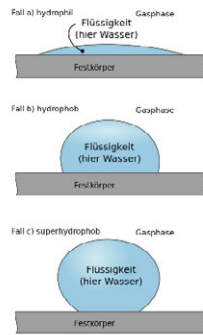


Abbildung 46: Schematische Darstellung des Kontaktwinkels einer Flüssigkeit auf einer Festkörperoberfläche

Aus der Messung der Kontaktwinkel, z. B. mit einem Kontaktwinkel-Goniometer, können bestimmte Eigenschaften der Oberfläche eines Feststoffs bestimmt werden, z. B. die Oberflächenenergie. Die Größe des Kontaktwinkels zwischen Flüssigkeit und Feststoff hängt ab von der Wechselwirkung zwischen den Stoffen an der Berührungsfläche: je geringer diese Wechselwirkung, desto größer der Kontaktwinkel.

Im Spezialfall der Verwendung von Wasser als Flüssigkeit bezeichnet man die Oberfläche:

Appendix G



- bei geringen Kontaktwinkeln (ca. 0°, Bild 3a) als hydrophil ("wasserliebend")
- bei Winkeln um 90° (Bild 3b) als hydrophob (wasserabweisend)
- bei Winkeln über 90° (Bild 3c) als superhydrophob. Letzteres wird bei sehr hohen Winkeln (ca. 160°) auch als Lotoseffekt bezeichnet und entspricht einer extrem geringen Benetzbarkeit.

Abbildung 47: Verschiedene Benetzbarkeiten von Oberflächen mit Wasser

Durch Oberflächenbehandlung kann der Kontaktwinkel verändert werden.

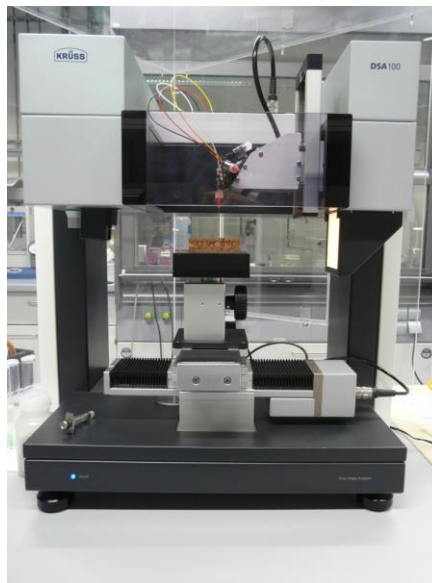


Abbildung 48: Kontaktwinkelmessgeräte DSA 100 (Krüss)

Vorteil: direkte Charakterisierung der Wirkung einer Hydrophobierung. Nachteil: Nicht zerstörungsfreies Laborverfahren und hohe Investitionen für das Gerät bei eingeschränkter Anwendbarkeit im Bauwesen.

G.4 Zusammenfassung

Im obigen Abschnitt wurden unterschiedliche Verfahren und Methoden zur Bestimmung der Werkstoffkenngrößen, wie Porosität, Wasseraufnahmekoeffizient etc. sowie der Werkstoffzusammensetzung und seiner mechanischen Eigenschaften, aber auch zur Bestimmung von Schadstoffkonzentrationen im Werkstoff vorgestellt.

All diese Methoden und Verfahren liefern belastbare Daten zur Beurteilung des Bauwerkszustands und der Werkstoffqualität. Auf Basis der mit diesen Verfahren bestimmten Daten lassen sich Prognosen über die Werkstoff- bzw. die Schadensentwicklung erstellen, sie sind die notwendigen Eingabedaten für die in Appendix E vorgestellten Prognosemodelle.

Appendix H Pilotprojekt

Datenblatt Autobahnbrücke A7 BW 122-1

Bauwerksnummer	8429655 1
Bauwerksname	Brücke A7 über KrOAL2 Füssen-Hopferau
Teilbauwerksname	Brücke A7 über KrOAL2 Füssen-Hopferau (122-1)
Nächstgelegener Ort	Hopfen
Verwaltung/Gemarkung	Füssen
Bemerkung	Teilbauwerk1 = „östlicher Überbau“ Richtungsfahrbahn Kempten Teilbauwerk 2 = „westlicher Überbau“ Richtungsfahrbahn Füssen



Übersichtsblatt

Art	Plattenbalkenbrücke		
Baujahr	1999		
Zustandsnote	1,7		
Konstruktion	Spannbeton-Platte ü. 1 Feld		
Stadium	Bauwerk unter Verkehr		
Stat. Sys. L:	Einfeldrig freiauflegend		
Stat. Sys.-Q:	Echte Platte quer biegesteif, Flächentragwerk		
Amt	ABD Südbayern	SM:	AM Sulzberg
HP	02.04.2014	Prüfjahr	2014
EP	07.04.2011	Prüfjahr	2011
Ges.länge	14,17 m	Breite	14,73 m
Br. Fläche	209 m ²	Winkel	73,9 Rechts gon
Bst. Ubb.	Spannbeton	Q.UBB	Einstegiger Überbau als Vollquerschnitt
Q.HTW	Mit Querschnitt des Überbaus identisch	Felder	1
Baulast	Bund		

H.1 Bauwerksdaten

H.1.1 Bewehrungsüberdeckung

Informationen zur Messstelle								Bewehrungsüberdeckung						Messwerte < cmin			
Bauwerk	Bauteil	Messstelle	Scan-bezeichnung		Bewehrung		Länge	Messwerte	min	max	mittel	median	Stabw	Stabw	Unter-schreitung		
Bez.	Bez.	Bez	Nr	[H,L]	Lage	mm	m	Anzahl	m m	m m	mm	mm	mm	%	Anzahl	%	
A7 BW 124-1	Meßreihe 1	Längs-stäbe (vertikal)	5041	0,3	2	10	5,05	28	39	62	54	54	6	11,1	1	3,6	
			5052	1,3	2	10	5,59	28	38	60	46	45	6	13	2	7,1	
			5043	2,3	2	10	5,61	29	44	69	49	47	6	12,2	0	0	
								16,2									
							10	5	84	38	62	50	48	6	12	0	0
			Bügel (horizontal)	5044	0,5	1	10	3,66	24	56	80	64	63	5	7,8	0	0
		5045		2	1	10	3,64	23	51	67	59	60	4	6,8	0	0	
		5046		3,5	1	10	3,74	25	23	73	60	62	10	16,7	1	4	
		5047		5	1	10	3,77	25	30	73	61	64	10	16,4	1	4	
							14,8										
						10	1	97	23	80	61	62	8	13,1	1	1	
	Meßreihe 2	Längs-stäbe	5048	0,3	2	10	5,35	39	37	86	46	44	10	21,7	1	2,6	
			5049	1,3	2	10	5,67	29	36	79	48	47	8	16,7	1	3,4	
			5050	2,3	2	10	5,43	27	42	85	50	48	8	16	0	0	
								16,4									
							10	5	80	36	54	46	46	4	8,7	2	2,5
			Bügel	5051	0,5	1	10	3,9	26	58	71	65	65	4	6,2	0	0
		5052		2	1	10	3,99	27	57	68	63	64	3	4,8	0	0	
		5053		3,5	1	10	3,98	26	55	66	58	57	2	3,4	0	0	
		5054		5	1	10	4,02	27	56	94	67	63	11	16,4	0	0	
						15,8											
					10	9	100	55	71	62	62	4	6,5	0	0		

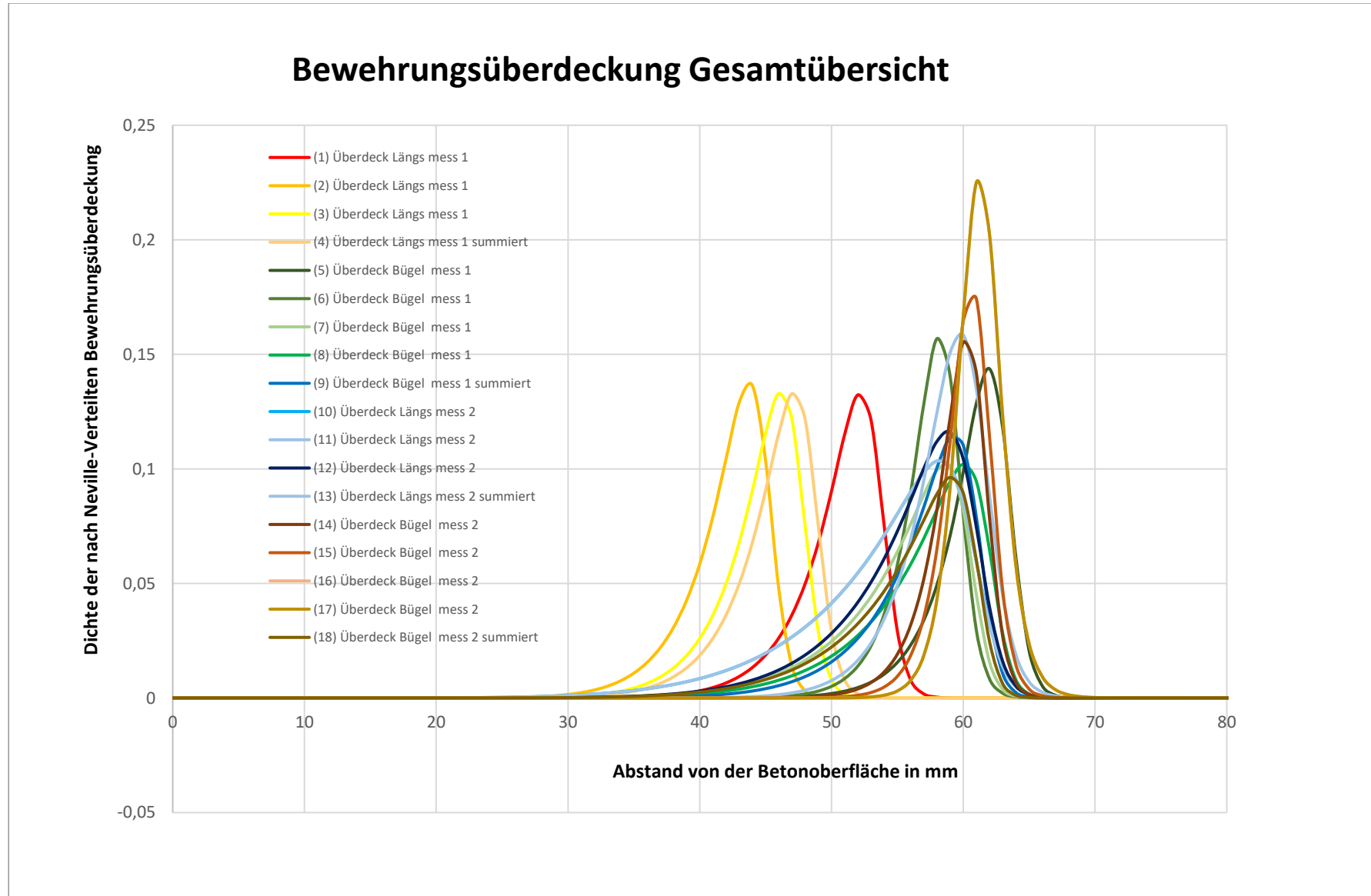


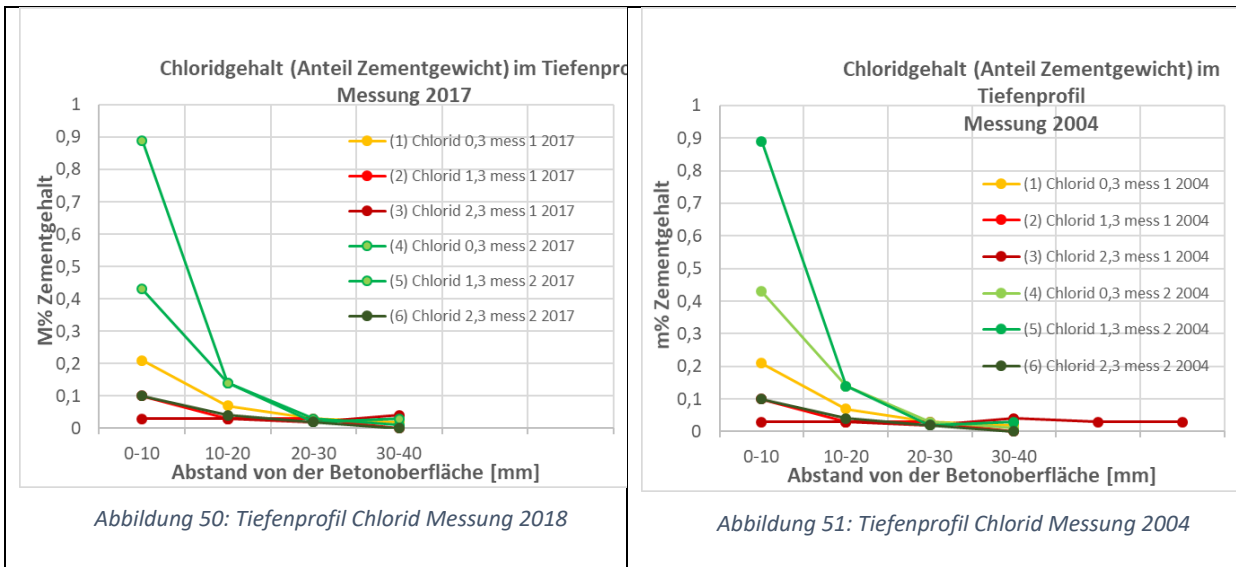
Abbildung 49: Gesamtübersicht Bewehrungsüberdeckung

H.2 SCHÄDIGUNGSMECHANISMUS - Chloridinduzierte Korrosion

H.2.1 Messgröße Chlorideindringtiefe:

Proben- informa- tion		Chlorid- gehalt Messung 1 2017	Pro- ben-in- forma- tion	Chlorid- gehalt Messung 1 2004	Proben- informa- tion	Chlorid- gehalt Messung 2 2017	Proben- informa- tion	Chlorid- gehalt Messung 2 2004
	Tiefe	Zement- gew.		Zement- gew.		Zement- gew.		Zement- gew.
	mm	M-%		M-%		M-%		M-%
(1) Chlo- rid 0,3 mess 1 2017	0-10	0,21	(1) Chlorid 0,3 mess 1 2004	0,21	(4) Chlo- rid 0,3 mess 2 2017	0,43	(4) Chlo- rid 0,3 mess 2 2004	0,43
	10-20	0,07		0,07		0,14		0,14
	20-30	0,03		0,03		0,03		0,03
	30-40	0,02		0,02		0,01		0,01
	40-50							
	50-60							
(2) Chlo- rid 1,3 mess 1 2017	0-10	0,1	(2) Chlorid 1,3 mess 1 2004	0,1	(5) Chlo- rid 1,3 mess 2 2017	0,89	(5) Chlo- rid 1,3 mess 2 2004	0,89
	10-20	0,03		0,03		0,14		0,14
	20-30	0,03		0,03		0,02		0,02
	30-40	0		0		0,03		0,03
	40-50							
	50-60							
(3) Chlo- rid 2,3 mess 1 2017	0-10	0,03	(3) Chlorid 2,3 mess 1 2004	0,03	(6) Chlo- rid 2,3 mess 2 2017	0,1	(6) Chlo- rid 2,3 mess 2 2004	0,1
	10-20	0,03		0,03		0,04		0,04
	20-30	0,02		0,02		0,02		0,02
	30-40	0,04		0,04		0		0
	40-50			0,03				
	50-60			0,03				

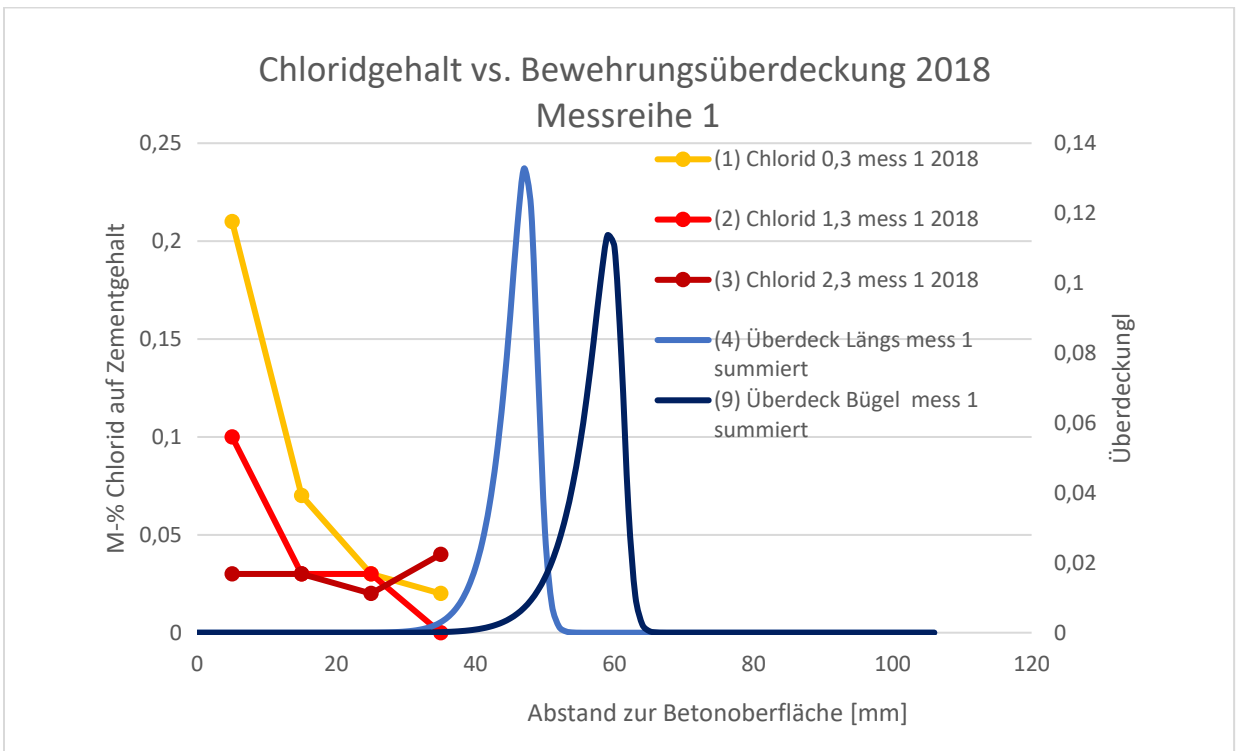
H.2.2 Tiefenprofil Chloridgehalt:



Keine Veränderung der Messwerte zwischen 2004 und 2017, Hieraus kann geschlossen werden, dass die Oberflächen mit Präventionsmaßnahmen behandelt wurden → Hydrophobierung

H.2.3 Indikator für die Chloridinduzierte Korrosion - Chlorideindringtiefe vs. Bewehrungsüberdeckung

Messungen 2018



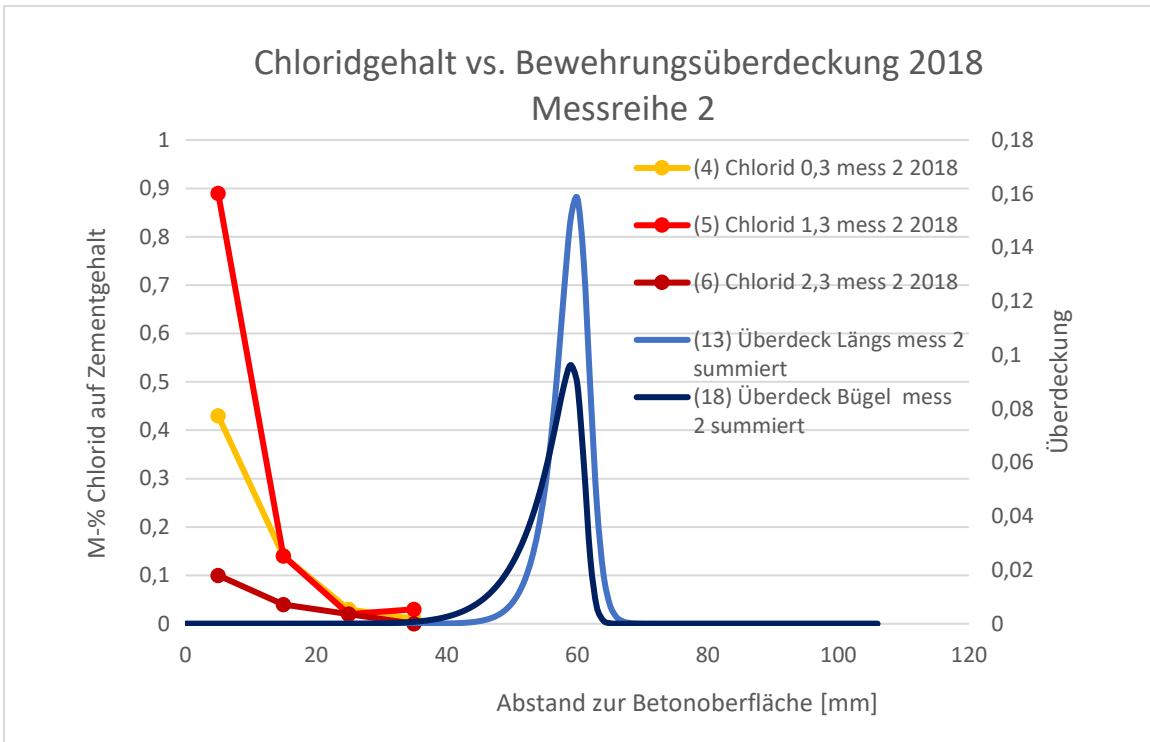


Abbildung 53: Darstellung der Chlorideindringtiefe und der Bewehrungsüberdeckung (Messreihen 2018)2

Messungen 2004

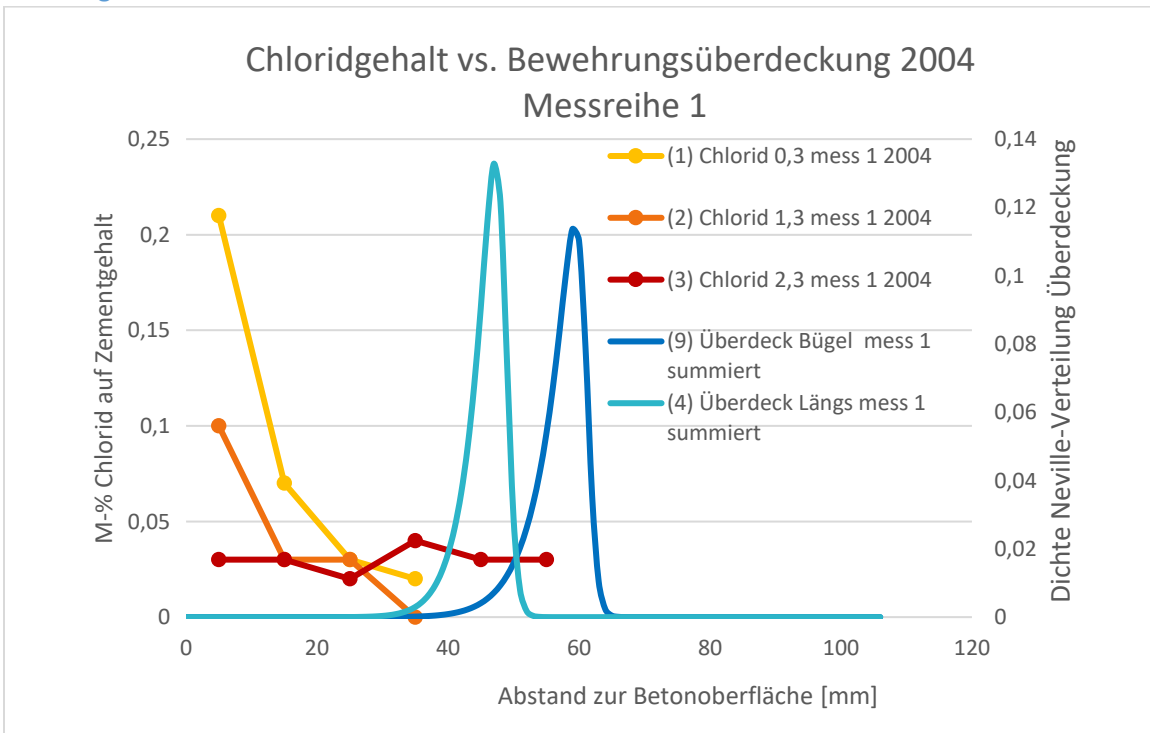


Abbildung 54: Darstellung der Chlorideindringtiefe und der Bewehrungsüberdeckung (Messreihen 2004)1

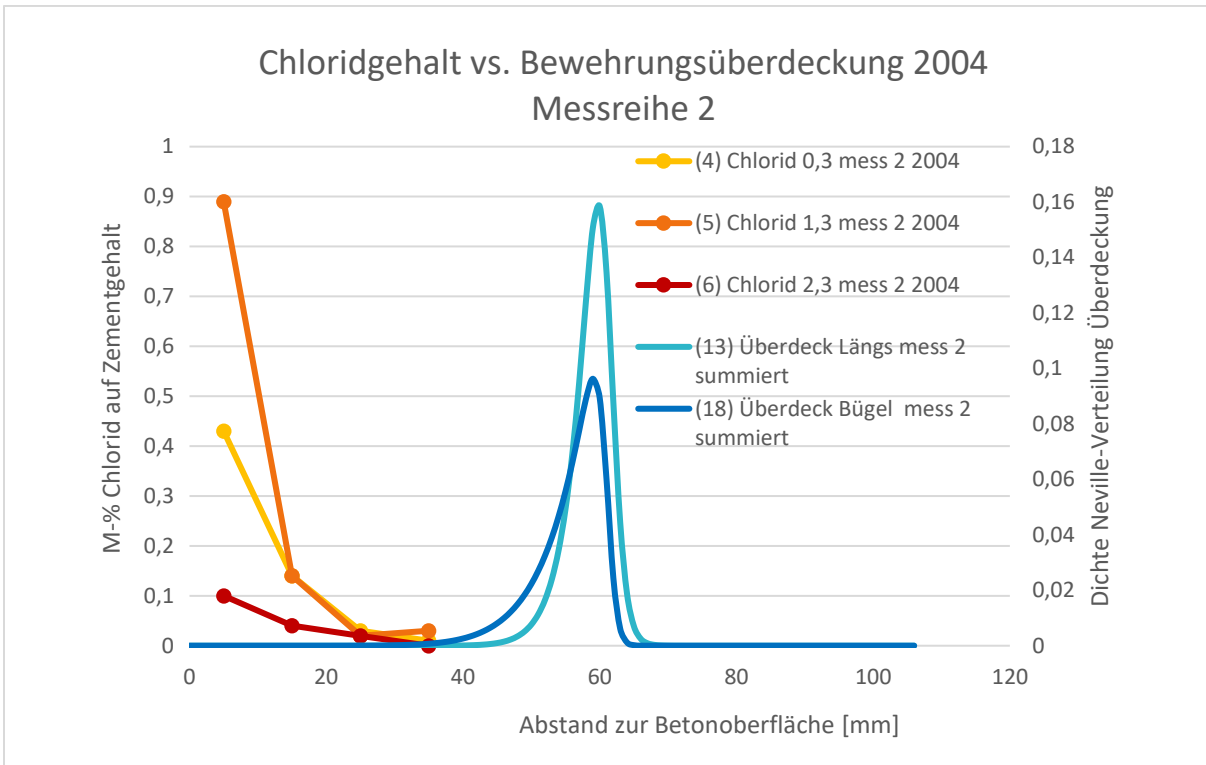


Abbildung 55: Darstellung der Chlorideindringtiefe und der Bewehrungsüberdeckung (Messreihen 2004)2

H.2.4 Schlussfolgerung:

Es besteht kein Risiko der chloridinduzierten Korrosion, da die Messwerte im Überdeckungsbeton größtenteils unter dem kritischen Wert von 0,5M-% Zementgewicht liegen und die Chloridfront zwar beinahe erreicht hat, sich aber die Chloridkonzentration im Überdeckungsbeton in den letzten 15 Jahren nicht verändert hat.

H.3 SCHÄDIGUNGSMECHANISMUS - Korrosion auf Grund von Carbonatisierung

H.3.1 Messgröße: Carbonatisierungstiefe

Carbonatisierungstiefe 2018							
Proben-informa-tion	dk1	dk2	dk3	dk4	dk mean	dk min	dk max
Bauwerk	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
1.3 (0,3 m)	6	4	7,5	5	5,6	4	7,5
1.2 (1,3 m)	6,7	7	4,2	4,1	5,5	4	7
1.3 (2,3 m)	7	6	5,6	6,1	6,2	6	7
Messlinie 2							
2.3 (0,3 m)	4,1	1	2,7	3,8	2,9	1	4,1
2.3 (1,3 m)	7,5	2	2	3,2	3,7	2	7,5
2.3 (2,3 m)	7,6	9,1	8	8	8,2	8	9,1

Carbonatisierungstiefe 2004							
Proben-informa-tion	dk1	dk2	dk3	dk4	dk mean	dk min	dk max
Bauwerk	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
1.3 (0,3 m)	4	7	9	12	8,0	4	12
1.2 (1,3 m)	4	5	5	6	5,0	4	6
1.3 (2,3 m)	2	3	5	6	4,0	2	6
Messlinie 2							
2.3 (0,3 m)	3	7	9	9	7,0	3	9
2.3 (1,3 m)	2	2	4	4	3,0	2	4
2.3 (2,3 m)	4	2	1	1	2,0	1	4

H.3.2 Tiefenprofil Carbonatisierungstiefe

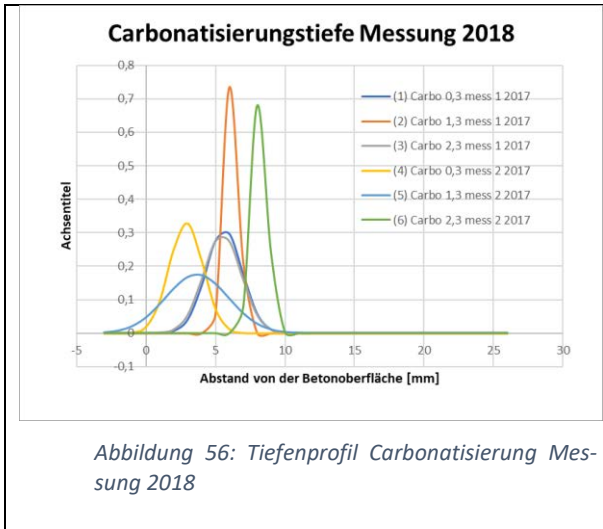


Abbildung 56: Tiefenprofil Carbonatisierung Messung 2018

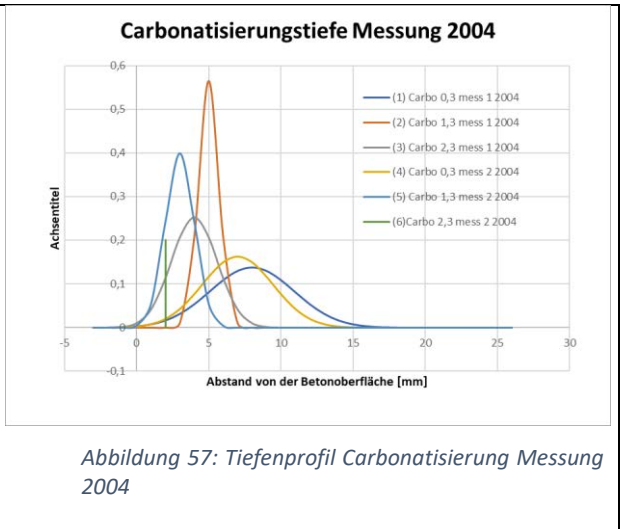


Abbildung 57: Tiefenprofil Carbonatisierung Messung 2004

H.3.3 Indikator für die Korrosion auf Grund der Carbonatisierung - Carbonatisierungstiefe vs. Bewehrungsüberdeckung

Messung 2018

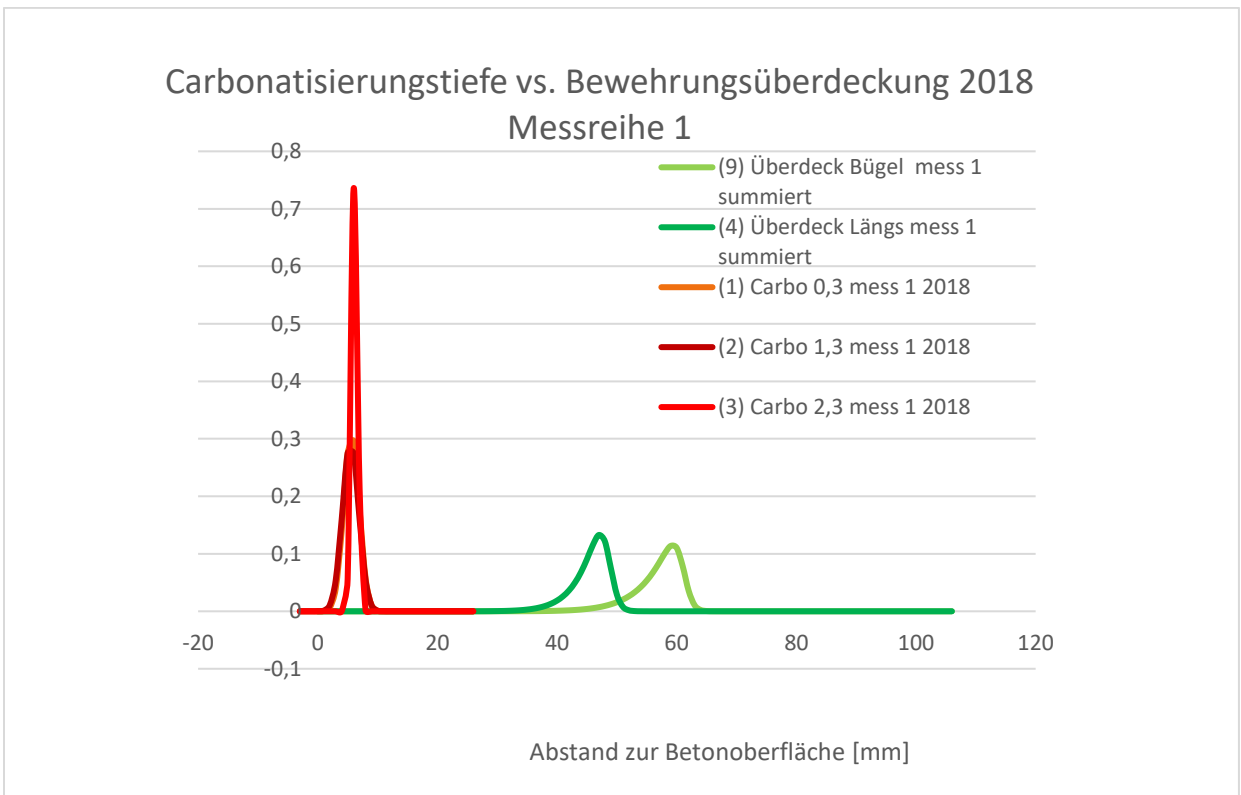


Abbildung 58: Darstellung der Verteilung der Carbonatisierungstiefe und der Bewehrungsüberdeckung (Messung 2018)1

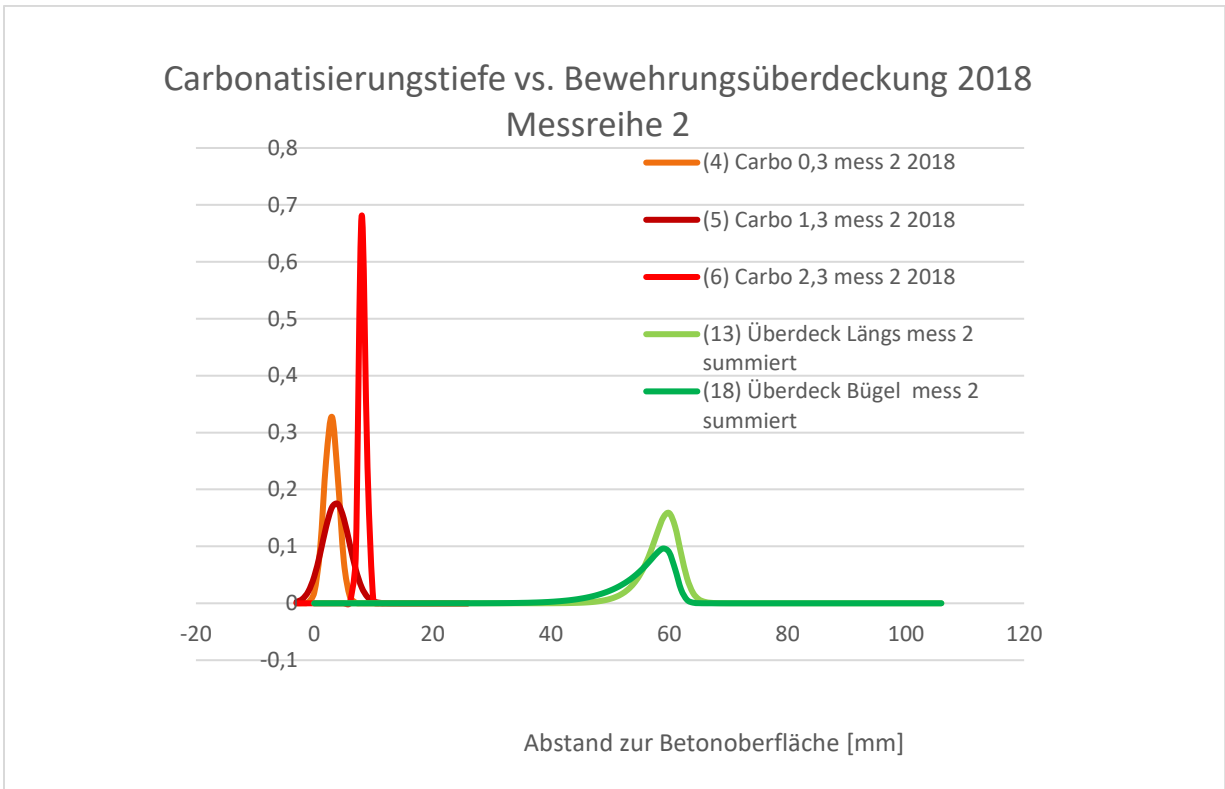


Abbildung 59: Darstellung der Verteilung der Carbonatisierungstiefe und der Bewehrungsüberdeckung (Messung 2018)2

Messung 2004

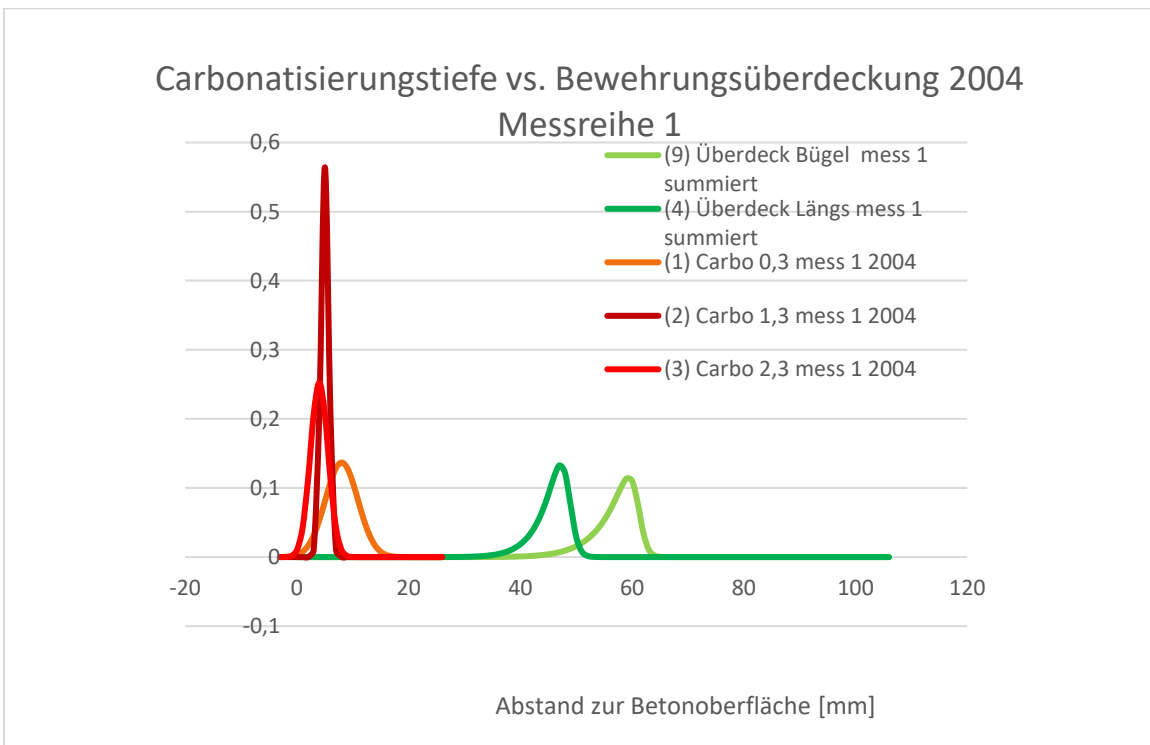


Abbildung 60: Darstellung der Verteilung der Carbonatisierungstiefe und der Bewehrungsüberdeckung (Messung 2004)1

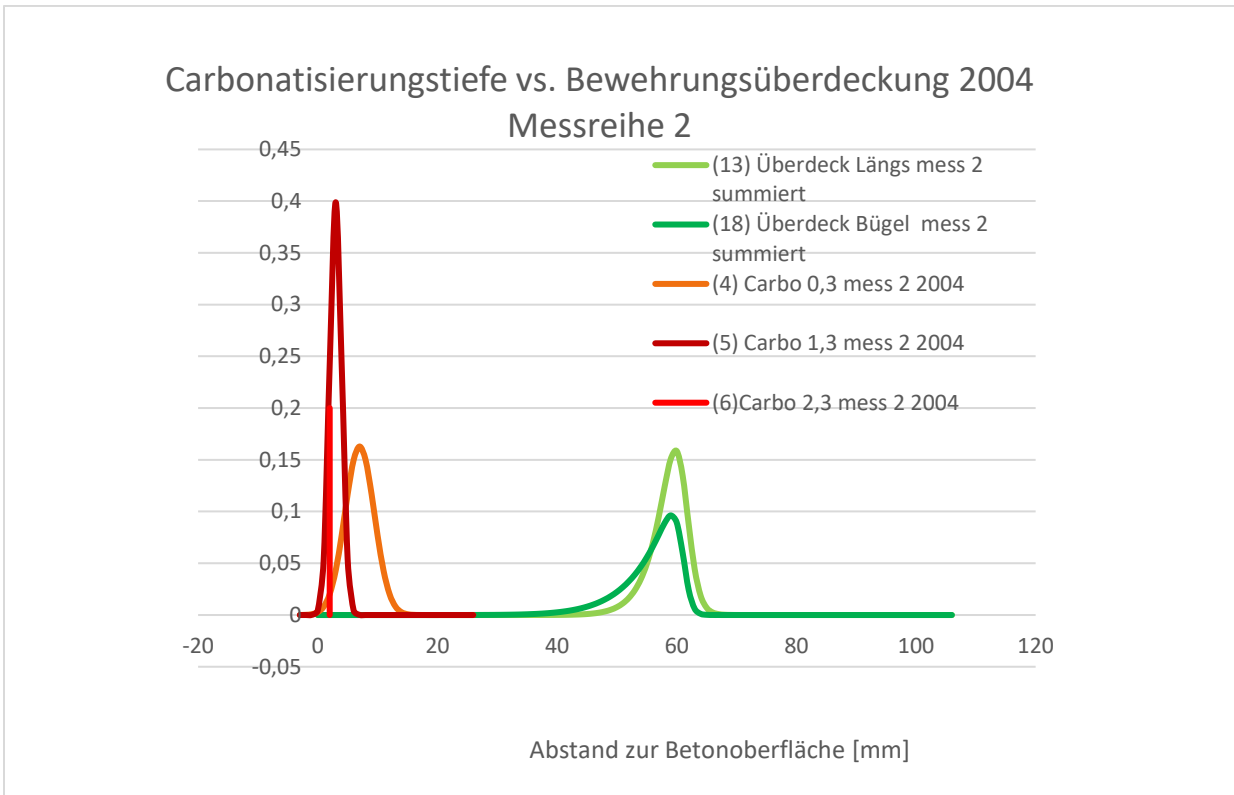


Abbildung 61: Darstellung der Verteilung der Carbonatisierungstiefe und der Bewehrungsüberdeckung (Messung 2004)2

H.3.4 Schlussfolgerung:

Die Carbonatisierungsfrent liegt noch weit von der Bewehrungsüberdeckung entfernt. -->kein Risiko für Korrosion auf Grund der Alterung des Betons.

Die Carbonatisierungsfrent ist in den vergangen 15 Jahren nur um ca. 2-3mm vorangeschritten.

H.4 Schlussfolgerung Bauwerk:

- Wirksamkeit der Hydrophobierung wurde nachgewiesen
- Hydrophobierung hat keinen negativen Einfluss auf den Carbonatisierungsfortschritt
- Für das Bauwerk besteht weder ein Risiko der Korrosion durch Carbonatisierung noch auf Grund chloridinduzierter Korrosion
- Die Bewehrungsüberdeckung ist weit höher als der Carbonatisierungsfortschritt und auch als die Chlorideindringtiefe
- Veränderung der Carbonatisierungsfrent in den vergangenen 15 Jahren minimal
- Keine Veränderung im Chloridprofil

Keine kurzfristigen Maßnahmen erforderlich

Mittelfristig Erneuerung der Hydrophobierung

H.5 Netzbewertung

H.5.1 Zielstellung und Gliederung

Ziel des Kapitels „Netzbewertung“ ist das Aufzeigen von Möglichkeiten zur Anwendung des entwickelten Konzepts für ein indikatorgestütztes Lebenszyklusmanagement von Bauwerken der Verkehrsinfrastruktur auf Netzebene. Zu diesem Zweck werden ausgewählte Schritte des definierten PDCA-Zyklus für das Bundesfernstraßennetz der Autobahndirektion Bayern Süd (ABDSB) und das Wasserstraßennetz des Wasserstraßen- und Schifffahrtsamtes Neckar (WSA Neckar) pilotiert. Grundlage für die weiteren Ausführungen bilden die folgenden Abschnitte „Zieldefinitionen“ und „Datenquellen und Methodik“.

Im Folgenden werden in einzelnen Abschnitten die Phasen Check und Act beleuchtet. Der reduzierte Umfang rührt daher, dass in diesem Pilotprojekt kein vollständiger PDCA-Zyklus abgebildet werden kann. Da nur mit Auszügen von Bestandsdaten gearbeitet wird, können keine Ziele gesetzt (Plan), noch umgesetzt (Do), noch kontrolliert werden (Check). Somit auch kann auch keine Korrektur einer Strategie simuliert werden (Act).

H.5.2 Zieldefinitionen

Für jeden PDCA-Zyklus müssen Ziele bzw. Bewertungskriterien festgelegt werden. Für das Pilotprojekt wird auf die im Bundesverkehrswegeplan 2030 formulierten Ziele zurückgegriffen (Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur, 2014, p. 18):

1. Mobilität im Personenverkehr ermöglichen
2. Sicherstellung der Güterversorgung und Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen
3. Erhöhung der Verkehrssicherheit
4. Reduktion der Emissionen von Schadstoffen und Klimagasen
5. Begrenzung der Inanspruchnahme von Natur und Landschaft
6. Verbesserung der Lebensqualität in Regionen und Städten

Die Verfolgung der Ziele wird anhand von drei nicht ausformulierten Kriterien pilotiert:

- Baulicher Zustand (mit Bezug zu den Zielen 1-4)
- Wiedervernetzung von Lebensraumnetzwerken (mit Bezug zu Ziel 5), äquivalent zur Betrachtung des Kriteriums 2.4.2 „Wiedervernetzung von Lebensraumnetzwerken bei Ausbauprojekten“ gemäß BVWP 2030 (Dahl et al., 2016, p. 273)
- Lärmbelastung

H.5.3 Datenquellen und Methodik

Zur Netzbewertung müssen aufgrund der Komplexität des Problems verschiedenste Daten zusammengeführt werden. Daher werden an dieser Stelle die unterschiedlichen Datenquellen, die in den Arbeitsprozess eingeflossen sind, kurz vorgestellt. Tabelle 3 gibt eine Übersicht über die von Auftraggeberseite bereitgestellten Datensätze. Diese beschränken sich im Wesentlichen auf Auszüge der in den Behörden BASt und BAW verwendeten Datenbanken zum Objektmanagement.

Tabelle 3: Von der Betreuergruppe bereitgestellte Datenquellen

Quelle:	Titel:	Inhalt:	Format:
BAW	Bauwerksverzeichnis	Stammdaten Objekte und Zu-standsnoten	XLSX
BAW	Schadensliste	Schäden je Objekt	XLSX
BASt	Bauwerksdatenbank ASB-ING	Excel Auszug der ASB-ING Tabellen	XLSX
ABDBS	Brückenbücher	9 Brückenbücher im standardisierten Format	PDF

Ein wesentlicher Schwachpunkt der bereitgestellten Datensätze bei der Netzbewertung ist der Mangel an enthaltenen Geoinformationen. Weder der Auszug der ASB-ING noch das Bauwerksverzeichnis der BAW enthält transparente Ortsangaben zur automatischen Verarbeitung. Ebenfalls nicht enthalten in den Auszügen sind Parameter zur Bewertung der Funktion der Bauwerke im Netz, wie z.B. die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke auf Brücken. Daher werden die Datensätze um Informationen durch die in Tabelle 4 aufgeführten Datensätze bzw. Geodatendienste ergänzt.

Die Geokoordinaten der in der ASB-ING geführten Brückenbauwerke wurden durch die Tageszeitung DIE WELT veröffentlicht und können zur weiteren Verarbeitung auf der Homepage des Blattes bezogen werden. Die Tageszeitung hatte den Datensatz gerichtlich eingefordert (Pauly and Nagel, 2016).

Die BASt stellt das Bundesinformationssystem Straße (BISStra), sowie die Datensätze der automatischen Achslastauswertungen auf Bundesfernstraßen (ALJA) und der automatischen Zählstellen auf Bundesfernstraßen (JaWe) (Bundesanstalt für Straßenwesen, n.d.) online zur Verfügung. Obwohl diese Datensätze alle über Geokoordinaten eine räumliche Zuordnung erlauben, besteht Potential zur Optimierung des Informationsmanagements. Die Daten liegen, wie der Tabelle entnommen werden kann, in unterschiedlichen Formaten vor und unterscheiden sich auch in der Zeichenkodierung³⁰. Dies erhöht den Aufwand im Datenimport und der Datenverarbeitung.

Die Daten der manuellen Straßenverkehrszählung 2015 (Bundesanstalt für Straßenwesen, 2018a) können nicht ohne weitere Informationen verarbeitet werden, da in den Datensätzen keine Informationen zum Standort außer der Zählstellen-Nummer (TKZST) inkludiert sind. In unabhängigen Publikationen können jedoch zum Stand Juni 2019 nur Geodaten für das Saarland, Hamburg (publiziert auf MetaVer) bzw. Sachsen (publiziert auf GovData) ausgemacht werden.

Zur Darstellung des deutschen Eisenbahnnetzes wird der Datensatz „Strecken und Bauwerke nach INSPIRE“ vom Open-Data-Portal der Deutschen Bahn AG verwendet (Michael Binzen, 2015). Streckenauslastungen sind nur in einer Veröffentlichung der DB Netze AG zu finden (DB Netz AG, n.d.), die allerdings keinen gemeinsamen Schlüssel mit den DB Inspire Daten aufweist.

Für die Beurteilung, ob Verkehrsinfrastrukturen Schutzgebiete nach den Maßgaben der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (Richtlinie 92/43/EWG) bzw. der Vogelschutzrichtlinie (Richtlinie 79/409/EWG) durchschneiden, kann vom Bayerischen Landesamt für Umwelt (Bayerisches Landesamt für Umwelt, n.d.) ein

³⁰ Zum Beispiel ist der Datensatz ALJA UTF 8 encodiert, wohingegen der JaWe-Datensatz sich der Zeichenkodierung nach ISO/IEC 8859-1 „Latin-1“ bedient.

Appendix H

Shapefile (ein Format für vektorielle Geodaten) der ausgewiesenen Natura 2000-Gebiete bezogen werden.

Tabelle 4: Weitere zur Auswertung hinzugezogene Datenquellen

Quelle:	Titel:	Inhalt:	Format:
BAST	BISStra	Nullpunkte, Netzknoten und Sektoren der Bundesfernstraßen	GeoJSON
BAST	ALJA	Automatische Achslastauswertungen auf Bundesfernstraßen	CSV
BAST	JaWe	Automatische Zählstellen auf Bundesfernstraßen	CSV
Investigativ.de	Datensatz IFG-Anträge und parlamentarische Anfrage der Grünen	Koordinaten der Brücken an Bundesfernstraßen (komplett)	CSV
SPIEGEL ONLINE	„Brückendaten“	Koordinaten der Brücken an Bundesfernstraßen (Zustand > 3.0)	GeoJSON
DB Netz AG	Strecken und Bauwerke nach INSPIRE	Schienenverkehrsnetz gemäß INSPIRE der DB Netz AG.	XML
LfU Bayern	Natura2000-Gebiete	Geo-Informationen zu Natura200-Gebieten (FFH und Vogelschutz)	Shapefile
LfU Bayern	Lärmkartierung (Hauptverkehrsstraßen)	WMS-Dienst zur Darstellung der Kartierungsergebnisse nach EG-	Als .png abgerufen
EBA	Ergebnisse der strategischen Lärmkartierung	Umgebungslärmrichtlinie	Als .png abgerufen

Lärmkartierungen für die Verkehrsträger Straße und Schiene können als Web Map Service (WMS) beim LfU Bayern bzw. dem EBA abgerufen werden (Bayerisches Landesamt für Umwelt, n.d.). Ein WMS ist eine Schnittstelle, die das Abrufen von Auszügen von Karten aus dem Internet erlaubt. Das bedeutet, dass keine Datenpunkte übertragen werden, sondern sogenannte „map tiles“. Dies sind kleine Kartenausschnitte, bei denen die Ergebnisse der Daten bereits in Bildern/Graphiken visualisiert wurden. Diese Bilder automatisch auszuwerten ist sehr aufwändig und wird deshalb in diesem Projekt nicht umgesetzt.

Auch die GDWS stellt einen WMS Dienst zur WADABA Wasserstraßendatenbank der WSV über das Informationstechnikzentrum Bund (ITZBund) als Anbieter bereit (Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, n.d.). Eine Abfrage des Service war im Rahmen des Projektes nicht möglich³¹. Anstelle einer automatischen Auswertung wurden daher die Geodaten von 51 Wehr- und Schiffsschleusenanlagen von Hand recherchiert.

³¹ Zum Zeitpunkt der Recherche war die Dokumentation des Dienstes falsch verlinkt. Eine Anfrage an ITZBund wurde gesendet; die Antwort konnte jedoch ob des späten Zeitpunkts nicht berücksichtigt werden.

Tabelle 5: Verwendetes Polygon zur Begrenzung des Betrachtungsbereichs (WGS 84)

Breitengrad [°]	Längengrad [°]
10,1	48,5
11,9	49,5
12,5	49,6
13,6	48,5
13,0	47,8
12,2	47,6
11,1	47,4
9,6	47,6
10,0	48,5

Die für das Verkehrssystem Straße vorgestellten Daten umfassen häufig das gesamte Bundesgebiet bzw. den gesamten Freistaat Bayern. Daher ist für die weitere Auswertung eine Einschränkung des Bereichs notwendig. Für die Daten, die zur Netzbewertung des Bundesfernstraßennetzes der ABDBS genutzt werden, wird das in Tabelle 3 definierte Polygon verwendet. Das Polygon wurde auf Basis einer veröffentlichten Karte zum Verantwortungsbereich der ABDSB abgeschätzt (Autobahndirektion Südbayern, 2015).

Die aufgelisteten Daten bzw. WMS-Dienste werden in der offenen Programmiersprache R unter Verwendung verschiedener Pakete zur Arbeit mit Geodaten sowie weiteren Einsatzzwecken geladen und verarbeitet (Appelhans et al., 2018; Bivand et al., 2019,

2013; Bivand and Rundel, 2019; Chamberlain and Teucher, 2019; Cheng et al., 2018; Henry and Wickham, 2019; Hijmans, 2019; Müller and Wickham, 2019; Nüst et al., 2011; Pebesma, 2019, 2018; Pebesma and Bivand, 2005; R Core Team, 2017; Vaidyanathan et al., 2018; Wickham, 2017; Xie, 2018). In Abschnitt H.5.9 ab Seite 100 ist die Vorgehensweise grob beschrieben.

Der BISStra-Datensatz „Sektoren“ beispielsweise kann mit den Daten der automatischen Zählstellen, der automatischen Achslastauswertungen, dem Auszug der ASB-ING und weiteren Daten wie beispielsweise den Geodaten der Natura 2000 Gebiete angereichert werden. Tabelle 6 zeigt eine beispielhafte Zusammenfassung für den Bereich der Autobahndirektion Bayern Süd.

Tabelle 6: Überblick über die mit BISStra assoziierten Daten

	DTV [Kfz/24h]	pSV [%]	EDTA [-]	Zustandsnote [-]	Länge [km]
Minimum:	3.447	2,70	4.112	1,000	0,00200
1. Quantil:	19.038	7,40	4.690	1,900	0,08625
Median:	47.462	13,10	5.268	2,200	0,35300
Mittelwert:	51.310	13,05	5.180	2,159	1,17743
3. Quantil:	73.875	16,95	5.715	2,500	0,80025
Maximum:	138.117	32,90	6.162	3,500	32,41400
Leerzeilen:	6.727	6751	6.843	5.299	-

Die Tabelle zeigt die Verteilung der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke (DTV), den Schwerverkehrsanteil (pSV), der Anzahl der äquivalenten Achsübergänge des Schwerverkehrs (EDTA), der Zustandsnote der Brücken und der Länge der Sektoren im angereicherten BISStra-Datensatz. Mit diesen Daten können Bundesfernstraßen nach Ihrer Nutzung bzw. dem Zustand der Brücken klassifiziert werden. Eine äquivalente Darstellung für das Verkehrssystem Wasserstraße entfällt, da neben den Objektinformationen, die durch die BAW übermittelt wurden, keine weiteren Daten verarbeitet werden.

H.5.4 Autobahndirektion Bayern Süd: Phase „Check“

Netzbewertung Autobahndirektion Bayern Süd: Baulicher Zustand

Inhalt einer Bewertung des baulichen Zustands auf Netzebene ist die Erfassung und Analyse räumlicher Zusammenhänge. Ziel ist eine Bewertung der Leistungsfähigkeit des Netzes. Da es sich um ein komplexes Problem handelt dessen Lösung keineswegs trivial ist, wird eine Mischung aus quantitativen Indikatoren mit begleitenden Untersuchungen empfohlen.

Die Funktions- und Leistungsfähigkeit des Netzes ist von der Funktions- und Leistungsfähigkeit der zugrunde liegenden Verbindungen bzw. „Korridore“ abhängig. Im Sinne der Netzbewertung ist daher eine korridorbezogene Auswertung unter Einbezug von Alternativstrecken interessant. Quantitative Indikatoren wie Durchschnittswerte oder Perzentile sind zwar in dieser Hinsicht informativ, verschleiern jedoch räumliche Zusammenhänge. Diese können nur mit adäquaten Methoden behandelt werden. Die wohl eingängigste Methode ist die Visualisierung auf einer Karte. Durch die Geokodierung von Daten lassen sich aber auch automatische Auswertungen durchführen.

In die Netzbewertung fließen gemäß Konzept die Ergebnisse der laboranalytischen Untersuchungen sowie weitere netzrelevante Daten ein. Da im Pilotprojekt - wie auch bei einer hypothetischen Einführung des Systems - die Ergebnisse der laboranalytischen Bewertung noch nicht (flächendeckend) vorliegen, wird hier stattdessen auf den Auszug der ASB-ING unter Berücksichtigung der recherchierten Geodaten zurückgegriffen.

In einem ersten Schritt werden die erfassten Daten zum baulichen Zustand der Brückenbauwerke auf einer interaktiven Karte visualisiert. Hierfür werden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt:

1. Darstellung der erfassten Objekte durch einen individuellen Marker, dessen Farbe den Zustand des Objektes widerspiegelt
2. Berechnung der durchschnittlichen Zustandsnote für einzelne Sektorsequenzen³², die wiederum entsprechend farblich markiert wurden

Tabelle 7: Verwendete Farbcodierung für Zustandsnoten

Zustandsnote	Farbe
$Z \leq 2,3$	Grün
$2,3 < Z \leq 3,3$	Orange
$3,3 < Z$	Rot
unbekannt	Weiß

Anhand der Visualisierungen kann man sich in kurzer Zeit einen Überblick über die räumliche Verteilung der Zustandsnoten verschaffen. Abbildung 62 zeigt Screenshots der ersten beschriebenen Darstellungsvariante. Auf der rechten Seite der Abbildung sind u.a. individuelle Marker zu sehen. Die Farbe des Markers gibt einen groben Aufschluss über den Zustand des Bauwerks; in diesem Fall ist der angeklickte Marker grün, was gemäß Tabelle 7 bedeutet, dass die Zustandsnote im Bereich $\leq 2,3$ liegt. Durch das Anklicken können weitere Informationen abgerufen werden. Auf der linken Seite der Abbildung ist eine

³² Der Begriff „Sektorsequenz“ stammt aus dem Bundesinformationssystem Straße und bezeichnet einzelne Straßenabschnitte mit Längen von 2m bis 32km. Im Durchschnitt ist eine Sektorsequenz ca. 1km lang.

Appendix H

alle Karten in Appendix H: © OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA

Karte in größeren Maßstab zu erkennen. Die Einzelobjekte wurden automatisch zu Clustern zusammengefasst, deren Farbe wiederum die schlechteste Zustandsnote der Einzelobjekte wiedergibt.

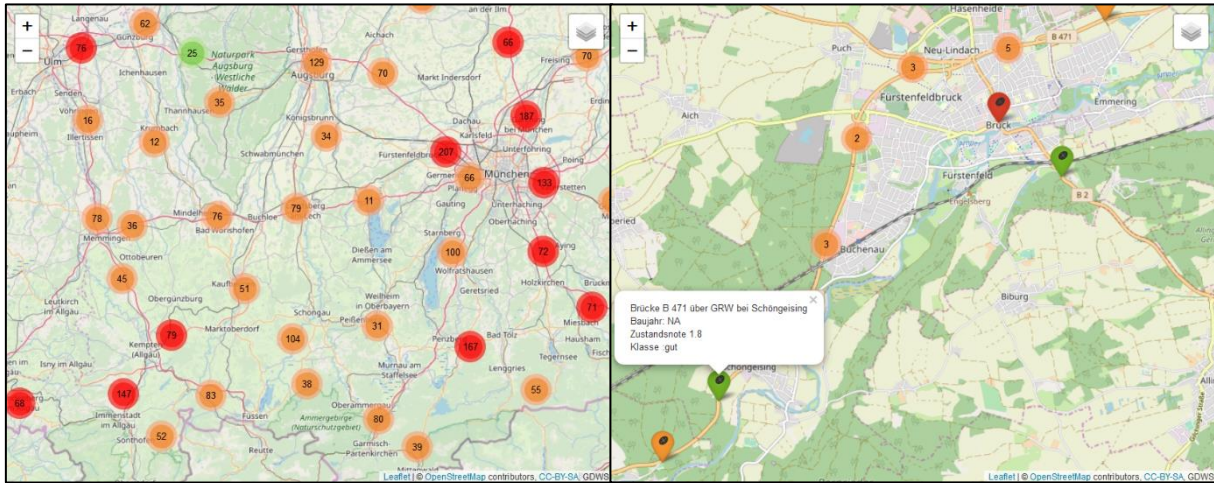


Abbildung 62: Objektweise Darstellung der Zustandsnote; links: automatische Clustering bei größeren Kartenausschnitt; rechts: einzelner Marker mit PopUp für ein Objekt neben weiteren Clustern bei kleinerem Kartenausschnitt

Der zweite Visualisierungsansatz ist in Abbildung 64 zu sehen. Es wurden ähnliche Kartenausschnitte gewählt. Anstelle von Markern, die Objekte und ihren Zustand anzeigen, wurden die Sektorsequenzen der Bundesfernstraßen entsprechend des mittleren Zustands der Bauwerke entlang der Straße demselben Schema entsprechend Tabelle 7 eingefärbt. Die rechte Hälfte der Abbildung zeigt wieder zusätzliche Informationen, die durch Anklicken der entsprechenden Sequenz abgerufen werden können.

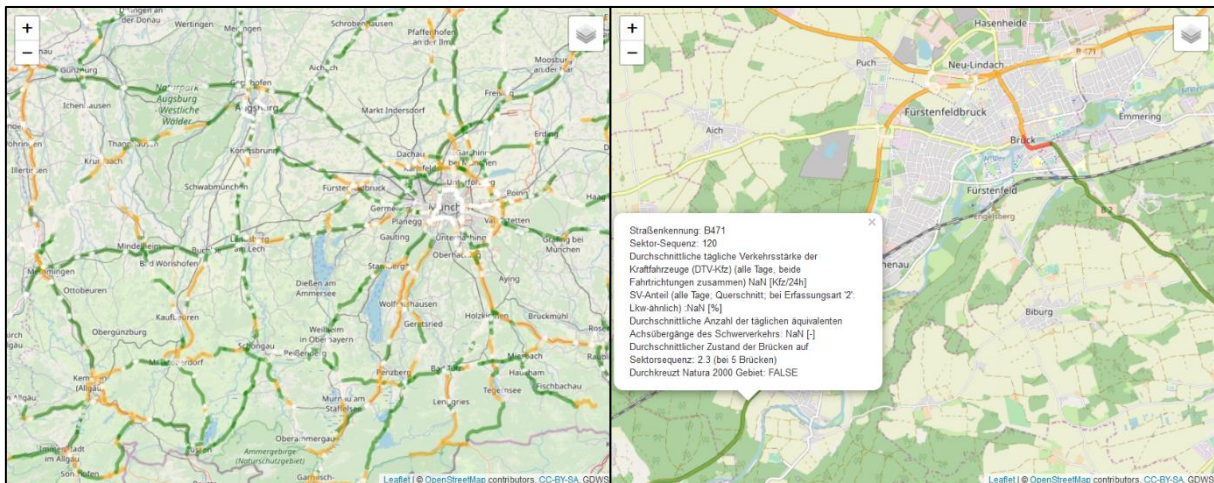


Abbildung 63: Sektorsequenzweise Darstellung der Zustandsnoten von Brücken; links: Übersicht über einen größeren Kartenausschnitt; rechts: Pop-Up beim Anklicken einer Sektorsequenz

Die Abbildungen wurden mit der freien JavaScript-Bibliothek Leaflet als interaktive Karten in R erstellt (Cheng et al., 2018). Leaflet ist eine der am weitest verbreiteten Bibliotheken zur Erstellung von WebGIS-Anwendungen und eignet sich zum Erstellen von interaktiven Dashboards zur Umsetzung des hier vorgestellten Konzepts. Neben reinem Text lassen sich auch HTML-Code inklusive Links zu weiterführenden Informationen bzw. Tools in die Pop-Ups der Karte einpflegen.

Im zweiten Schritt werden die Daten in aggregierter Form ausgewertet. Tabelle 8 zeigt die zehn Streckenabschnitte mit der schlechtesten mittleren Zustandsnote für Brücken für die Daten aus den automatischen Zählstellen vorliegen.

Tabelle 8: Auszug der zehn Sektorsequenzen mit der schlechtesten mittleren Zustandsnote für die eine durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke vorliegt

Straßen- kennung	Sektor- Sequenz	Ort	Zustandsnote ¹	DTV ^{1,2} [Kfz/24 h]	pSV ^{1,3} [%]	Länge [km]
A3	2.620	Regensburg	3	74.278	18	2,484
A3	2.580	Regensburg	2,9	79.535	18,1	6,42
A3	2.520	Nittendorf / Re-	2,8	43.656	21,9	17,66
A3	2.540	gensburg	2,8	59.157	17,8	15,138
A9	2.380	AK Garching-Nord	2,8	138.117	nV	8,332
A92	340	Landshut	2,8	44.075	13,1	6,24
A99	360	Hohenbrunn	2,8	96.523	nV	7,098
B304	120	Karlsfeld	2,8	28.349	6,9	2,813
A93	700	Schwandorf	2,7	45.958	15,1	6,64
A93	840	Regensburg	2,7	70.397	nV	4,292
A93	920	Regensburg	2,7	66.507	10,8	2,082
B471	440	Bergkirchen	2,7	27.365	10,1	0,562

¹Bei den Angaben handelt es sich um das arithmetische Mittel der Datenpunkte entlang der angegebenen Strecke.

²Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke der Kraftfahrzeuge (alle Tage, beide Fahrtrichtungen zusammen)

³SV-Anteil (alle Tage; Querschnitt; bei Erfassungsart "2": Lkw-ähnlich)

Ohne Zielvorgabe ist eine abschließende Bewertung des baulichen Zustands nicht möglich. Gemäß RI-EBW-PRÜF 2017 sind Bauwerke ab einer Zustandsnote $\geq 3,0$ umgehend instand zu setzen. Dies trifft auf 244 von 5958 ($\approx 0,4\%$) Bauwerken bzw. bei Betrachtung der mittleren Zustandsnote auf 32 von 7231 ($\approx 0,5\%$) Sektor-Sequenzen zu.

Netzbewertung Autobahndirektion Bayern Süd: Lärmschutz

Abbildung 64 zeigt wieder zwei Kartenausschnitte, die die bezogenen Daten visualisieren. Die linke Abbildungshälfte zeigt Memmingen. Die Isophone für Hauptverkehrsstraßen und Hauptstrecken der Bahn sind eingezeichnet. Die Daten werden jeweils durch das LfU Bayern bzw. das EBA als WMS-Dienst bereitgestellt.

Netzbewertung Autobahndirektion Bayern Süd: Wiedervernetzung von Lebensraumnetzwerken

Das Kriterium „Wiedervernetzung von Lebensraumnetzwerken“ wird gemäß BVWP 2030 anhand der Ergebnisse der F+E-Vorhabens 3507 82 090 des Bundesamtes für Naturschutz überprüft (Dahl et al., 2016, p. 268). Mangels Veröffentlichung der Geodaten wird die Überprüfung anhand der Natura 2000 Gebiete

Appendix H

simuliert, die für die sonstigen Kriterien der strategischen Umweltprüfung des BVWP eine hervorgehobene Rolle spielen.

Die rechte Hälfte von Abbildung 64 zeigt Füssen-West. In grün eingezeichnet sind Natura 2000 Gebiete, deren Umrisse als Polygone vom LfU Bayern bereitgestellt werden. Wie auf der Karte zu sehen ist, durchkreuzt hier die A7 eines der beiden eingezeichneten Naturschutzhabitate. Im speziellen Fall ist das Habitat untertunnelt, sodass eine Durchlässigkeit bereits gegeben ist.

Im Gegensatz zu den Daten des LfU Bayern eignet sich der Auszug der ASB-ING nicht zur automatischen Auswertung der Sachlage. Die übermittelten Auszüge eignen sich nicht zur Prüfung, ob bei vorliegender Zerschneidung eines Naturschutzgebietes die Durchlässigkeit trotzdem gegeben ist. Hinweise darauf, ob es sich bei Bauwerken entlang einer Bundesfernstraße um einen Tunnel, eine Wild- bzw. Grünbrücke handelt oder ob das Gebiet mittels einer Talbrücke überquert wird, finden sich nur in der Namensbezeichnung. Die Namensbezeichnung ist jedoch ein nicht standardisiertes Textfeld. Daher muss bei einem Abgleich nach Stichwörtern zur Identifizierung von Wildbrücken davon ausgegangen werden, dass nicht alle entsprechenden Bauwerke identifiziert werden können. Bei Talbrücken kommt das Problem hinzu, dass zwar die Standorte durch eine Internetrecherche bezogen werden konnten und die Länge der Bauwerke in der ASB-ING benannt werden, jedoch unklar ist, welche relative Position die Bauwerke zu den bezogenen Koordinaten haben. Deshalb entfällt die Auswertung zur Wiedervernetzung von Lebensraumnetzwerken.

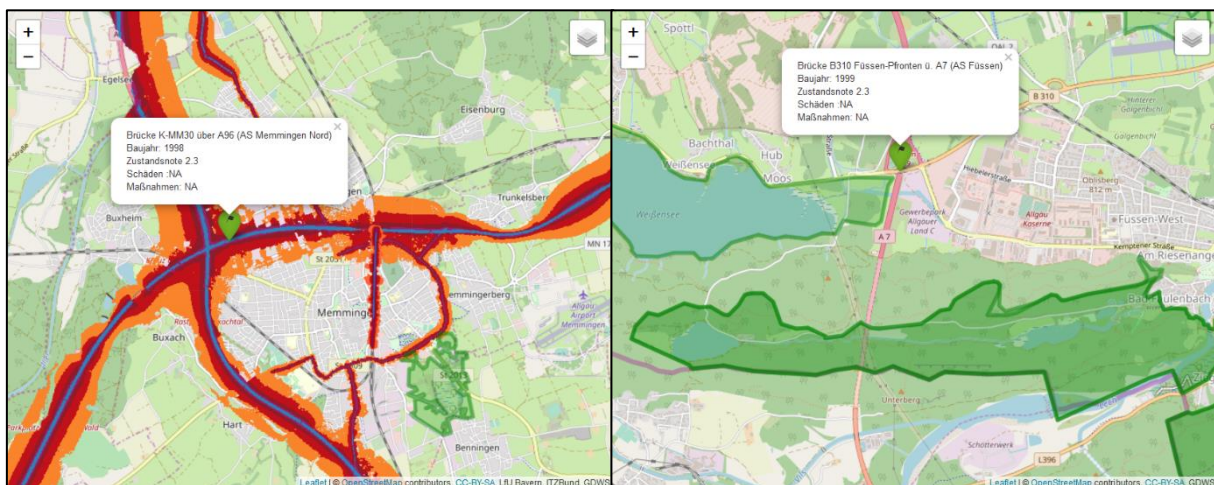


Abbildung 64: Widget-Ausschnitte zu den Themen Lärm (links) und Naturschutzgebiete (rechts)

H.5.5 WSV Neckar: Phase „Check“

Netzbewertung WSV Neckar: Baulicher Zustand

Die Ausgangssituation bei der Netzbewertung für die WSV Neckar ist ähnlich zu der bei der ABDBS. Zwar liegen Auszüge aus der Bauwerksdatenbank vor, jedoch fehlen in diesem Auszug die Geoinformationen. Wesentliche Unterschiede ergeben sich jedoch in der Verfügbarkeit der Geodaten.

Wie im Abschnitt „Datenquellen und Methodik“ beschrieben stellt die GDWS zahlreiche Geodaten-dienste im Internet zur Verfügung, die auch in eigenen Clients für Mobil- und Desktopgeräte eingesehen werden können. In diesen Clients lassen sich auch per Click Informationen aus der Wasserstraßendaten-

Appendix H

bank der WSV (WADABA) beziehen. Es wurde ein manueller Ansatz zur Beschaffung von Geoinformationen gewählt. So wurden 51 der im Bauwerksverzeichnis gelisteten Objekte wiedergefunden und deren Geodaten bezogen. Jedoch war es im Laufe des Pilotprojekts nicht möglich die Daten über die definierten Schnittstellen für eine automatische Auswertung abzufragen. Daher wurde ein manueller Ansatz zur Beschaffung von Geoinformationen gewählt.

Lediglich für 58 der 120 Bauwerke im Bauwerksverzeichnis gelisteten Objekte liegen Zustandsnoten vor. 54 dieser 58 Bauwerke fallen in die Kategorie Wehr- oder Schiffsschleusenanlagen. Daher wurden für diese 54 Bauwerke im WMS Client gesucht. Äquivalent werden zur Netzbewertung bei der Autobahndirektion die Daten zur Visualisierung wieder in ein Leaflet Widget geladen und gemäß dem Farbschema aus Tabelle 7 eingefärbt. Screenshots der Ergebnisse sind in Abbildung 65 dargestellt.

Im Gegensatz zum Bundesfernstraßennetz der ABDSB handelt es sich beim Neckar um eine „einzelne Strecke“ ohne Alternativrouten im selben Verkehrssystem.

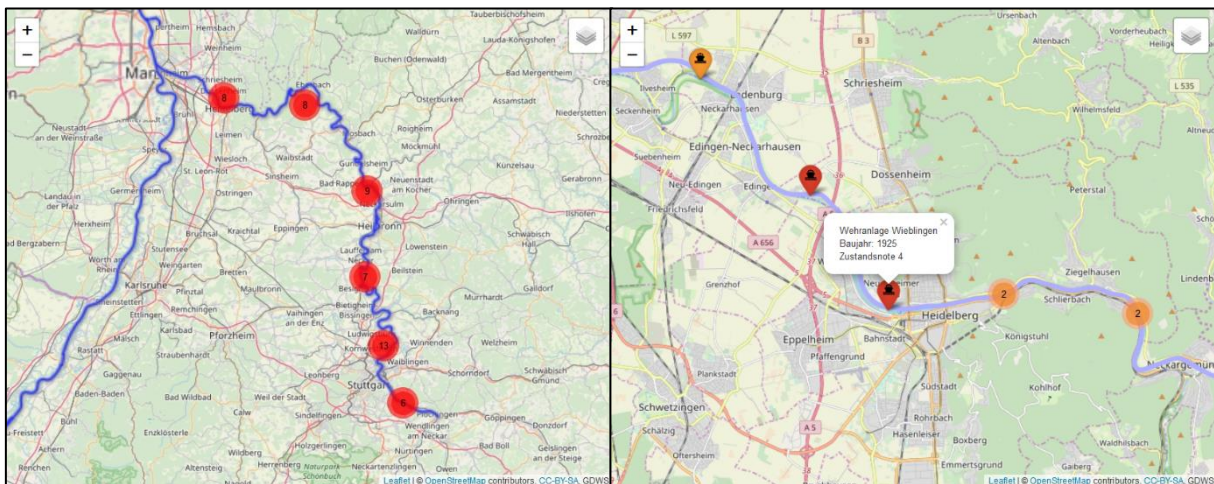


Abbildung 65: Objektweise Darstellung der Zustandsnoten für Wehr- und Schiffsschleusenanlagen der WSV Neckar; links: Zusammenfassung in Clustern bei großem Kartenausschnitt, rechts: Einzelobjekte bei kleinerem Kartenausschnitt

Netzbewertung WSV Neckar: Lärmschutz und Wiedervernetzung von Lebensraumnetzwerken

Gemäß dem Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegeplan entfällt die Überprüfung des Kriteriums „Veränderung der Geräuschbelastung“ bei der Überprüfung Wasserstraßen (Dahl et al., 2016, pp. 232–251). Das Kriterium „Wiedervernetzung von Lebensraumnetzwerken“ wird grundsätzlich bei Wasserstraßenprojekten geprüft (Dahl et al., 2016, p. S.259). Die Umsetzung wurde an dieser Stelle unterlassen, da für Wasserstraßenprojekte grundsätzlich andere Gebiete als die Natura 2000 Gebiete von Interesse sind

H.5.6 Autobahndirektion Bayern Süd: Phase „Act“

Das Ziel der Act-Phase ist es eine Änderung der derzeitigen Strategie auf Basis der Abweichung von SOLL- und IST-Werten der Plan- bzw. Check-Phase sowie der weitergehenden Untersuchungen abzuleiten. Hierfür werden Stärken und Schwächen im IST-Zustand des Netzes betrachtet, Chancen und Risiken abgewogen, Ursachen für den derzeitigen IST-Zustand untersucht und die Effektivität von Maßnahmen zur Verbesserung des IST-Zustands evaluiert.

SWOT-Analyse

Die SWOT-Analyse gliedert sich wie zuvor erklärt in eine interne und eine externe Analyse. In der internen Analyse werden Stärken und Schwächen des Netzes bewertet. In der externen Analyse kommt eine Betrachtung externer Umweltfaktoren hinzu. Die Kernthesen, die aus der Netzbewertung resultieren, sind in Tabelle 9 zusammengefasst und in Abbildung 66 graphisch im Standard-Diagramm visualisiert.

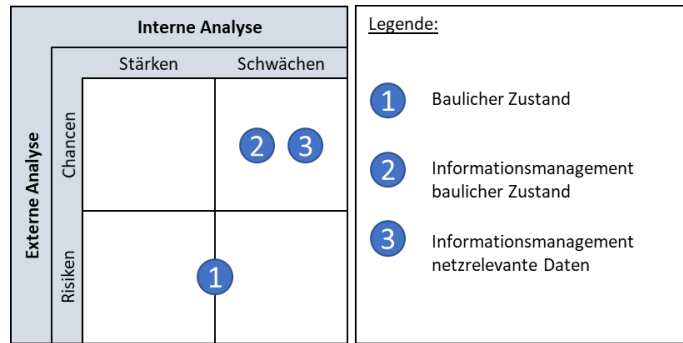


Abbildung 66: Graphische Darstellung der SWOT-Analyse

Wie im Abschnitt Netzbewertung gezeigt wurde, liegen netzrelevante Daten im Pilotprojekt punktuell vor. Deshalb beschränkt sich die SWOT-Analyse auf den Bauwerkszustand und das Informationsmanagement für Bauwerks- und netzrelevante Daten. Zentrales Thema aller formulierten Thesen ist die Datenhaltung, die für jeden kontinuierlichen Verbesserungsprozess von entscheidender Bedeutung ist. Ein kontinuierlicher Verbesserungsprozess muss auf einer standardisierten Datenbasis erfolgen, da ohne diese weder Zielformulierungen noch Überprüfungen möglich sind.

Die formulierten Thesen zeigen klar, dass sich derzeit große Chancen durch mehr Transparenz ergeben. In dieses Projekt sind Geodaten und Geodienste unterschiedlicher Behörden und Unternehmen eingegangen. Behördliche Geodaten sind durch europäische Direktiven zunehmend standardisiert und leichter auffindbar. Dies ermöglicht die Verwendung der Daten unterschiedlicher Verkehrssysteme in eigenen Bewertungen.

Schwächen im bisherigen Informationsmanagement ergeben sich aus drei Faktoren: 1.) Die Daten sind dezentral verteilt und häufig nicht auf zentralen Datenportalen gelistet; 2.) Nicht standardisierte Datensätze sind noch immer die Regel. Dies ist insbesondere bei mangelhafter Dokumentation ein großes Hindernis bei der Auswertung; 3.) Selbst innerhalb einer Institution werden unterschiedliche Datenformate mit abweichender Zeichenkodierung und nicht einheitlichen Referenzsystemen verwendet.

Tabelle 9: Kernthesen der SWOT-Analyse

Thema	Interne Analyse	Externe Analyse
Baulicher Zustand	Lediglich 0,5% der untersuchten Bauwerke erfordern eine unmittelbare Instandsetzung. Mangels weiterer Informationen wird von einer Einstufung in Stärke oder Schwäche abgesehen.	Eine Analyse der externen Umwelt ist aufgrund einer mangelnden Datenbasis nicht möglich. Dies ist als Risiko einzustufen.
Informationsmanagement baulicher Zustand	Die Daten der ASB-ING sind nicht ohne weiteres für netzbezogene Auswertungen geeignet. Der übermittelte Auszug der Datenbank ist nicht normalisiert und wichtige Informationen sind nicht enthalten oder in Textfeldern in nicht standardisierter Form hinterlegt. Der erhöhte Aufwand der Auswertung ist als Schwäche einzustufen.	Das öffentliche Interesse an den Zustandsdaten, die sich durch die extensive Berichterstattung zeigt, ist als Chance zu werten. Zum einen werden Investitionen in das Verkehrsnetz durch Transparenz gefördert, zum anderen sichert das öffentliche Interesse das Interesse der Forschungsgemeinschaft.
Informationsmanagement netzrelevante Daten	Netzrelevante Daten sind (für die Öffentlichkeit) nicht zentral abrufbar. Verschiedene Formate erschweren die Auswertung. Wichtige Daten sind nur als Abbildungen verfügbar. Der aus den Umständen resultierende erhöhte Aufwand der Auswertung ist als Schwäche einzustufen.	Immer mehr Datensätze zu netzrelevanten Daten, auch aus anderen Verkehrssystemen, sind aufgrund deutscher bzw. europäischer Gesetzgebung öffentlich und standardisiert auf zentralen Datenportalen verfügbar. Dies eröffnet die Chance besserer Untersuchungen In-House oder auch die wissenschaftliche Gemeinschaft.

Ursachenanalyse

Wie beschrieben ist die Umsetzung des Konzepts im SWOT-Diagramm schwierig. Deshalb wird als Beispiel für die Ursachenanalyse mittels Ishikawa-Diagramm genau dieses Problem behandelt. Auch da bei einer potenziellen Umsetzung die Frage nach den notwendigen Voraussetzungen zur Einführung von Bedeutung ist, scheint dies die hilfreichste Variante zu sein. Abbildung 67 zeigt das Ergebnis.

Wie üblich bei der Ursachenanalyse wird das Problem am Hauptstrang des Diagramms benannt. Im Folgenden werden die ausgewählten Kategorien zur Analyse – hier Mensch, Material, Maschine, Management, Methode, Mitwelt – festgehalten³³. An eigenen Pfeilen werden nun Ursachen (Haupteinflussgrößen) in den Kategorien in einem Brainstorming oder mithilfe anderer Kreativitätstechniken benannt. Mit

³³ Die Anzahl der untersuchten Kategorien kann je nach Problemstellung ergänzt werden.

weiteren Unterpfeilen können Nebeneinflussgrößen bzw. zugrundeliegende weitere Ursachen benannt werden.

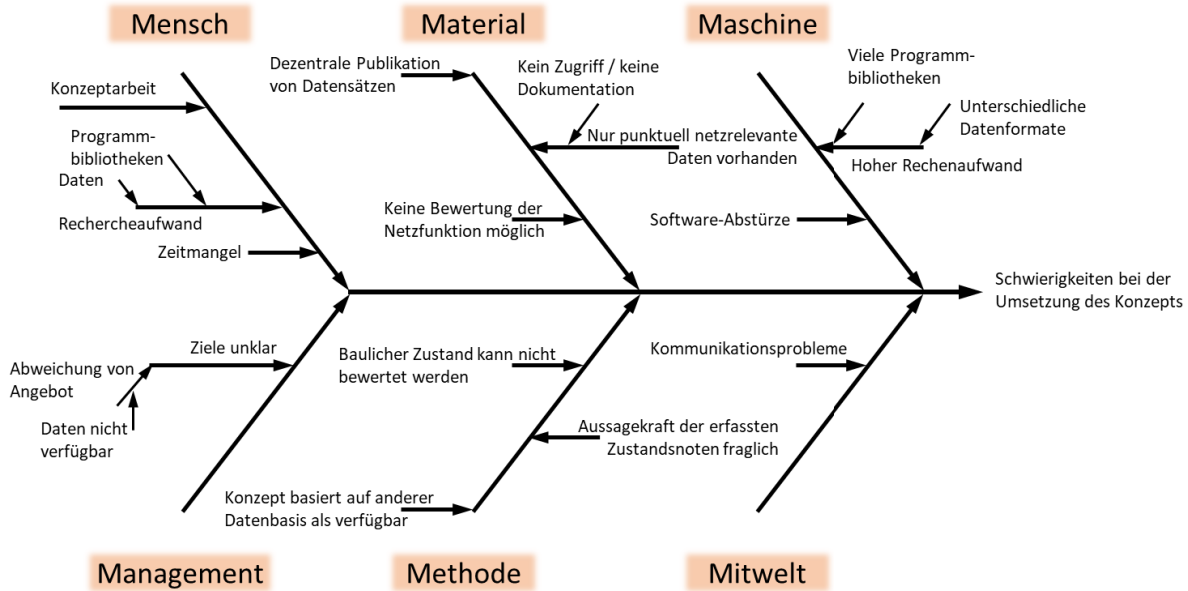


Abbildung 67: Ursachenanalyse zu Schwierigkeiten bei der Umsetzung des Konzepts

Bei der Begutachtung der Ergebnisse des Brainstormings wird das Spannungsfeld aus dem Anspruch des Konzepts und der Datenbasis wieder deutlich.

Pareto-Analyse

Mangels quantitativer Daten wird im Folgenden eine qualitative Liste an Vorschlägen zur Behebung der Probleme im Datenmanagement angegeben. Diese Auflistung ist rein exemplarisch und bezieht sich ausdrücklich nicht auf die in den Ämtern vorhandenen Datenstrukturen, da diese den Autoren unbekannt sind.

Maßnahmen	Erwartete Wirkung(en)	Geschätzter Aufwand	Geschätzte Wirkung
Zentrale Bereitstellung von Daten und Dokumentation auf Homepage des Expertennetzwerks oder bestehenden Open-Data-Portalen	<ul style="list-style-type: none"> • Schnellere und günstigere Entwicklung neuer Software • Bessere Datenbasis für Untersuchungen intern und extern • Gesteigertes Interesse der Öffentlichkeit an Instandhaltung durch Berichterstattung • Impulse durch die Forschungsgemeinschaft 	Gering	Mitte

Maßnahmen	Erwartete Wirkung(en)	Geschätzter Aufwand	Geschätzte Wirkung
Einführung eines standardisierten Datenformats für netzrelevante Daten im Rahmen des Verantwortungsbereichs des Expertennetzwerks	<ul style="list-style-type: none"> • Schnellere und günstigere Entwicklung neuer Software • Einfacherer Datenaustausch zwischen Behörden 	Mittel	Mittel
Veranstaltung von Hackathons bzw. Einbezug der Bauwerksverwaltung in die Hackathons des BMVI	<ul style="list-style-type: none"> • Impulse für neue Softwaresysteme • Aufdeckung von Ineffizienzen • Chancen für Personalrekrutierung 	Mittel	Gering
Umstellung der Zustandsbewertung	<ul style="list-style-type: none"> • Siehe Bericht 	Hoch	Hoch

H.5.7 Änderung der netzweiten Strategie

Ohne vorliegende Strategie können keine konkreten Änderungsvorschläge gemacht werden. Es ist aber nicht auszuschließen, dass hier gemachte Empfehlungen bereits umgesetzt wurden, jedoch den Autoren nicht bekannt sind. Aufgrund der übermittelten Daten wird aber angenommen, dass es sich um die Hauptquellen für die Bearbeitung beim Instandhaltungsmanagement handelt.

Die Anforderungen an Quantität der Input-Daten sind selbst für verhältnismäßig einfach zu überprüfende Indikatoren des BVWP 2030 hoch. Entlang der gesamten Kette des PDCA-Zyklus ist die Umsetzungsfähigkeit durch die eingeschränkte Verfügbarkeit von Datensätzen gehemmt. Ebenso sind bei manueller Bearbeitung viele Arbeitsschritte nötig, die einer Bauaufsicht fachfremd sind.

Sind Geodaten verfügbar, ist es aber wie gezeigt möglich und praktikabel Funktionen für die Abfrage bestimmter Daten aus verschiedenen Quellen zu schreiben und so Bauwerks- und andere punktuelle Informationen mit Netzdaten zu verbinden. Im Pilotprojekt wurde ein Leaflet Widget zur Visualisierung und Abfragen in R genutzt um Daten einfach, schnell und flexibel umzusetzen. Die Methodik lässt sich auch in Form von Weboberflächen bei bestehender Datenbasis kostengünstig umsetzen, z.B. in Form von Dashboards. Gerade ausformulierte Vorgehensweisen wie die des Methodenhandbuchs zum Bundesverkehrswegeplan lassen sich auch als dynamische Dokumente im Sinne der Definition von Xie (Xie, 2015, pp. 1–4) umsetzen, die mit aktualisierter Datenbasis automatisch angepasst werden. Solche Dashboards und dynamischen Dokumente eignen sich, um netzrelevante Informationen reproduzierbar auf Abruf bereitzustellen. Als einfach zu benutzende und verständliche Wissensgrundlage zur Erweiterung der Entscheidungsbasis können die Techniken in den Arbeitsprozess eingebunden werden.

H.5.8 Fazit

Die vorliegende Datenbasis hat sich in mehrfacher Hinsicht als unbefriedigend herausgestellt. Die von Auftraggeberseite bereitgestellten Datensätze sind grundsätzlich nicht für Netzbewertungen geeignet. Hierfür sind folgende Punkte von Bedeutung³⁴:

- Die Datensätze behandeln Objekte und nicht die dazugehörigen benötigten Verkehrsnetze.
- Die Datensätze enthalten, zumindest in ihrer übermittelten Form, keine Angaben, die eine direkte räumliche Verortung der Bauwerke erlauben.
- Die Datensätze enthalten keine Informationen zur Nutzungsintensität bzw. volkswirtschaftlichen Bedeutung der Bauwerke.

Deshalb wurden die übermittelten Datensätze nach intensiver Recherche um frei zugängliche Datensätze erweitert. Doch neben der zuvor erwähnten eingeschränkten Aussagekraft durch Lückenhaftigkeit der Daten und der Inkonsistenzen zwischen verschiedenen Quellen, haben sich weitere Kritikpunkte herauskristallisiert:

- Obwohl viele Informationen öffentlich zum Download bereitstehen, wird eine Verknüpfung der Daten durch fehlende gemeinsame Identifier bzw. Angaben von Koordinaten erschwert bis unmöglich gemacht.
- Andere Informationen stehen nicht als Download, sondern lediglich als Web Map Services (WMS) bereit. Diese ermöglichen zwar eine Betrachtung der Daten, aber keine automatisierte Auswertung.
- Die Daten und Services sind auf unterschiedliche Webseiten verteilt. In den seltensten Fällen sind die Angebote auf den verschiedenen Datenportalen der EU, des Bundes oder der Länder katalogisiert.
- Einheitliche Datenformate finden sich zumeist nur in durch EU-Direktiven geforderten Datensätzen, z.B. Richtlinie 2007/2/EG zur Schaffung einer Geodateninfrastruktur in der Europäischen Gemeinschaft (INSPIRE).

Diese Umstände erschweren nicht nur die Auswertung von dritter Seite, sondern in den zuständigen Behörden selbst. Innovative Ansätze, insbesondere im sich stetig weiterentwickelnden IT-Bereich, der viele Potenziale für ein besseres Lebenszyklusmanagement bietet, werden durch die mangelnde Transparenz, Inkonsistenzen in den Datensätzen und die Lückenhaftigkeit des Angebots stark gehemmt. Auch wenn viele an dieser Stelle monierten Datenlücken in Fachsystemen der Behörden abrufbar sein sollten und diese lediglich für das Projekt nicht zur Verfügung standen, ist dies nicht im Sinne des Informationsfreiheitsgesetzes und verschenktes Innovationspotenzial.

H.5.9 Durchgeführte Datenumformungen

Die durch die BAW und die BAST bereitgestellten Daten enthalten keine Geoinformationen. Daher werden frei verfügbare Datensätze aus dem Internet bezogen (siehe Abschnitt Datenquellen und Methodik). Die Herstellung eines Bezugs zwischen den verschiedenen Datensätzen ist jedoch häufig nicht direkt möglich, z.B. bei der Zuordnung von Brücken, die im vorliegenden Auszug der ASB-ING benannt sind, zu

³⁴ Wenn im Folgenden von Datensätzen gesprochen wird, sind die Brückenbücher explizit nicht gemeint, da es sich bei PDFs um ohne weiteres automatisch Auswertbare Datenformate handelt

Bundesfernstraßen, deren Geokoordinaten im Bundesinformationssystem Straße (BISStra) hinterlegt sind.

Folgende Schritte geben einen groben Aufschluss über die durchgeführten Operationen, um genau jenen Zusammenhang herzustellen:

1. Brücken an Bundesfernstraßen (Datensätze: Auszug ASB-ING und Brückenbücher ABDBS) wurden per Abgleich der Teilbauwerksnummer mit den auf investigativ.de bereitgestellten Daten abgeglichen. Folgende Abweichung in dem durch die BAST übermittelten Auszug der ASB-ING führt jedoch zu Unklarheiten:
 - 1.1. Der von [investigativ](http://investigativ.de) veröffentlichte Datensatz enthält 51.539 Teilbauwerke, die allesamt nur Brücken betreffen sollten.
 - 1.2. Die BAST selbst beziffert die Anzahl der Brücken an Bundesfernstraßen auf 39.619 (Bundesanstalt für Straßenwesen, 2018b) und stellt einen Datensatz mit 51.609 Teilbauwerken bzw. 39.601 Gesamtbauwerken zum Download bereit (Bundesanstalt für Straßenwesen, 2018c).
 - 1.3. Die Auflistung der Brücken aus dem durch die BAST übermittelten Auszug aus der ASB-ING enthält hingegen nur 31.726 Teilbauwerke. Zudem weicht die ermittelte Verteilung der Zustandsnoten der Bauwerke von den von investigativ.de veröffentlichten Noten ab. Mangels einer Dokumentation zu den übermittelten Excel-Dateien kann die Abweichung nicht nachvollzogen werden. Es wird daher davon ausgegangen, dass die von investigativ.de publizierten Zahlen stimmen und der Auszug der ASB-ING für Berechnungen, die die Zustandsnoten umfassen, ignoriert.
2. Eine direkte Zuordnung von automatischen Zählstellen, Achslastauswertungen und Zustandsnoten zu Bundesfernstraßen war nicht möglich, obwohl für alle Datensätze Koordinaten vorlagen. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass im Bundesinformationssystem Straße Fernstraßen als Linien und die restlichen Daten als Punkte modelliert wurden. Da Linien unendlich dünn und Punkte unendlich klein sind, kann nur bei genauer Überdeckung ein Schnittpunkt gefunden werden. Dies war bei keinem Datenpunkt der Fall.

Daher wurden zur räumlichen Zuordnung von Punkten zu Straßenabschnitten mithilfe des Packages „sf“ (Pebesma, 2018) um die angegebenen Koordinaten Kreise mit 10m Durchmesser gezogen, die im Folgenden mit dem BISStra „BFStr_Netz_SK“-Datensatz abgeglichen wurden.

Dieser BISStra Datensatz ist in Sektoren mit Längen zwischen ca. 10m und 24km eingeteilt. Die Sektoren wiederum sind Sequenzen zugeordnet. Daher wurden zur besseren Darstellung die Daten nach den Gruppen „Str_Kennung“ und „SK_Sequenz“ mittels `dplyr` aggregiert (Wickham et al., 2019). Diese Aggregation vermindert die Anzahl der Einzeleinträge für den Betrachtungsbereich von 7.231 auf 6.846 Elemente.
3. Alle Linien und Polygone wurden zur Reduktion des Speicherbedarfs mit einer Toleranz von einem Zehntausendstel Grad vereinfacht. Dies kann beim Versuch die Ergebnisse zu reproduzieren zu Abweichungen führen.

Appendix I Bauwerkstypen nach Verkehrsträgern

I.1 Straße - (Bundesanstalt für Straßenwesen - BASt)

Im Straßennetz der Bundesfernstraßen sind 39.621 Brücken enthalten (Stand: 01.03.2018). Sie werden in Bundesautobahnen und Bundesstraßen unterteilt. Von den derzeit in Betrieb stehenden Brücken wurden 48,8 % (Bundesautobahn) bzw. 43,7 % (Bundesstraße) zwischen 1965 und 1984 errichtet. In Abbildung 68 sind die die Flächen der in Betrieb stehenden Bücken anteilig nach ihrer Bauweise dargestellt. Aus dieser Darstellung geht hervor, dass Beton der dominierende Werkstoff ist.

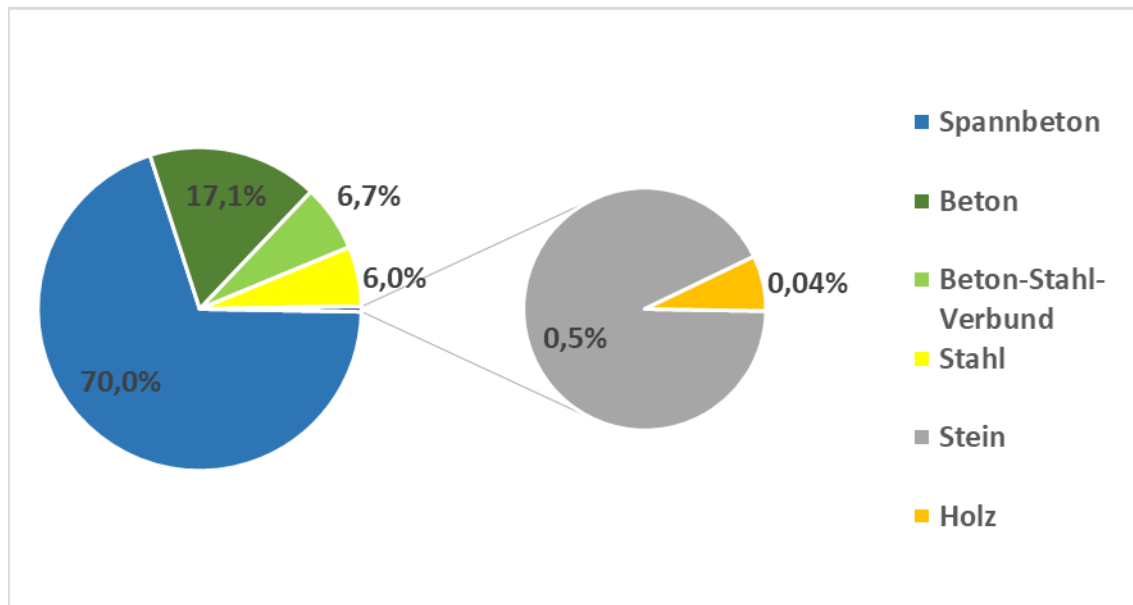


Abbildung 68: Darstellung der Brückenflächen bezogen auf die angewandte Bauweise (BASt, 01.03.2018)

Aus den Prüfungen der Brückenbauwerke nach RI-EBW-PRÜF, gemäß DIN 1076, gehen Bewertungen des Zustands der jeweiligen Brücke hervor. Aus diesen Bewertungen werden entsprechende Zustandsnoten abgeleitet. Diese Zustandsnoten teilen sich wie folgt auf: 1,0 - 1,4 (sehr guter Zustand), 1,5 - 1,9 (guter Zustand), 2,0 - 2,4 (befriedigender Zustand), 2,5 - 2,9 (ausreichender Zustand), 3,0 - 3,4 (nicht ausreichender Zustand) und 3,5 - 4,0 (ungenügender Zustand). In Abbildung 69 sind die Brücken der Bundesautobahnen und Bundesstraßen prozentual nach ihrem Zustand aufgeführt.

Appendix I

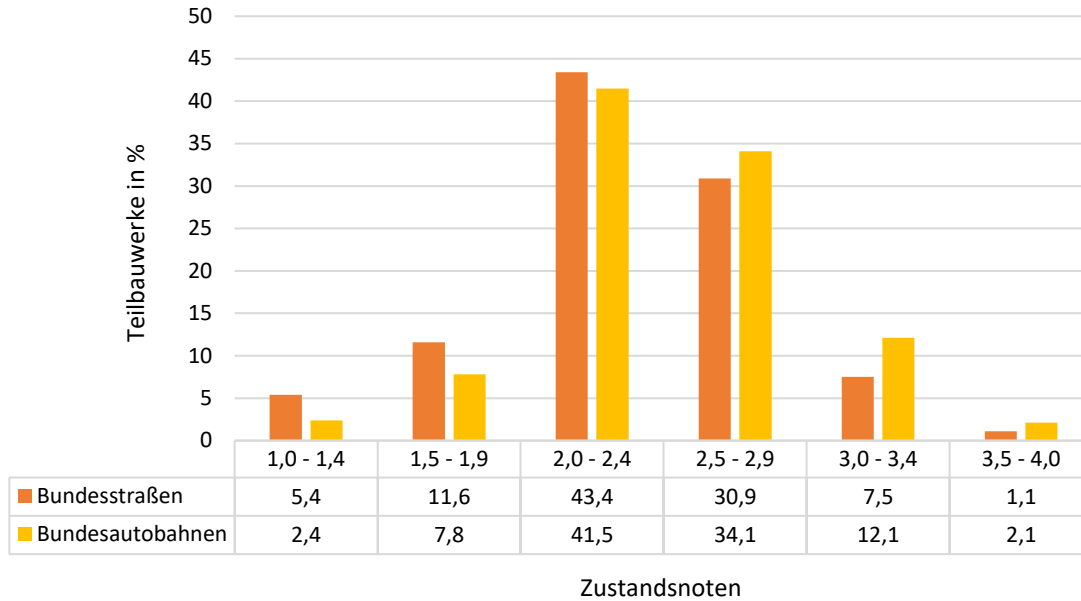


Abbildung 69: Darstellung der Zustandsnoten bezogen auf die Brückenflächen (BASt, 01.03.2018)

Die Gesamtheit der Brücken im Netz der Bundesfernstraßen wird je nach Länge des Bauwerks in Längensklassen unterteilt. Mit einem Anteil von 48,9 Prozent ist die Längensklasse der Brücken, mit einer Länge von 5 bis 30 Metern, die mit Abstand größte (s. Abbildung 70).

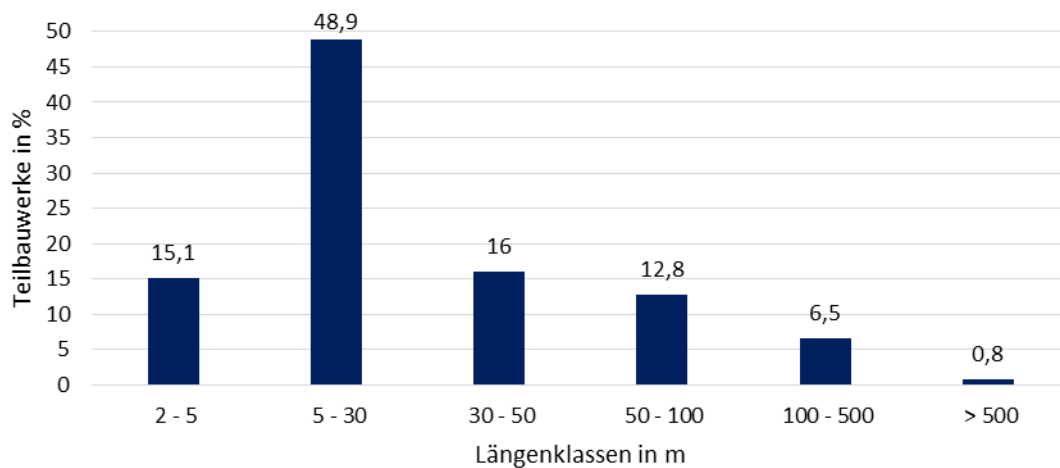


Abbildung 70: Darstellung der Unterteilung in Längensklassen der Brücken im Netz der Bundesfernstraßen (BASt, 01.03.2018)

Die Gesamtheit der Brücken im Netz der Bundesfernstraßen wird je nach Länge des Bauwerks in Längensklassen unterteilt. Mit einem Anteil von 48,9 Prozent ist die Längensklasse der Brücken, mit einer Länge von 5 bis 30 Metern, die mit Abstand größte (Abbildung 70).

Appendix I

1. Balkenbrücken
2. Stabbogenbrücken
3. Bogenbrücken
4. Schrägseilbrücken
5. Rahmenbrücke
6. Zweifeldrige Rahmenbrücke
7. Plattenbalkenbrücke mit ab Werk vorgespannten Einzelstegen
8. Talbrücken
9. Zweifeldträgerbrücken
10. Stahlverbundbrücke

Die folgenden, vereinfachten Betrachtungen sind bei der Entwicklung von Lebenszyklusmanagement-Konzepten zu berücksichtigen. Sowohl die an den Brücken regelmäßig durchgeführten Zustandsanalysen als auch weiterführende Bauwerksuntersuchungen im Bereich Straße zeigen, dass die Bauwerke als kritische Teile der Verkehrsinfrastruktur zu betrachten sind. Die genauere Analyse der verschiedenen Bau- und Konstruktionsformen ist unter anderem bei der Bewertung der Folgen bei veränderten Nutzungsbedingungen relevant. Des Weiteren ist die Identifikation kritischer Bauteile wichtig, diese können aber bei den unterschiedlichen Konstruktionsformen variieren.

1.2 Verkehrsbauwerke an den Bundeswasserstraßen - (Bundesanstalt für Wasserbauwerke - BAW)³⁵

Die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) ist dafür zuständig einen reibungslos fließenden und damit wirtschaftlichen Schiffsverkehr zu ermöglichen, hierzu werden die Bundeswasserstraßen und die dazugehörigen Anlagen (Schleusen, Wehre, Schiffshebewerke, Brücken etc.) betrieben und unterhalten und gegebenenfalls bedarfsgerecht ausgebaut.

Hinsichtlich der Infrastruktur obliegen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes im Wesentlichen folgende Hoheitsaufgaben:

- **Unterhaltung der Bundeswasserstraßen und der bundeseigenen Schifffahrtsanlagen** (Erhaltung eines ordnungsgemäßen Zustandes für den normalen Wasserabfluss und die Erhaltung der Schiffbarkeit) **sowie ihr Betrieb**
- **Ausbau (wesentliche Umgestaltung) und Neubau von Bundeswasserstraßen** einschließlich der behördlichen Genehmigungsverfahren (Planfeststellung / Plangenehmigung)
- **strompolizeiliche Aufgaben** (Maßnahmen zur Gefahrenabwehr, um die Wasserstraße in einem für die Schifffahrt erforderlichen Zustand zu erhalten, Genehmigung von Benutzungen sowie von Anlagen und Einrichtungen Dritter in, an, über oder unter einer Wasserstraße)
- Setzen und Betreiben von **Schifffahrtszeichen**
- **Wasserstandsmeldedienst und Eisbekämpfung**

Zu den Bundeswasserstraßen zählen rund 7.300 km Binnenwasserstraßen und 23.000 km² Seewasserstraßen. 4.500 km dieser Wasserstraßen haben für den Schiffsverkehr eine große Bedeutung (Hauptwasserstraßen). Weitere 2.800 km Bundeswasserstraßen im Binnenbereich (Nebenwasserstraßen) haben nur eine geringe oder keine Bedeutung für den Gütertransport. Die wichtigsten Wasserbauwerke sind:

- Deiche
- Pumpwerke

³⁵ Quelle: WADABA

Appendix I

- Schiffshebewerke
- Schleusen
- Sperrwerke
- Wehranlagen
- Brücken

Die folgende Tabelle aus „https://www.wsv.de/wasserstrassen/bauwerke_und_anlagen/index.html“ gibt einen Zahlenmäßigen Überblick über die verschiedenen Bauwerke im Verantwortungsbereich der BAW:

Bauwerke und Anlagen	Anzahl
Schiffsschleusenanlagen	326
Schleusenammern (Kammerlänge > 18m)	416
Schiffsschleusenanlagen mit 3 Kammern (Kammerlänge >18m)	2
Schiffsschleusenanlagen mit 2 Kammern (Kammerlänge >18m)	80
Wehranlagen	337
Sperrwerke	11
Brücken über Bundeswasserstraßen in Unterhaltslast der WSV	1354
Kanalbrücken	10

Tabelle 10: Bauwerke und Anlagen an Bundeswasserstraßen³⁶

Zwar spielen Schleusenanlagen für den Schiffs- und Güterverkehr eine entscheidende Rolle, aber auf Grund der im Verhältnis zu den anderen Bauwerken relative hohen Zahl an Brücken soll der Fokus bei der Betrachtung und Entwicklung des indikatorgestützten LzM-Systems auch bei den Wasserwegen auf Brückenbauwerken über Bundeswasserstraßen liegen, für die die WSV die Unterhaltslast trägt. Des Weiteren wird so für alle drei Verantwortlichkeitsbereiche, Straße, Schiene und Wasserwege derselbe Bauwerkstyp betrachtet, so dass die objekt- und nutzungsspezifischen Aspekte im vollen Umfang und deren Einfluss auf das Langzeitverhalten der Bauwerke.

Da aber wie oben bereits erwähnt Schleusenanlagen für die Funktionsfähigkeit von Wasserstraßen ausschlaggebend sind, aber auch eine große Bedeutung für die Wasserver- und -entsorgung der Industrie und Landwirtschaft sowie der Trinkwassergewinnung, Hochwassermanagement, sowie die Freizeit- und Erholungsnutzung und auch die Funktion als natürlicher Lebensraum, sollen für den Bereich Wasserstraßen auch Schleusenanlagen in Bezug auf das LzM betrachtet werden.

I.3 Schiene - (Eisenbahn-Bundesamt EBA)

Die Betriebsanlagen und das Streckennetz der Deutsche Bahn bestehen aus einer Vielzahl von verschiedenen Infrastrukturbauwerken:

³⁶ https://www.wsv.de/wasserstrassen/bauwerke_und_anlagen/index.html

Appendix I

- Bahnanlagen der Bahnhöfe
 - Ablaufberg
 - Bahnsteig mit Zu- und Abgängen
 - Empfangsgebäude
 - Ladestraße
 - Stellwerk
 - Güterverladeeinrichtungen (Kran, Gleiswaage)
- Bahnanlagen der freien Strecke Abzweigstelle
 - Anschlussstellen
 - Bahndamm
 - Bahnseitenweg
 - Bahnübergang (einschließlich Schranke oder Lichtanlage)
 - Blockstelle
 - Brücke
 - Deckungsstelle
 - Gleis
 - Haltepunkt
 - Haltestelle
 - Weiche
 - Signal
 - Oberleitung
 - Überleitstelle
- Sonstige Bahnanlagen Ausbesserungswerk (Aw)
 - Bahnkraftwerk
 - Bahnstromleitung
 - Betriebszentrale
 - Drehscheibe
 - Fernmeldeanlage
 - Gleiskreuzungen
 - Gleissperre
 - Bahnbetriebswerk (Bw)
 - Überführung
 - Unterwerk

Betrachtet man allein das Gleisnetz der DB, so hat es eine Betriebslänge von 33.241 km bestehend aus 60.512 km Gesamtgleislänge, darunter 66.454 Weichen und Kreuzungen, 25.718 Brücken, 708 Tunnel, 1.229 Stützbauwerke, 13.862 Bahnübergänge, 2.776 Stellwerke, 5.633 Verkehrsstationen, 9.891 Bahnsteige, 2.235 Personenunter-/überführungen und 7.912 km Bahnstromleitungen (DB AG, 2018).

	2017	2015
Gesamtlänge Gleise	60.512 km	60.527 km
Streckenlänge	33.241 km	33.194 km
Brücken	25.718 Stk.	25.776 Stk.
Brücken je km	0,77 Br./km	0,78 Br./km

Tabelle 11: Gleislängen und Brückenanzahl (Stand 2017)

Appendix I

Analog zu den Ausführungen im Abschnitt 2.4.3 werden im Weiteren exemplarisch die Brückenbauwerke für die Konzeptentwicklung herangezogen, zumal diese als besonders kritische Teile der Verkehrsinfrastruktur der Bahn eingestuft werden.

Die zu betrachtenden Brücken können nach Bauform aufgeteilt werden.

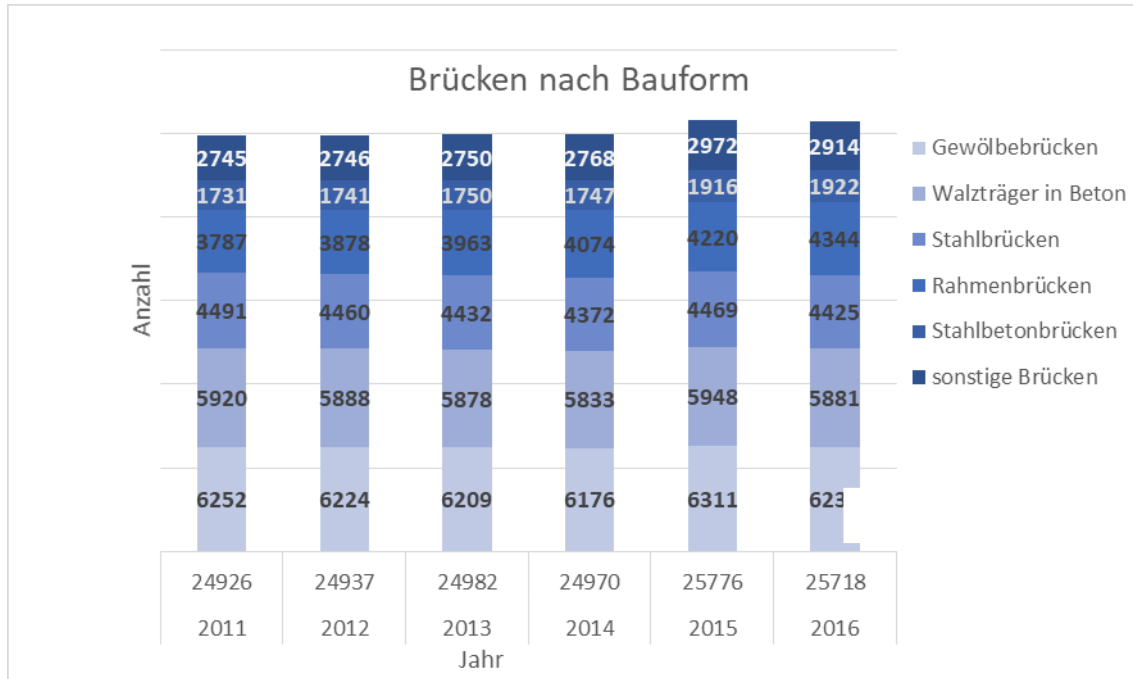


Abbildung 71: Brücken im Bestand nach Bauform

Somit ergibt sich die folgende Verteilung der Eisenbahnbrücken im Bestand nach Bauweise:

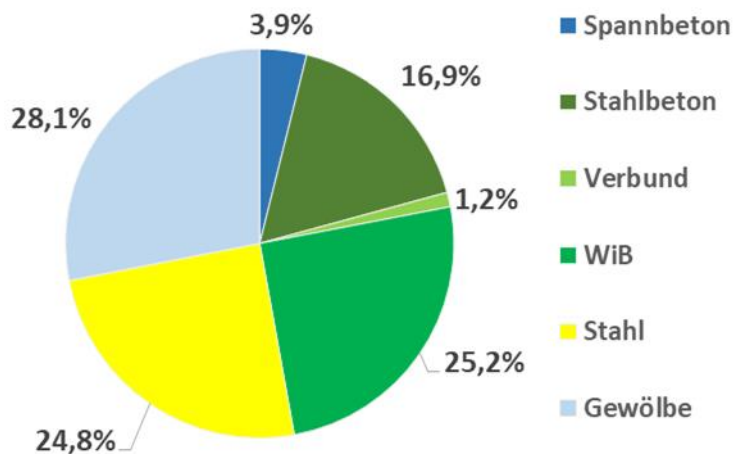


Abbildung 72: Eisenbahnbrücken im Bestand nach Bauweise

Auch im Bereich der Eisenbahnbrücken spielt der Werkstoff Beton eine besondere Rolle, da allein ca. die Hälfte der Brücken im Bestand aus Beton, Stahlbeton und anderen Betonverbänden bestehen. Betrachtet man darüber hinaus die geplanten bzw. die bereits im Bau befindlichen Brücken zeigt sich, dass Beton, insbesondere Stahlbeton, als Baustoff im Bereich Eisenbahn immer mehr an Bedeutung gewinnt. In der nachfolgenden Abbildung 73 ist die Verteilung nach Bauform und Material für Bahnbrücken, welche sich im Bau befinden oder geplant sind, dargestellt:

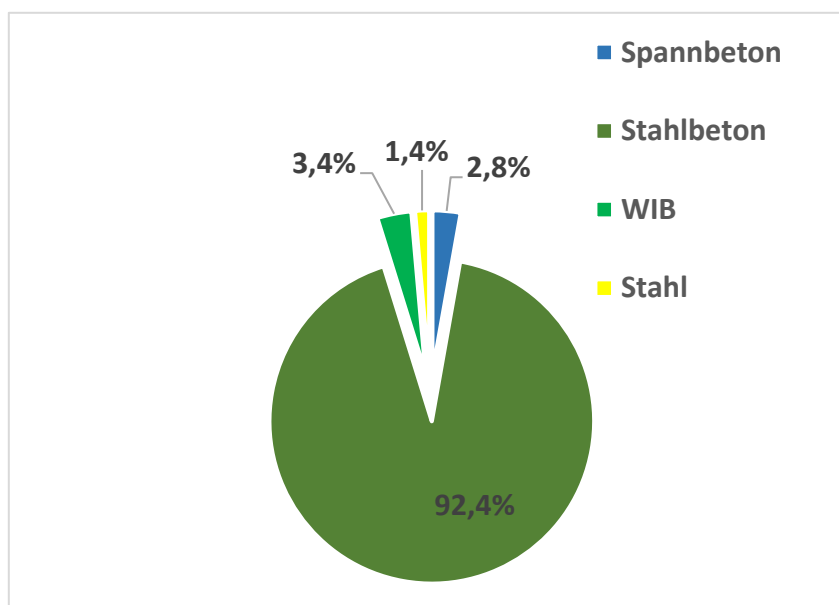


Abbildung 73: Aktuelle Bauweise von geplanten und im baubefindlichen Bahnbrücken

Der Fokus auf die Betrachtung von Beton bzw. Stahlbeton als Werkstoff für Brücken lässt sich hiermit begründen, insbesondere in Hinblick auf die Verwendung von Präventionsmaßnahmen und Monitoring-Systemen, für die Verbesserung der Dauerhaftigkeit und der Verlängerung des Lebenszyklus bei neuen Infrastrukturbauwerken.

Appendix J Zusammenfassung und Auswertung des Experten Workshops 11.01.2019 in Baden-Baden

Für die Entwicklung eines funktionierenden und akzeptierten LzM-System ist es notwendig, alle Einheiten und Organisationen, von der regulierenden Ebene bis hin zur Ebene der Ausführenden, zu hören und damit auch die Akzeptanz eines neuen Systems direkt bei allen zu erreichen.

Ziel des Workshops war die Evaluierung des erarbeiteten Ansatzes zur „Entwicklung eines indikatorgestützten, verkehrsträgerübergreifenden Lebenszyklus-Management-Systems für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur“ zur Erreichung des definierten Zielzustands der einzelnen Verkehrsträger, nämlich die Aufrechterhaltung des Verkehrs, also die Funktionsfähigkeit und die Verfügbarkeit der Verkehrsinfrastruktur.

Zum Workshop waren Vertreter der operativen Ebene der drei Verwaltungsbereiche Straße (Autobahndirektion Süd-Bayern), Schiene (DB-Netze) und Wasserstraße (Wasserschiffahrtsamt Stuttgart), sowie die Vertreter der drei Bundesämter, BAST, EBA und BAW eingeladen, um die Umsetzbarkeit des erarbeiteten Konzepts zu diskutieren und insbesondere die Anforderungen und „Bedürfnisse“ der operativen Ebene an das LzM-System zu hören und miteinzubeziehen. Des Weiteren sollten aber auch möglichen Schwierigkeiten und Probleme bei der Umsetzung des Konzepts in die Praxis, wie bspw. die Schaffung der Akzeptanz bei den Anwendern etc. aus anderen Blickwinkeln betrachtet und erörtert werden.

Gleichzeitig sollte der Workshop Gelegenheit zur offenen Diskussion zwischen den Aufsichtsbehörden und den operativen Organisationen der verschiedenen Verkehrsträger bieten und damit zu einer Verbesserung der Kommunikation zwischen administrativer und operativer Ebene führen.

Vertreten wurden die einzelnen operativen Bereiche durch:

- die Autobahndirektion Süd-Bayern in Person von Prof. Uwe Willberg (Straße)
- die DB-Netze AG in Person von Herrn Thomas Gamber (Schiene)
- das Wasserschiffahrtsamts Stuttgart in Person von Herrn Walter Braun (Wasserstraße)

Die Bundesämter und -anstalten wurden vertreten durch

- BAST - Bundesanstalt für Straßenwesen, Herr Ralf Holst (Straße)
- BAW - Bundesanstalt für Wasserbau, Frau Heike Schmidt-Bäumler und Herr Andreas Panenka (Wasserstraße)
- EBA - Eisenbahnbundesamt, Herr Markus Reinhard (Schiene)

Des Weiteren sollten die Expertenmeinungen und Einschätzungen zur Vorgehensweise bei der Entwicklung des Konzepts eines „indikatorgestützten, verkehrsträgerübergreifenden LzM-Systems für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur“ und zum gewählten Ansatz gesammelt und gehört werden.

Wichtig waren hierbei auch die Identifizierung von möglichen Problemen bei der geplanten Umsetzung des ebenen-übergreifenden SWOT-Pareto-Ansatzes und weitere Impulse aus der Praxis zu sammeln.

Appendix J

Zu Beginn wurde das Projekt und der angestrebte SWOT-Pareto-Ansatz kurz vorgestellt. Es wurde vorab ein umfangreicher Fragenkatalog erstellt, welcher als Leitfaden für den Workshop und die Diskussion dienen sollte.

Als größte Herausforderungen für LzM-Systeme im Bereich Verkehrsinfrastruktur werden die folgenden Punkte gesehen:

- Hauptziel ist die Aufrechterhaltung des Verkehrs, übergeordnetes Ziel der Systems
- Möglichst wenige Störungen, optimale Nutzung der finanziellen Mittel, möglichst geringe Beeinflussung der Umwelt (ökologisch und sozial)
- Einfache Anwendung, System soll stabil und wenig fehleranfällig sein
- Anerkennung, Akzeptanz und Förderung des Konzepts/Systems durch die Politik
- Akzeptanz bei den Anwendern, operative Ebene, Betreiber und Prüfbüros
- Recycling und Entsorgung von Baustoffen
- Gewährleistung langfristiger Planungssicherheit in den Bereichen Finanzen, Planungs- und Baukapazitäten, durch transparente Projektplanung kann Vertrauen, auch auf Seiten der Bürger, hergestellt werden

Diese Herausforderungen sind nicht verkehrsträgerabhängig.

Das Ziel soll ein Tool zur Entscheidungshilfe in Bezug auf konkrete Maßnahmen auf Objektebene und zur Entscheidungshilfe und Priorisierung auf Netzebene sein. Es wird sich nicht um ein Entscheidungstool handeln, welches die Anwender bevormundet bzw. komplett aus der Verantwortung nimmt.

Im Allgemeinen Teil des Fragenkatalogs ging es um die Erwartungen der Vertreter an das LzM-System.

- Oberstes Ziel ist die höchstmögliche Verfügbarkeit der Verkehrsinfrastruktur
- Insbesondere durch Verbesserung der zeitlichen Planung bzw. Planbarkeit von Instandsetzungsmaßnahmen
- Weg von festen Intervallen zur Zustandsüberwachung,
- Optimierung der Eingriffe (Reduzierung der Dauer, oder auch Zusammenfassung verschiedener Maßnahmen auf einem Korridor)
- Kostenrechnung für Maßnahmen auf den Lebenszyklus bezogen, Berücksichtigung der Lebensdauer nicht nur auf Baukosten), kosteneffiziente Materialien
- Verlängerung der Instandsetzungsintervalle durch Präventionsmaßnahmen
- Informationsrücklauf der Betreiber an die Verwaltungen

Gleichzeitig wurden bestehende Probleme der Verwaltung und der etablierten Prozesse, beispielsweise bei der Beantragung und Genehmigung von Maßnahmen und/oder Gutachten formuliert. Aber auch, dass es mit den neuen Wegen, die mit diesem Konzept beschritten werden, auch unweigerlich zu einer

Anpassung der Normen und Richtlinien sowie der Ausschreibungsformalien (funktionale Ausschreibung) kommen muss.

Zur Frage, welche Art von System entwickelt werden soll, wurde der Vorschlag gemacht das Konzept in einer Deutschlandkarte des Infrastrukturnetzes mit Point-and-Click Informationen auszustatten. Diese Informationen könnten sein: wann, warum und welche Maßnahmen an einem Objekt erfolgen sollen, sowie die geplante Dauer und kalkulierte Kosten.

Für die Konzeptentwicklung muss dies in einem überschaubaren Rahmen geschehen und Sonderfälle müssen vermieden werden.

Ein weiterer Wichtiger Aspekt ist die Kommunikation, auch hierzu wurden Fragen formuliert und angesprochen. Die Kommunikation spielt für die Effizienz und die Funktionsfähigkeit des LzM-Systems eine essenzielle Rolle: Hier stellt sich die Frage, wie die verschiedenen Verkehrsträger (intern und extern) kommunizieren und unter welchen Umständen. Dabei wurde klar formuliert, dass die Kommunikation sich als schwierig darstellt, da sie vorwiegend auf akute Probleme und einzelne Objekte beschränkt ist. Alle Beteiligten sind am Ausbau eines regen und regelmäßigen Austausch und der vernetzten Zusammenarbeit, nicht nur von operativer zu administrativer Ebene der einzelnen Verkehrsträger, sondern auch verkehrsträgerübergreifend, beispielsweise durch weiterführende verkehrsträgerübergreifende Workshops, informelle Treffen oder Diskussionsrunden, interessiert. Die Einrichtung von regelmäßigen Experten-Workshops wird von allen Beteiligten sehr begrüßt. Dabei sollen die Workshops sowohl ebenen-übergreifend als auch für einzelne Ebenen getrennt konzeptioniert werden, um einerseits alle Blickwinkel auf eine Fragestellung zu berücksichtigen bzw. um die ebenen-spezifischen Probleme zu diskutieren (z.B. technische Ebene).

Die Einbindung der Politik wird als notwendig erachtet, da sie oberster Entscheidungsträger ist. Die Kommunikation muss auf den verschiedenen politischen Ebenen bis hin zur Partizipation der Bürger (Verbraucher) im Rahmen der Informationspolitik ausgebaut werden.

Für die konkrete Ausarbeitung des Konzepts zur Entwicklung eines LzM sind unterschiedliche Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Dabei spielen neben den objektspezifischen Größen auch Nachhaltigkeitsindikatoren eine Rolle:

Im Fragenkatalog wurden Fragen zur Verfügbarkeit von Berichten und Daten bezüglich der Belastung der Umwelt durch die Verkehrsinfrastruktur gestellt: Es gibt Berichte, welche auch von den verschiedenen Stellen zur Verfügung gestellt werden können.

In Bezug auf den Rückbau und die damit zusammenhängende Wiederverwertung/Up-Cycling von Baustoffen wurde von allen Beteiligten klar formuliert, dass die Mantel-Verordnung, in der die Regelungen zur Wiederverwertung von Baustoffen geregelt ist, Recycling nahezu unmöglich macht.

Die undurchsichtigen Regelungen erlauben nur die Wiedereinbringung der Baustoffe direkt auf der Baustelle, verlässt der Baustoff die Baustelle, so gilt er als Sondermüll und muss auf Deponien gelagert werden. Der sogenannte Cradle-to-Cradle-Ansatz funktioniert also allein direkt auf der Baustelle. Handlungsbedarf seitens der Politik wäre hier die Recycling-Verordnung für Baustoffe zu überarbeiten, so dass die durch den Abriss gewonnenen Stoffe zielgerichtet und sinnvoll wieder in die Infrastruktur eingebaut werden können.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Qualitätssicherung, Qualitätskontrolle und die Zustandsanalyse von Infrastrukturbauwerken. Aus unserer Sicht spielen die Qualitätssicherung, Zustandsanalyse und Zustandsentwicklung der einzelnen Objekte eine zentrale Rolle bei der Aufrechterhaltung des Verkehrs, und somit der Funktionsfähigkeit und Zuverlässigkeit der Verkehrsinfrastruktur. Daher müssen diese Aspekte auch in LzM-Systemen berücksichtigt werden. Im Fragenkatalog werden diese Punkte unter Kategorie 5: "Zustandsanalyse, Qualitätssicherung und Zustandsentwicklung" bearbeitet. Wir sind der Meinung, dass die aktuellen Richtlinien zur Zustandsanalyse und Bauwerksüberwachung weder ausreichend noch zielführend sind. Soweit wir die Datenerfassung überblicken können, lassen sich aus den aktuell erhobenen Daten keine Aussagen über die Bauwerks- bzw. Schadensentwicklung ablesen. Auf Grund der Tatsache, dass 80 - 90 % der Schäden an Bauwerken chemisch induziert sind und nicht durch mechanische Überbeanspruchung ausgelöst werden, lassen sich die wichtigsten Bauwerksindikatoren direkt aus den chemischen Schädigungsmechanismen ableiten.

Zu klären ist die Frage von Seiten der Bundes- und Landesanstalten, ob aus ihrer Sicht Änderungen bei den Bauwerksprüfungen und -überwachung notwendig ist.

Aus unserer Sicht sollten Maßnahmen zur Prävention von Bauwerksschäden oder auch Qualitätssicherung während der Bauphase bzw. der Bauwerksabnahme schon in der Planung berücksichtigt werden, um den Lebenszykluskostenansatz in einer Ausschreibung vollständig zu berücksichtigen. Nach aktuellem Kenntnisstand werden zurzeit die Lebenszykluskosten von Bauwerken noch nicht bei der Planung- und Bauphase berücksichtigt.

Für die Anwendung des Pareto-Prinzips zur Priorisierung von Maßnahmen innerhalb der Netzstrategie ist die Identifikation der Bauwerke bzw. der Bauteile, welche während ihrer Lebensdauer die größten Kosten verursachen oder durch besonders hohen Verschleiß bzw. durch ihre für die Bauteil-/Bauwerksfunktionalität kritische Bedeutung gekennzeichnet sind, von zentraler Bedeutung. Hierbei wurden für die Straße folgende Bauteile identifiziert: Fahrbahnabdichtungen und -fugen, Fahrbahnübergänge und Beläge.

Im Bereich Wasserstraße bzw. Schiene wurden vor allem elektronische, computergesteuerte Steuerelemente als Kostenfaktor identifiziert (extreme und direkte Auswirkungen auf die Bauwerks-/Bauteilfunktionalität bei Stromausfall). Des Weiteren gehören im Bereich Schiene Weichen in diese Kategorie, da sie ein essenzieller Bestandteil der Infrastruktur mit hohem Ausfallpotential sind. In allen Bereichen spielt der langfristig versagende Korrosionsschutz eine Rolle. Dieser kann aber mittels angepasster Zustandsanalyse und Prognosemodelle flächendeckend kontrolliert und überwacht werden.

Die Ergebnisse des Workshops können wie folgt zusammengefasst werden:

Der Ebenen übergreifende Ansatz zur Anwendung einer Kombination aus SWOT- und Pareto-Analyse wird als zielführend angesehen. Die Konzeptentwicklung wird in dieser Richtung weiterverfolgt. Das zu entwickelnde Konzept soll transparent und von Netz- über Korridor zur Objektebene durchgängig sein. Mit den beiden durchgängigen Ansätzen SWOT- und Pareto wird eine Strategie verfolgt, die wegen der hohen Bekanntheit und der breiten Akzeptanz der beiden Ansätze, sowie deren Praktikabilität als durchgängiges Konzept äußerst vielversprechend ist.

Im Rahmen des Workshops wurden auch die Möglichkeiten verschiedener Pilotprojekte zur Verifizierung und Validierung des zu entwickelnden LzM-Systems besprochen.

Literatur

- Appelhans, T., Detsch, F., Reudenbach, C., Woellauer, S., 2018. mapview: Interactive Viewing of Spatial Data in R.
- Autobahndirektion Südbayern, 2015. Autobahndirektion Südbayern - Zuständigkeitsbereich.
- Bamforth, P.B., 1997. Corrosion of Reinforcement in Concrete Caused by Wetting and Drying Cycles in Chloride – Containing Environments.
- Bangert, F., 2004. Gekoppelte chemo-mechanische Modellierung und numerische Simulation langzeitiger Degradation von Betonstrukturen. Bochum.
- BAW, 2015. Merkblatt Schadensklassifizierung an Verkehrswasserbauwerken (MSV), BAW Merkblatt.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt, n.d. Abgrenzungen von Gebieten [WWW Document]. Bayerisches Landesamt für Umwelt. URL https://www.lfu.bayern.de/natur/natura2000_abgrenzungen/index.htm (accessed 5.29.19a).
- Bayerisches Landesamt für Umwelt, n.d. EG-Umgebungslärmrichtlinie - Kartierungsergebnisse [WWW Document]. Bayerisches Landesamt für Umwelt. URL https://www.lfu.bayern.de/laerm/eg_umgebungslaermrichtlinie/kartierung/index.htm (accessed 5.29.19b).
- Bivand, R., Keitt, T., Rowlingson, B., 2019. rgdal: Bindings for the “Geospatial” Data Abstraction Library.
- Bivand, R., Rundel, C., 2019. rgeos: Interface to Geometry Engine - Open Source ('GEOS').
- Bivand, R.S., Pebesma, E., Gomez-Rubio, V., 2013. Applied spatial data analysis with R, Second edition. Springer, NY.
- BMVBS, 2010. Bauwerksinspektion - VV-WSV 2101 (Verwaltungsvorschrift der Wasser- Schifffahrtsverwaltung des Bundes) [WWW Document]. URL https://izw.baw.de/publikationen/bautechnik-betrieb/0/vv-wsv-2101_2010_09.pdf (accessed 11.29.18).
- BMVI, 2017. RI-EBW-PRÜF -Richtlinien zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076, RI-ERH-ING - Richtlinien für Erhaltung von Ingenieurbauten.
- Brown, P.H., 2015. How real estate developers think: design, profits, and community, The city in the twenty-first century. University of Pennsylvania Press, Philadelphia.
- Bundesanstalt für Straßenwesen, 2018a. Manuelle Straßenverkehrszählung [WWW Document]. Bundesanstalt für Straßenwesen. URL https://www.bast.de/BAST_2017/DE/Statistik/Verkehrsdaten/2015/Manuelle-Zaehlung.html (accessed 5.29.19).
- Bundesanstalt für Straßenwesen, 2018b. Brücken an Bundesfernstraßen - Brückenstatistik 09/2018.
- Bundesanstalt für Straßenwesen (Ed.), 2018c. BAST 2017 - Statistik - Zustandsnoten der Brücken (Excel).
- Bundesanstalt für Straßenwesen, n.d. BAST 2017 - Datensammlungen [WWW Document]. Bundesanstalt für Straßenwesen. URL https://www.bast.de/BAST_2017/DE/Publikationen/Datensammlungen/Datensammlungen_node.html (accessed 5.29.19).
- Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (Ed.), 2014. Grundkonzeption für den Bundesverkehrswegeplan 2015: bedarfsgerecht, transparent, herausfordernd, Stand 2014. ed. Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur, Bonn.
- Chamberlain, S., Teucher, A., 2019. geojsonio: Convert Data from and to “GeoJSON” or “TopoJSON.”
- Chappex, T., Scrivener, K., 2012. Alkali fixation of C–S–H in blended cement pastes and its relation to alkali silica reaction. Cement and Concrete Research 42, 1049–1054. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.03.010>
- Cheng, J., Karambelkar, B., Xie, Y., 2018. leaflet: Create Interactive Web Maps with the JavaScript “Leaflet” Library.
- Clasen, A., 2017. Nachhaltiges Bauen: Energie sparen und Schallschutz erhöhen durch nachhaltiges Bauen. swp.de.

Literatur

- Costa, A., Appelton, J., 1999. Chloride Penetration Into Concrete in Marine Environment - Part I: Main Parameters Affecting Chloride Penetration. Part II: Prediction of Long Term Chloride Penetration. *Materials and Structures* 32 No. 218, pp. 252–259, No. 219, 354–359.
- DAfStb, 2013. DAfStb Alkali-Richtlinie:2013-10, Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton.
- Dahl, A., Kindl, A., Walther, C., Paufler-Mann, D., Roos, A., Waßmuth, V., Weinstock, F., Röhling, W., Mann, H.-U., 2016. *Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegeplan 2030*.
- DB AG, 2018. Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung: Infrastrukturzustands- und entwicklungsbericht.
- DB Netz AG, n.d. Auslastungswerte von Strecken für die Gewährung gesicherte Durchfahrten [WWW Document]. DB Netze. URL https://fahrweg.dbnetze.com/fahrweg-de/kunden/nutzungsbedingungen/technischer_netzzugang/gesicherte_durchfahrten-1369032 (accessed 5.29.19).
- Delagrave, A., Gerard, B., Marchand, J., 1997. Modelling the calcium leaching mechanisms in hydrated cement pastes - Mechanisms of chemical degradation of cement based systems,.
- Dent Glasser, L.S., Kataoka, N., 1981. The chemistry of 'alkali-aggregate' reaction. *Cement and Concrete Research* 11, 1–9. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(81\)90003-X](https://doi.org/10.1016/0008-8846(81)90003-X)
- DIN 1076, 1999. DIN 1076 - Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wege - Überwachung und Prüfung.
- Du, G., Karoumi, R., 2014. Life cycle assessment framework for railway bridges: literature survey and critical issues. *Structure and Infrastructure Engineering* 10, 277–294. <https://doi.org/10.1080/15732479.2012.749289>
- Fastrich, A., Girmscheid, G., 2010. Optimierungsmodell Deterministische, lebenszyklusorientierte, dynamische Optimierung der Straßenunterhaltsmaßnahmen, *Bauingenieur*.
- Frohne, K., 2016. Ein Haus ohne Haustechnik. *WESER-KURIER*.
- Gehlen, C., 2000. Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken- Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion.
- Gerard, B., Pijaudier-Cabot, G., Laborde, C., 1998. Coupled diffusion-damage modelling and the implications on failure due to strain localisation. *International Journal of Solids and Structures*.
- Girmscheid, G., 2007a. Entscheidungsmodell – Lebenszyklusorientierte Wirtschaftlichkeitsanalyse von Unterhaltsstrategien für Straßennetze. *Bauingenieur*.
- Girmscheid, G., 2007b. Entscheidungsmodell – Lebenszyklusorientierte Strategiebildung und Unterhaltsvarianten für Straßennetze. *Bauingenieur*.
- Henry, L., Wickham, H., 2019. *purrr: Functional Programming Tools*.
- Herold, G., 1999. *Korrosion zementgebundener Werkstoffe in mineralsauren Wässern*. TU Karlsruhe, Karlsruhe.
- Hijmans, R.J., 2019. *raster: Geographic Data Analysis and Modeling*.
- Ittershagen, M., 2011. *Presseinformation Nr. 53/201 2*.
- Jacobs, S., 2013. Hightech hinter Holzfassaden. *Der Tagesspiegel*.
- Kulik, D.A., Wagner, T., Dmytrieva, S.V., Kosakowski, G., Hingerl, F.F., Chudnenko, K.V., Berner, U., 2013. GEM-Selektor geochemisches Modellierungspaket: überarbeiteter Algorithmus und GEMS3K numerischer Kernel für gekoppelte Simulationscodes, *Computational Geoscience*.
- Kurtis, K., Monteiro, P., Madanat, S., 2000. Empirical Models to Predict Concrete Expansion Caused by Sulfate Attack. *ACI Materials Journal* S. 156-161.
- Lagerblad, B., 2005. Carbon dioxide uptake during concrete life cycle – State of the Art. Nordic Innovation Centre project number 03018. Swedish Cement and Concrete Research Institute.
- Liaudat, J., López, C.M., Carol, I., 2015. NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF ASR IN CONCRETE AT THE MESO-LEVEL. Presented at the 9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures.

Literatur

- Lindvall, A., 1998. Duracrete-probabilistic performance based durability design of concrete structures. Presented at the 2nd. Int. PhD Symposium in Civil Engineering 1998 Budapest.
- Locher, F.W., 2000. Zement, Grundlagen der Herstellung und Verwendung. Verlag Bau+Technik.
- Malvar, L.J., Cline, G.D., Burke, D.F., Rollings, R., Greene, J., Sherman, T.W., 2001. Alkali-Silica Reaction Mitigation: State-of-the-Art (No. NFESC-TR-2195-SHR). NAVAL FACILITIES ENGINEERING COMMAND PORT HUENEME CA ENGINEERING SERVICE CENTER.
- Manzo, S., Salling, K.B., 2016. Integrating Life-cycle Assessment into Transport Cost-benefit Analysis. *Transportation Research Procedia* 14, 273–282. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.064>
- Michael Binzen, 2015. Strecken und Bauwerke nach INSPIRE [WWW Document]. Deutsche Bahn Datenportal. URL <https://data.deutschebahn.com/dataset/data-streckennetz> (accessed 5.29.19).
- Mielecke, T., Kistner, V., Graubner, C.A., Knauf, A., Fischer, O., Schmidt-Thrö, G., 2016. Entwicklung einheitlicher Bewertungskriterien fuer Infrastrukturbauwerke in Hinblick auf Nachhaltigkeit. Berichte der Bundesanstalt fuer Strassenwesen. Unterreihe Bruecken-und Ingenieurbau.
- Müllauer, W., 2013. MECHANISMEN DES SULFATANGRIFFS AUF BETON – PHASENNEUBILDUNGEN UND EXPANSIONSDRÜCKE IN MÖRTELN UNTER Na₂SO₄ BELASTUNG. TUM.
- Müller, K., Wickham, H., 2019. tibble: Simple Data Frames.
- Nüst, D., Stasch, C., Pebesma, E.J., 2011. Connecting R to the Sensor Web, in: Geertman, S., Reinhardt, W., Toppen, F. (Eds.), *Advancing Geoinformation Science for a Changing World*, Proceedings of AGILE. Springer Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, pp. 227–246. https://doi.org/10.1007/978-3-642-19789-5_12
- Nygaard, P., Leemann, A., 2012. Kohlendioxidaufnahme von Stahlbetonbauten durch Karbonatisierung, cemsuisse.
- Pauly, M., Nagel, L.-M., 2016. Brücken-Spezial – der Werkstattbericht. *investigativ.de*. URL <https://investigativ.welt.de/2016/07/13/bruecken-spezial-der-werkstattbericht/> (accessed 5.29.19).
- Pebesma, E., 2019. lwgeom: Bindings to Selected “liblwgeom” Functions for Simple Features.
- Pebesma, E., 2018. Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data. *The R Journal* 10, 439–446. <https://doi.org/10.32614/RJ-2018-009>
- Pebesma, E.J., Bivand, R.S., 2005. Classes and methods for spatial data in R. *R News* 5, 9–13.
- Pelzeter, A., 2017. *Lebenszyklus-Management von Immobilien: Ressourcen- und Umweltschonung in Gebäudekonzeption und -betrieb*, 1. Auflage. ed, Beuth Praxis. Beuth Verlag GmbH, Berlin Wien Zürich.
- Prezzi, Monica, P.J.M.M., and Garrison Sposito, 1997. Alkali-Silica Reaction, Part I: Use of the Double-Layer Theory to Explain the Behavior of Reaction-Product Gels. *Materials Journal* 94. <https://doi.org/10.14359/280>
- R Core Team, 2017. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Schiessl, P., 1976. Zur Frage der zulässigen Rissbreite und Korrosionsabtragung and der Bewehrung.
- Schröder, J., 1989. Zustandsbewertung grosser Gebäudebestände. *Schweizer Ingenieur und Architekt* 17.
- Stark, J., Wicht, B., 2013. *Dauerhaftigkeit von beton*. Springer, Berlin Heidelberg.
- Swamy, R.N., Hamada, H., Laiw, J.C., 1994. A Critical Evaluation of Chloride Penetration Into Concrete in Marine Environment.
- Tang, L., 1997. Chloride Penetration Profiles and Diffusivity in Concrete under Different Exposure Conditions.
- Thomas, M.D.A., Matthews, J.D., Haynes, C.A., 2000. Carbonation of Fly Ash Concrete. Presented at the Fifth CANMET/ACI International conference on durability of concrete, Barcelona, Spain.
- Tuutti, K., 1982. *Corrosion of Steel in Concrete*.
- Vaidyanathan, R., Xie, Y., Allaire, J.J., Cheng, J., Russell, K., 2018. *htmlwidgets: HTML Widgets for R*.
- VDZ, 2000. *Zement- Taschenbuch*. Verlag Bau+Technik.

Literatur

- Wagner, T., Kulik, D.A., Hingerl, F.F., Dmytrieva, S.V., 2012. GEM-Selektor geochemisches Modellierungspaket: TSolMod-Bibliothek und Datenschnittstelle für Mehrkomponenten-Phasenmodelle. Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, n.d. GDWS - Geodatendienste [WWW Document]. URL <https://www.gdws.wsv.bund.de/webcode/1232540> (accessed 5.29.19).
- Wickham, H., 2017. tidyverse: Easily Install and Load the “Tidyverse.”
- Wickham, H., François, R., Henry, L., Müller, K., 2019. dplyr: A Grammar of Data Manipulation.
- Wierig, H.J., 1984. Longtime studies on the carbonation of concrete under normal outdoor exposure.
- Xie, Y., 2018. knitr: A General-Purpose Package for Dynamic Report Generation in R.
- Xie, Y., 2015. Dynamic Documents with R and knitr, 2nd ed. Chapman and Hall/CRC, Boca Raton, Florida.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wichtige Einflussgrößen auf den Frostangriff mit und ohne Tausalze (nach Stark und Wicht 2013).....	24
Tabelle 2: Expositionsclassen und potenzielle Schadensmechanismen, gemäß DIN 1045 - 2, Tabelle 1 (Stand 2016-11)	29
Tabelle 3: Von der Betreuergruppe bereitgestellte Datenquellen.....	88
Tabelle 4: Weitere zur Auswertung hinzugezogene Datenquellen	89
Tabelle 3: Verwendetes Polygon zur Begrenzung des Betrachtungsbereichs (WGS 84)	90
Tabelle 6: Überblick über die mit BISStra assoziierten Daten	90
Tabelle 7: Verwendete Farbcodierung für Zustandsnoten.....	91
Tabelle 8: Auszug der zehn Sektorsequenzen mit der schlechtesten mittleren Zustandsnote für die eine durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke vorliegt.....	93
Tabelle 9: Kernthesen der SWOT-Analyse	97
Tabelle 10: Bauwerke und Anlagen an Bundeswasserstrassen.....	105
Tabelle 11: Gleislängen und Brückenanzahl (Stand 2017)	106

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Produktkategorien des Schienentransports und der Infrastruktur des Schienennetzes (B1943, IVL, 2010).....	11
Abbildung 2: Einordnung des LC-Erhaltungsoptimierungsmodells in die Systemlandschaft und die bereits entwickelten Strategieentwicklungs- und Entscheidungsmodelle.....	15
Abbildung 3: Auslaugung durch weiches Wasser (Vortrag Landesgütegemeinschaft für Bauwerks- und Betonerhaltung Rheinland-Pfalz / Saarland e.V. in Kaiserslautern am 6.3.2012)	24
Abbildung 4: Expositionsclassen an einer Stahlbetonbrücke.....	30
Abbildung 5: Schematische Darstellung zweier unterschiedlicher mathematischer Ansätze zur Beschreibung der Tiefe der Carbonatisierungsfront (Equ.1 Wurzel-t-Gesetz mit unterschiedlichen k-Werten, Equ.2 Formel von Schießl).....	32
Abbildung 6: Darstellung der Calciumauslaugung nach (Delagrave et al., 1997).....	42
Abbildung 7: Algorithmusabfolge von TRANSREAC.....	44
Abbildung 8: Systemübersicht zur Auslaugung von Stoffen aus horizontal und vertikal berechneten, Eigene Darstellung, Hochschule für Technik, Rapperswil.	45
Abbildung 9: Parameterbereiche, aus denen die Eingangsgrößen für COMLEAM stammen. Eigene Darstellung, Hochschule für Technik, Rapperswil	46
Abbildung 10: Vernetzung des STADIUM-Programm-Systems	48
Abbildung 11: Bewehrungssuchgerät FerroScan PS 200, Hilti.....	50
Abbildung 12: Schematische Darstellung des Pulsinduktionsverfahrens.....	51
Abbildung 13: Betonrückprallhammer SilverSchmidt, Proceq	52
Abbildung 14: : Korrelation Rückprallwert und Druckfestigkeit.....	52
Abbildung 15: : Messprinzip Echo-Laufzeit-Verfahren	53
Abbildung 16: Beispiel für ein Ultraschallmessgerät TICO, Proceq	53
Abbildung 17: Sender und Empfänger für die Ultraschallwellen	54
Abbildung 18: Prinzip des Impact-Echo-Verfahrens (Quelle: SVTI -Schweizerischer Verein für technische Inspektion).....	55

Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

Abbildung 19: Impact-Echo System MIRADOR mit umfangreichen Visualisierungsmöglichkeiten für universellen Feldeinsatz (Quelle: German Instruments)	55
Abbildung 20: (Links) Ausbildung eines Streufeldes an der Bruchstelle eines Spanndrahts, vergleichbar mit einem gebrochenen Stabmagneten; (Rechts) an der Betonoberfläche gemessene Flussdichtekomponente an einer Bruchstelle	56
Abbildung 21: Permeabilitätsmessgerät Permea-Torr, TFB	57
Abbildung 22: Einsatzmöglichkeiten von Radar zur zerstörungsfreien Prüfung an Bauwerken	58
Abbildung 23: Schematische Darstellung des Messprinzips der Potentialfeldmessung	60
Abbildung 24: Wertebereiche für Messung des Potentials bei unterschiedlichen Betonen	60
Abbildung 25: Potentialfeldmessung mit Potentialfeldmessgerät	61
Abbildung 26: Beispiel Haftzugprüfung	62
Abbildung 27: Haftzugmessgerät Easy M, BPS	62
Abbildung 28: Beispiel für eine mit Phenolphthalein behandelten Probe	63
Abbildung 29: Röntgen	64
Abbildung 30: Schematische Darstellung des Meßprinzips der Röntgendiffraktometrie	64
Abbildung 31: Schema der Beugungsgeometrie	64
Abbildung 32: Thermogravimetrie - TG Waage	65
Abbildung 33: Beispiel für eine Auswertung der Thermogravimetrie	66
Abbildung 34: Darstellung des quantitativen Carbonatisierungsfortschritts	66
Abbildung 35: Ionenchromatograph 761 Compact IC, Metrohm	67
Abbildung 36: Quecksilberdruck-Porosimeter (Porotec)	67
Abbildung 37: Exemplarische Porengrößenverteilung, Anteile der verschiedenen Poren an der Gesamtporosität	68
Abbildung 38: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus	69
Abbildung 39: Kurve von Typ A	69
Abbildung 40: Kurve vom Typ A, während der Versuchszeit tritt Wasser an der Oberfläche aus	69
Abbildung 41: Kurve vom Typ B	70
Abbildung 42: Wasseraufnahmekoeffizient und Einstufung	70
Abbildung 43: Ionenselektive Elektrode Orion 4-Star, Thermo Fisher Scientific	72
Abbildung 44: Meßprinzip Photometer Abbildung 45: Photometer Reflectoquant, Merck	73
Abbildung 46: Schematische Darstellung des Kontaktwinkels einer Flüssigkeit auf einer Festkörperoberfläche	73
Abbildung 47: Verschiedene Benetzbarkeiten von Oberflächen mit Wasser	74
Abbildung 48: Kontaktwinkelmessgeräte DSA 100 (Krüss)	74
Abbildung 49: Gesamtübersicht Bewehrungsüberdeckung	78
Abbildung 50: Tiefenprofil Chlorid Messung 2018	80
Abbildung 51: Tiefenprofil Chlorid Messung 2004	80
Abbildung 52: Darstellung der Chlorideindringtiefe und der Bewehrungsüberdeckung (Messreihen 2018)1	80
Abbildung 53: Darstellung der Chlorideindringtiefe und der Bewehrungsüberdeckung (Messreihen 2018)2	81
Abbildung 54: Darstellung der Chlorideindringtiefe und der Bewehrungsüberdeckung (Messreihen 2004)1	81

Abbildung 55: Darstellung der Chlorideindringtiefe und der Bewehrungsüberdeckung (Messreihen 2004)2	82
Abbildung 56: Tiefenprofil Carbonatisierung Messung 2018	84
Abbildung 57: Tiefenprofil Carbonatisierung Messung 2004	84
Abbildung 58: Darstellung der Verteilung der Carbonatisierungstiefe und der Bewehrungsüberdeckung (Messung 2018)1	84
Abbildung 59: Darstellung der Verteilung der Carbonatisierungstiefe und der Bewehrungsüberdeckung (Messung 2018)2	85
Abbildung 60: Darstellung der Verteilung der Carbonatisierungstiefe und der Bewehrungsüberdeckung (Messung 2004)1	85
Abbildung 61: Darstellung der Verteilung der Carbonatisierungstiefe und der Bewehrungsüberdeckung (Messung 2004)2	86
Abbildung 62: Objektweise Darstellung der Zustandsnote; links: automatische Clusterung bei größeren Kartenausschnitt; rechts: einzelner Marker mit PopUp für ein Objekt neben weiteren Clustern bei kleinerem Kartenausschnitt.....	92
Abbildung 63: Sektorsequenzweise Darstellung der Zustandsnoten von Brücken; links: Übersicht über einen größeren Kartenausschnitt; rechts: Pop-Up beim Anklicken einer Sektorsequenz	92
Abbildung 64: Widget-Ausschnitte zu den Themen Lärm (links) und Naturschutzgebiete (rechts)	94
Abbildung 65: Objektweise Darstellung der Zustandsnoten für Wehr- und Schiffsschleusenanlagen der WSV Neckar; links: Zusammenfassung in Clustern bei großem Kartenausschnitt, rechts: Einzelobjekte bei kleinerem Kartenausschnitt.....	95
Abbildung 66: Graphische Darstellung der SWOT-Analyse	96
Abbildung 67: Ursachenanalyse zu Schwierigkeiten bei der Umsetzung des Konzepts.....	98
Abbildung 68: Darstellung der Brückenflächen bezogen auf die angewandte Bauweise (BASt, 01.03.2018)	102
Abbildung 69: Darstellung der Zustandsnoten bezogen auf die Brückenflächen (BASt, 01.03.2018) ...	103
Abbildung 70: Darstellung der Unterteilung in Längenklassen der Brücken im Netz der Bundesfernstraßen (BASt, 01.03.2018)	103
Abbildung 71: Brücken im Bestand nach Bauform	107
Abbildung 72: Eisenbahnbrücken im Bestand nach Bauweise	107
Abbildung 73: Aktuelle Bauweise von geplanten und im baubefindlichen Bahnbrücken	108