



Maria Göpel, Matthias Rudolph, Ute Hornig

Dauerhaftigkeit von Stahlbetonkonstruktionen zur Lagerung von Gärsubstraten und Gärresten aus der Landwirtschaft

Zusammenführung und Validierung von
Ergebnissen aus den Forschungsvorhaben
P 52-3-19.75-1450/14 und P 52-5-19.75.1-2007/17 -
Geschäftszeichen P 52-5-19.75.2-2040/19

Maria Göpel, Matthias Rudolph, Ute Hornig

T 3391

**Dauerhaftigkeit von
Stahlbetonkonstruktionen zur Lagerung
von Gärsubstraten und Gärresten
aus der Landwirtschaft**

Zusammenführung und Validierung von Ergebnissen
aus den Forschungsvorhaben

P 52-3-19.75-1450/14 und P 52-5-19.75.1-2007/17 -
Geschäftszeichen P 52-5-19.75.2-2040/19

T 3391

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2021

ISBN 978-3-7388-0682-3

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de



Mfpa Leipzig GmbH

Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle für
Baustoffe, Bauprodukte und Bausysteme

Geschäftsbereich V - Tiefbau

Dr.-Ing. Ute Hornig

Arbeitsgruppe 5.1 - Bauwerksabdichtung

Abschlussbericht

Forschungsvorhaben Nr. FB 5.1/18-614-1

vom 15. Dezember 2020

1. Ausfertigung

Gegenstand

Dauerhaftigkeit von Stahlbetonkonstruktionen zur Lagerung von
Gärs substraten und Gärresten aus der Landwirtschaft -

Zusammenführung und Validierung von Ergebnissen aus den For-
schungsvorhaben P52-3-19.75-1450/14 und
P52-5-19.75.1-2007/17

Gesch.-zeichen P 52-5-19.75.2 – 2040/19

Auftraggeber

DIBt – Deutsches Institut für Bautechnik
Kolonnenstraße 30 B
10829 Berlin

Förderungszeitraum

01 / 2019 – 12 / 2020

Wiss. Bearbeiter:

Maria Göpel, M.sc
Dipl.-Ing. Matthias Rudolph
Dr.-Ing. Ute Hornig

Dieses Dokument besteht aus 82 Seiten und drei Anlagen.

Dieses Dokument darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Als rechtsverbindliche Form gilt die deutsche Schriftform mit Originalun-
terschriften und Originalstempel des/der Zeichnungsberechtigten. Es gelten die Allgemeinen Geschäftsbedingungen (AGB) der
Mfpa Leipzig GmbH.



Deutsche
Akkreditierungsstelle
D-PL-11021-01-00

Durch die DAKKS GmbH nach DIN EN ISO/IEC 17025
akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt
für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren (in
diesem Dokument mit * gekennzeichnet). Die Ur-
kunde kann unter www.mfpa-leipzig.de eingesehen
werden.

Nach Landesbauordnung (SAC 02) anerkannte und
nach Bauproduktenverordnung (NB 0800) notifizierte
PÜZ-Stelle.

Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bau-
wesen Leipzig mbH (Mfpa Leipzig GmbH)

Sitz: Hans-Weigel-Str. 2b – 04319 Leipzig/Germany
Geschäftsführer: Dr.-Ing. habil. Jörg Schmidt
Handelsregister: Amtsgericht Leipzig HRB 17719
USt-Id Nr.: DE 813200649
Tel.: +49 (0) 341 - 6582-105
Fax: +49 (0) 341 - 6582-199

Dauerhaftigkeit von Stahlbetonkonstruktionen zur Lagerung von Gärsubstraten und Gärresten aus der Landwirtschaft - Zusammenführung und Validierung von Ergebnissen aus den Forschungsvorhaben P 52-3-19.75-1450/14 und P 52-5-19.75.1-2007/17, Geschäftszeichen P 52-5-19.75.2 – 2040/19

Kurzfassung

Stahlbetonkonstruktionen im Kontakt mit Gärsubstraten und Gärresten landwirtschaftlicher Herkunft werden in der Regel auf Basis der DIN 11622-2:2015¹ bemessen und errichtet. Die Konstruktionen müssen so beschaffen sein, dass die gemäß AwSV² als allgemein wassergefährdend eingestuft Flüssigkeiten nicht austreten können. Das erfordert eine flüssigkeitsundurchlässige Konstruktion, die gegen die zu erwartenden mechanischen, thermischen und chemischen Einflüsse ausreichend widerstandsfähig sein muss.

Das Forschungsvorhaben fasst die in mehreren Forschungsvorhaben gewonnenen Erkenntnisse zum Durchflussverhalten von Trennrissen in Stahlbetonbehältern mit ausgewählten Flüssigkeiten (Gülle, Gärsubstrate, Gärreste, Silagesickersaft) zusammen und bewertet sie. Unabhängig von der sehr großen Varianz möglicher realer Flüssigkeiten und ihrer das Durchflussverhalten beeinflussenden Eigenschaften hat sich gezeigt, dass die an Lagerbehältern bei Umsetzung der Begrenzung der rechnerischen Rissbreite auf 0,2 mm auftretenden Trennrisse nicht zu einem dauerhaften Austreten von wassergefährdenden Flüssigkeiten führen. Das gilt unabhängig von der Flüssigkeitsdruckhöhe für alle mit Feststoff angereicherten Lagerflüssigkeiten. Temporäre oder permanente Durchfeuchtungen mit Aussinterungen sind allerdings nicht auszuschließen und betreffen in der Realität auch Trennrisse in vertikal orientierten Bauteilen (Wandbereiche). Die bei stichprobenartig begutachteten Behältern in landwirtschaftlichen Anlagen festgestellten Durchfeuchtungen und Sinterspuren traten auch bei optisch gemessenen Rissbreiten auf, die kleiner als 0,2 mm waren. Sie stellen im Sinne des Gewässerschutzes keine Gefährdung dar, haben allerdings Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit der Bauwerke.

Die Dauerhaftigkeit von landwirtschaftlich genutzten Stahlbetonkonstruktionen bestimmt sich im Wesentlichen über den Widerstand des Betons gegen die Einwirkung von Flüssigkeiten, die den Beton chemisch angreifen oder korrosionsfördernd auf den Bewehrungsstahl wirken. Neben der Zusammenstellung und Bewertung von Untersuchungsergebnissen aus früheren Forschungsvorhaben wurden Tastversuche durchgeführt, bei denen ausgewählte Referenzmedien über eine Dauer von 180 Tagen auf einen die Bewehrung kreuzenden Riss einwirkten. Einige der festgestellten Effekte bedürfen einer längerfristigen Betrachtung. Die Untersuchungen belegen, dass zum Abschluss der Beaufschlagung gerade das Ende der Einleitungsphase und die Depassivierung des Bewehrungsstahls erreicht waren. Die anschließend zu erwartenden Schäden konnten im Beobachtungszeitraum noch nicht nachgewiesen werden. Daraus ist jedoch nicht zu schließen, dass längerfristig keine Schäden auftreten.

Neben der Beanspruchung durch organische Säuren wird auch die Einwirkung von betonschädigenden Salzen, die in der Regel in landwirtschaftlichen Flüssigkeiten enthalten sind und ihr Einfluss auf die Dauerhaftigkeit der Stahlbetonkonstruktionen diskutiert.

¹ DIN 11622-2:2015-09; Gärfuttersilos, Güllebehälter, Behälter in Biogasanlagen, Fahrtilos – Teil 2: Gärfuttersilos, Güllebehälter und Behälter in Biogasanlagen aus Beton

² AwSV Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen vom 18. April 2017

Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung	4
2	Stahlbetonkonstruktionen in der Landwirtschaft	5
2.1	Aktuelle wasserrechtliche Rahmenbedingungen	5
2.2	Dauerhaftigkeit von landwirtschaftlichen Stahlbetonkonstruktionen	7
2.2.1	Allgemeines	7
2.2.2	Betonkorrosion durch chemischen Angriff	9
2.2.2.1	Allgemeines	9
2.2.2.2	Angriff durch organische Säuren	11
2.2.2.3	Angriff durch weitere wässrige Lösungen	13
2.2.3	Korrosion von Bewehrungsstahl	14
2.2.4	Einfluss der Rissgeometrie auf Dauerhaftigkeit und Durchlässigkeit	18
3	Abgeschlossene Forschungsvorhaben	24
3.1	Durchflussverhalten von Trennrissen	24
3.1.1	Versuchsmethodik	24
3.1.2	Ergebnisse	28
3.2	Beeinflussung der Dauerhaftigkeit durch Lagerflüssigkeiten	32
3.2.1	Versuchsmethodik	32
3.2.2	Ergebnisse experimenteller Untersuchungen	33
4	Datenerfassung an realen Lageranlagen	36
4.1	Zusammenstellung vorliegender Analysedaten	36
4.2	Feststellungen an Lagerbehältern aus Stahlbeton	41
5	Experimentelle Untersuchungen	43
5.1	Vorversuche	43
5.1.1	Zielstellung	43
5.1.2	Versuchskörper	43
5.1.3	Erzeugung Biegeriss und Einstellung Rissbreite	44
5.1.4	Potenzialfeldmessung	47
5.2	Versuchsplanung	53
5.2.1	Konzeption	53
5.2.2	Versuchskörper und -aufbau	54
5.2.3	Versuchsdurchführung	55
5.2.4	Prüfflüssigkeiten	56

5.2.5	Versuchsprogramm	59
6	Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen	61
6.1	pH Wert Entwicklung Prüfmedien	61
6.2	Betonkorrosion durch chemischen Angriff	62
6.3	Potentialfeldmessungen	67
7	Diskussion der Ergebnisse	69
7.1	Selbstdichtungsverhalten von Trennrissen	69
7.2	Einflüsse auf die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton	71
8	Zusammenfassung	74
9	Quellenverzeichnis	78
10	Tabellen- und Abbildungsverzeichnis	81

Anhang

Anlage 1	Erhebungsbögen zu ausgewählten landwirtschaftlichen Anlagen in Sachsen
Anlage 2	Ergebnisdokumentation experimentelle Untersuchungen
Anlage 3	Grafische Darstellung der Ergebnisse der Potentialfeldmessungen

1 Veranlassung

Stahlbetonkonstruktionen im Kontakt mit Gärsubstraten und Gärresten landwirtschaftlicher Herkunft werden in der Regel auf Basis der DIN 11622-2:2015 [31] bemessen und errichtet. Die Konstruktionen müssen so beschaffen sein, dass sichergestellt ist, dass die gemäß AwSV [33] als allgemein wassergefährdend eingestuften Flüssigkeiten nicht austreten können. Das erfordert eine flüssigkeitsundurchlässige Konstruktion, die gegen die zu erwartenden mechanischen, thermischen und chemischen Einflüsse ausreichend widerstandsfähig sein muss.

Die experimentell überprüften, gegenüber den Vorgaben in [31] um 0,1 mm vergrößerten Rissbreiten trugen der Tatsache Rechnung, dass die realen (am Bauwerk gemessenen) Rissbreiten den praktisch ohne Sicherheitsabstand ermittelten Rechenwert überschreiten können. Für die untersuchten Varianten wurde festgestellt, dass kein Flüssigkeitsaustritt aus dem Trennriss erfolgt, wohl aber immer eine Durchfeuchtung der Risse stattfindet, so dass von einer dauerhaften Einwirkung von Flüssigkeiten auf Rissflanken und Bewehrung auszugehen ist, mit möglichen Folgen für die Dauerhaftigkeit, vergl. [1] bis [3].

Parallel erfolgten Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von relevanten Stahlbetonkonstruktionen unter der Einwirkung ausgewählter Gärsubstrate und Gärreste, die in dem Folgevorhaben P52-5-19.75.1-2007/17 [3] auf eine breitere Datenbasis gestellt werden sollten. Neben den in begrenztem Umfang durchgeführten Laboruntersuchungen erfolgten Recherchen zur Zusammensetzung realer Gärsubstrate, Gärreste und Silagesickersäfte in landwirtschaftlichen Anlagen im mitteldeutschen Raum.

Mit den inzwischen abgeschlossenen Untersuchungen wurde einerseits das Ziel verfolgt, die Flüssigkeitsundurchlässigkeit von gerissenen Stahlbetonkonstruktionen unter der Einwirkung von Gärsubstraten und Gärresten zu beurteilen sowie andererseits Auswirkungen des Kontakts der wassergefährdenden Stoffe auf die Dauerhaftigkeit von landwirtschaftlichen Stahlbetonkonstruktionen zu verifizieren, jeweils auf der Grundlage der zu vergrößernden Datenbasis.

Die Dauerhaftigkeit von landwirtschaftlich genutzten Stahlbetonkonstruktionen bestimmt sich im Wesentlichen über den Widerstand des Betons gegen die Einwirkung von Flüssigkeiten, die den Beton chemisch angreifen oder korrosionsfördernd auf den Bewehrungsstahl wirken. Eine Bewertung der Ergebnisse aus bereits abgeschlossenen Vorhaben unter dem Aspekt – Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit – liegt nur in Ansätzen und unvollständig vor.

Daher sollen im Rahmen der folgenden Arbeit die bereits vorliegenden Erkenntnisse aufgegriffen, zusammengeführt und bewertet sowie durch ausgewählte Untersuchungen erweitert werden.

Die bislang überwiegend mit realen Flüssigkeiten durchgeführten experimentellen Untersuchungen haben den Vorteil, dass die Auswirkungen realer Substanzen auf die Bauteile beurteilt werden können. Sie beinhalten gleichzeitig den Nachteil, dass durch die Vielfalt möglicher Gärsubstrate und deren variable Zusammensetzung eine Validierung der Ergebnisse schwierig ist. Daher werden die vorliegenden Ergebnisse durch experimentelle Untersuchungen ergänzt, die im Sinne einer Worst - Case - Betrachtung mit den vom DIBt festgelegten Referenzflüssigkeiten durchgeführt werden. Sie sollen einen weiteren Beitrag zur Untersuchung des Verhaltens von landwirtschaftlichen Flüssigkeiten in Rissen in Bezug auf Betonschädigung und Bewehrungskorrosion liefern. Folgende Ziele sollen erreicht werden:

- Zusammenstellung und Aufbereitung vorliegender experimenteller Ergebnisse zum Durchflussverhalten von Trennrissen in Abhängigkeit von der Rissbreite, der Flüssigkeitsdruckhöhe, der Beaufschlagungsdauer und den einwirkenden wassergefährdenden Flüssigkeiten
- Zusammenstellung und Aufbereitung aller vorliegenden experimentellen Ergebnisse zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonkonstruktionen unter der Einwirkung von Gärsubstraten und Gärresten (Eindringtiefe, Schädigungstiefe, Karbonatisierung in Abhängigkeit von der Betonzusammensetzung, den einwirkenden Flüssigkeiten und der Einwirkungsdauer)
- Zusammenstellung und Aufbereitung der aus unterschiedlichen Anlagen vorliegenden Analyseergebnisse zu Eigenschaften und zur Zusammensetzung realer Gärsubstrate und Gärreste sowie zu Schäden an Stahlbetonkonstruktionen
- Untersuchung der Auswirkung von Gärsubstrat ohne und mit 10 % bzw. 20 % Silagesickersaft bei 90-tägiger Einwirkung auf gerissene Stahlbetonprüfkörper mit Bewehrungsstahl in den Rissen, Rissbreite 0,3 mm; Für die Untersuchungen werden Mischungen aus den bekannt gemachten Referenzflüssigkeiten [36] verwendet, um eine Vergleichbarkeit sicherzustellen. Erfasst wird neben der Eindringtiefe und der Betonschädigung auch das Korrosionspotential der Bewehrung über Potentialmessungen an den Prüfkörpern.
- Zusammenstellung, Auswertung und Bewertung der zusätzlichen experimentellen Untersuchungen und Ableitung von Empfehlungen für Stahlbetonkonstruktionen, die zur Sicherstellung der Flüssigkeitsundurchlässigkeit und notwendigen Dauerhaftigkeit beitragen.

2 Stahlbetonkonstruktionen in der Landwirtschaft

2.1 Aktuelle wasserrechtliche Rahmenbedingungen

Anlagen in der Landwirtschaft zum Lagern von Flüssigkeiten, die als allgemein wassergefährdend eingestuft werden, müssen nach Wasserhaushaltsgesetz (WHG), § 62 [32] so beschaffen sein und so eingebaut, aufgestellt, unterhalten und betrieben werden, dass der bestmögliche Schutz der Gewässer vor Verunreinigung oder sonstiger nachteiliger Veränderung ihrer Eigenschaften erreicht wird.

Mit der am 1. August 2017 in Kraft getretenen Bundesverordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen, AwSV [33] liegen erstmals bundeseinheitliche Regelungen vor, mit denen die Vorgaben des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) einheitlich umgesetzt werden. Die AwSV regelt alle Anlagen, in denen mit wassergefährdenden Stoffen umgegangen wird, in diesem Zusammenhang auch die „Jauche-, Gülle- und Silagesickersaftanlagen“ (JGS Anlagen) sowie Biogasanlagen, deren Lagerbehälter und mögliche Lagerflüssigkeiten Gegenstand dieses Forschungsvorhabens sind. Zur Präzisierung der verwendeten Begrifflichkeiten sind nachfolgend die für die weitere Bearbeitung maßgeblichen Begriffe entsprechend den Begriffsbestimmungen in § 2 der AwSV zusammengestellt und kurz erläutert.

Gärsubstrate landwirtschaftlicher Herkunft zur Gewinnung von Biogas

- 1) Pflanzliche Biomassen aus landwirtschaftlicher Grundproduktion
- 2) Pflanzen oder Pflanzenbestandteile, die in landwirtschaftlichen, forstwirtschaftlichen oder gartenbaulichen Betrieben oder im Rahmen der Landschaftspflege anfallen, sofern sie zwischenzeitlich nicht anders genutzt worden sind,
- 3) pflanzliche Rückstände aus der Herstellung von Getränken sowie Rückstände aus der Be- und Verarbeitung landwirtschaftlicher Produkte, wie Obst-, Getreide- und Kartoffelschlemmen, soweit bei der Be- und Verarbeitung keine wassergefährdenden Stoffe zugesetzt werden und sich die Gefährlichkeit bei der Be- und Verarbeitung nicht erhöht
- 4) Silagesickersaft
- 5) Tierische Ausscheidungen wie Jauche, Gülle, Festmist und Geflügelkot

Gärreste

Die nach der Vergärung der Gärsubstrate in Biogasanlagen verbleibenden Produkte werden als Gärreste bezeichnet. Durch die Vergärung wird die organische Substanz im Ausgangssubstrat vermindert, da ein Großteil der organischen Kohlenstoffverbindungen in Kohlendioxid und Methan abgebaut und das Methan energetisch verwertet wird.

Jauche-, Gülle- und Silagesickersaftanlagen (JGS-Anlagen) – Anlagen zum Lagern oder Abfüllen ausschließlich von [33]:

- 1) Wirtschaftsdünger, insbesondere Gülle oder Festmist i.S. § 2, Satz 1, Nr. 2-4 des Düngegesetzes [34]
- 2) Jauche i. S. § 2, Satz 1, Nr. 5 des Düngegesetzes
- 3) tierischen Ausscheidungen nicht landwirtschaftlicher Herkunft auch in Mischung mit Einstreu oder in verarbeiteter Form
- 4) Flüssigkeiten, die während der Herstellung oder Lagerung von Gärfutter durch Zellaufschluss oder Pressdruck anfallen und die überwiegend aus einem Gemisch aus Wasser, Zellsaft, organischen Säuren und Mikroorganismen sowie etwaigem Niederschlagswasser bestehen (Silagesickersaft),
- 5) Silage oder Siliergut, soweit hierbei Silagesickersaft anfallen kann.

Weitere Begriffsdefinitionen sind der Technischen Regel TRwS 792 [56] zu entnehmen. Diese Regel beinhaltet harmonisierte technische Regeln, Handlungsempfehlungen etc. der einzelnen Bundesländer und wird als allgemein anerkannte Regel der Technik von der DWA herausgegeben. Neben Begriffserläuterungen enthält die TRwS 792 Vorgaben für die bauliche Ausführung von Behältern aus Beton- und Stahlbeton sowie anlagenbezogene Anforderungen, die bei der Errichtung neuer Bauwerke zu berücksichtigen sind und bei deren Einhaltung i.d.R. davon auszugehen ist, dass die Anforderungen des WHG [32] und der AwSV [33] erfüllt werden können.

In den folgenden Ausführungen wird keine strikte Trennung zwischen JGS Anlagen und Biogasanlagen vorgenommen, sondern verallgemeinernd von landwirtschaftlichen Anlagen gesprochen.

Bei der Wiedergabe von Ergebnissen aus bereits abgeschlossenen Forschungsvorhaben werden, soweit möglich und abweichend von früheren Darstellungen, die untersuchten landwirtschaftlichen Flüssigkeiten den vorangehend aufgeführten Begrifflichkeiten neu zugeordnet.

2.2 Dauerhaftigkeit von landwirtschaftlichen Stahlbetonkonstruktionen

2.2.1 Allgemeines

Die Dauerhaftigkeit kennzeichnet die Widerstandsfähigkeit des Bauwerkes gegenüber Einwirkungen von außen, so dass zeitabhängige Veränderungen der Eigenschaften das Verhalten des Tragwerks während der geplanten Nutzungsdauer nicht unvorhergesehen verändern. In dem hier zu betrachtenden Fall der Stahlbetonkonstruktionen zur Lagerung von Gärsubstraten und Gärresten aus der Landwirtschaft ergeben sich auf der dem Lagergut zugewandten Oberfläche des Betons in der Regel andere Beanspruchungen, als auf der luft- oder erdberührten Seite der Betonkonstruktion. Der Beton muss, sofern nicht einseitig zusätzliche Maßnahmen geplant und ausgeführt werden, den jeweils höheren Beanspruchungen entsprechen.

Ziel ist, dass innerhalb der geplanten Nutzungsdauer ein vertretbar geringes Maß an Betonschädigungen und nahezu keine Stahlkorrosion auftreten. Darüber hinausgehend ist bei den hier zu betrachtenden landwirtschaftlichen Stahlbetonkonstruktionen (Lagerbehälter, Silos, etc.) Sorge zu tragen, dass keine als allgemein wassergefährdend eingestuft landwirtschaftlichen Flüssigkeiten aus der Konstruktion austreten und in das Grundwasser oder Oberflächenwasser gelangen. Diese Anforderung muss über eine entsprechende Begrenzung der Rissbreite sichergestellt werden.

Im folgenden Schema der Abbildung 1 sind ausgewählte Einwirkungen bzw. Ursachen zusammengestellt und entsprechend gewichtet, die in landwirtschaftlichen Stahlbetonkonstruktionen potentiell zu Schäden mit einhergehender Beeinträchtigung der Dauerhaftigkeit führen können. Landwirtschaftlich genutzte Stahlbetonbehälter werden in der Regel für eine Nutzungsdauer von maximal 30 Jahren ausgelegt. Zum Vergleich - übliche Betonbauwerke sind für eine Nutzungsdauer von 50 Jahren und Ingenieurbauwerke für maximal 100 Jahren zu bemessen, siehe auch Tabelle 1.

Tragwerksplanung, Konstruktion und Ausführung von Behältern aus Stahlbeton (Ortbeton, Betonfertigteile, mit Ortbeton ergänzte Betonfertigteile) oder Spannbeton müssen gemäß TRWS 792 [56] auf Grundlage der DIN 11622 [31] erfolgen. Die DIN konkretisiert unter Berücksichtigung von DIN EN 206-1, DIN 1045-2, DIN 1045-3, DIN 1045-4 sowie DIN EN 13670 die für Stahlbetonbauwerke geltenden europäischen Regeln DIN EN 1990, DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-3 für die allgemeine Bemessung des Stahlbetons mit ihren nationalen Anhängen [43] bis [46].

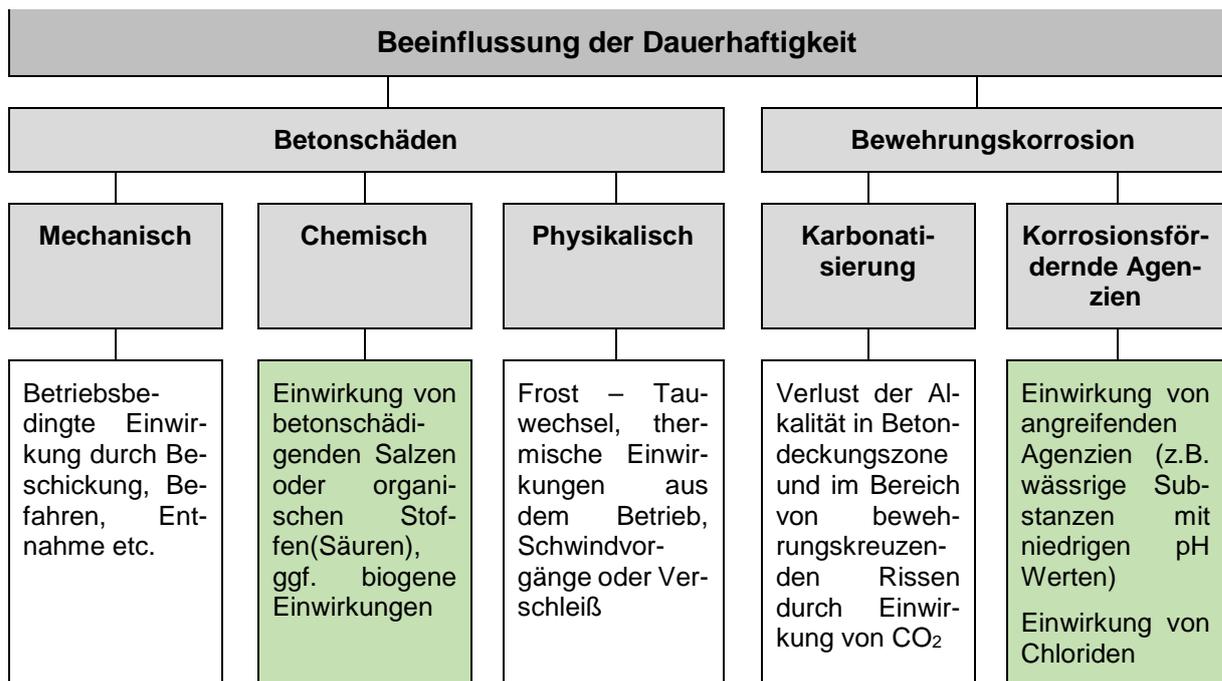


Abbildung 1 Einflussfaktoren auf die Dauerhaftigkeit in Anlehnung an [48]

Im Zusammenhang mit der aktuell behandelten Thematik sollen die beiden in farbig markierten Einflüsse auf die Dauerhaftigkeit etwas näher unteretzt werden.

An landwirtschaftlich genutzte Tragwerke werden nach DIN EN 1990 [43] im Gegensatz zu üblichen Stahlbetontragwerken des Hoch- und Ingenieurbaus von vornherein geringere Anforderungen im Hinblick auf die Nutzungsdauer gestellt, siehe folgende Tabelle. Neben den für diese Stahlbetonkonstruktionen in der Regel geringeren konstruktiven Anforderungen mag auch die potentielle Einwirkung korrosionsfördernder Agenzien dabei eine Rolle spielen. Die angegebenen Werte sind in Deutschland als Anhaltswerte zu betrachten. Die Regelungen zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit, die in den bauartspezifischen Bemessungsnormen enthalten sind, sichern in der Regel bei angemessenem Instandhaltungsaufwand die geforderte Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit ohne wesentliche Beeinträchtigung der Nutzungseigenschaften während der vorgesehenen Nutzungsdauer [44].

Tabelle 1 Klassifizierung der Nutzungsdauer nach DIN EN 1990 [43]

Klasse der Nutzungsdauer	Planungshorizont der Nutzungsdauer (in Jahren)	Beispiele
1	10	Tragwerke mit befristeter Standzeit
2	10 - 25	austauschbare Tragwerksteile, z.B. Kranbahnträger, Lager

Klasse der Nutzungsdauer	Planungshorizont der Nutzungsdauer (in Jahren)	Beispiele
3	15 - 30	landwirtschaftlich genutzte oder ähnliche Tragwerke
4	50	Gebäude und andere gewöhnliche Tragwerke
5	100	Monumentale Gebäude, Brücken und andere Ingenieurbauwerke

Der die Dauerhaftigkeit begründende Widerstand des Betons ergibt sich aus den Betoneigenschaften, die je nach vorliegender Exposition mit konstruktiven Vorgaben verknüpft sind. Die Besonderheit bei landwirtschaftlichen Stahlbetonkonstruktionen besteht in der Einwirkung von chemisch unterschiedlich angreifenden Lagerflüssigkeiten, deren zunehmende Vielfalt eine Klassifizierung erschwert. Darüberhinausgehend sind die konkreten Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit von Beton sowohl in der Fläche, als auch im Bereich von Rissen und hier insbesondere bei bewehrungskreuzenden Rissen noch nicht ausreichend bekannt.

In den folgenden Abschnitten werden die in Abbildung 1 farbig markierten Einflüsse auf die Dauerhaftigkeit von landwirtschaftlichen Stahlbetonkonstruktionen zum Lagern und Abfüllen von Gärsubstraten, Gärresten, Silagesickersaft etc. detaillierter betrachtet.

2.2.2 Betonkorrosion durch chemischen Angriff

2.2.2.1 Allgemeines

Unter chemischem Angriff wird die Wechselwirkung zwischen Beton und angreifenden Medien verstanden, die zu nachteiligen Veränderungen der Betoneigenschaften führen kann, [5], [6]. Das DBV Merkblatt „Chemischer Angriff auf Betonbauwerke“ [49], [50] gibt einen Überblick über wesentliche Schadensmechanismen.

Grundsätzlich lassen sich drei unterschiedliche Schädigungsarten von Zementstein und Gesteinskörnung unterscheiden, die in Anlehnung an [5], [7] in der folgenden Tabelle zusammengestellt sind.

Tabelle 2 Klassifizierung des chemischen Angriffs auf Beton in Anlehnung an [5], [7]

Chemischer Angriff		
I	II	III
Auslaugung des Zementsteines	Austauschreaktion zwischen Flüssigkeiten und Zementstein	Treiben durch Einwirkung von Salzen
Herauslösen von Kalziumhydroxid aus dem Zementstein	Lösen von Ca^{2+} und Bildung - leicht löslicher Salze oder - Bildung schwer löslicher Salze oder Substitution der Ca^{2+} -Ionen durch austauschfähige Salze	Bildung neuer Verbindungen im Zementstein, verbunden mit Volumenänderungen
z.B. Einwirkung von salzfreiem, weichem Wasser	z.B. durch Einwirkung von organischen oder anorganischen Säuren	z.B. durch Einwirkung von Sulfaten oder Magnesiumsalzen
Führt zur Absenkung der Alkalität bis zur Decalcifizierung der C-S-H-Phasen	Führt zu Porositäts- und Masseänderungen, Verringerung der Alkalität und Festigkeit	Entstehen von Gefügespannungen, Rissbildung, ggf. Zerstörung Betongefüge

Von den vorangehend dargestellten Schadensmechanismen ist in landwirtschaftlichen Anlagen überwiegend mit Austauschreaktionen zwischen einwirkenden Flüssigkeiten (Chemikaliengemische) und Zementstein und in begrenztem Maß mit treibendem Angriff zu rechnen.

Die Korrosion durch Austauschreaktion beruht nach [5] auf der chemischen Umsetzung bzw. Umwandlung der einzelnen Zementsteinphasen. Die dabei entstehenden Reaktionsprodukte werden anschließend in Abhängigkeit ihrer Löslichkeit aus dem Zementstein herausgelöst. Zu diese Form des chemischen Angriffs kommt es beim Angriff von Säuren bzw. sauren Wässern. Darüber hinaus können Salze, deren Basen schwächer als die des $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sind (z. B. Magnesium- und Ammoniumsalze), betonkorrosiv wirken.

Aus vorliegenden Analysen [1] bis [3] ist bekannt, dass neben organischen Säuren auch mit Magnesium-, Ammonium-, und Sulfationen angereicherte wässrige Lösungen auftreten und zum chemischen Betonangriff beitragen. Mögliche, dabei auftretende Reaktionen werden in Abschnitt 2.2.2.3 beschrieben. Neben dem lösenden Angriff sind unter der Einwirkung von Sulfationen auch Reaktionen mit Volumenvergrößerung der Reaktionsprodukte (Treibreaktionen) möglich.

2.2.2.2 Angriff durch organische Säuren

Von allen Bestandteilen der in landwirtschaftlichen Anlagen gelagerten bzw. umgeschlagenen Flüssigkeiten besitzen die im Silagesickersaft enthaltenen organischen Säuren in Abhängigkeit von ihrem Mengenanteil das größte Potential für einen lösenden Angriff auf den Beton über vorangegangene Austauschreaktionen.

Bei organischen Säuren, wie z.B. die in Silagesickersaft vorkommende Milchsäure oder Essigsäure handelt es sich um schwache Säuren, die in Wasser nicht vollständig dissoziiert vorliegen. Dies führt zu einem höheren pH-Wert, jedoch nicht automatisch zu einer niedrigeren Korrosionsaggressivität. Während der Korrosion werden die Hydroniumionen verbraucht, wodurch die Säure zur weiteren Dissoziation gezwungen wird. Für den Korrosionsprozess stehen also die freien Hydronium Ionen und die noch gebundenen Protonen der undissoziierten Säure zur Verfügung [10]. Da der pH Wert nur den dissoziierten Anteil abbildet, ist für die Bewertung der Korrosionsaggressivität die Säurestärke von größerer Bedeutung.

Die stoffspezifische Gleichgewichtskonstante zur Beschreibung des Dissoziationsgrades ist der pKs - Wert. Er ist definiert als der negative dekadische Logarithmus der Säurekonstanten, die das Maß der Abgabe von Protonen aus einem Stoff im Gleichgewichtssystem mit Wasser darstellt. Je kleiner der pKs - Wert, desto stärker ist die Säure und desto mehr dissoziiert diese in wässrigen Lösungen. Zum Vergleich sind nachfolgend pKs - Werte einiger Säuren aus Tabellenwerken übernommen worden.

Tabelle 3 pKs – Werte ausgewählter Säuren [2]

	Säurestärke	Name	Summenformel	pKs Wert
anorganische Säuren	sehr stark	Salzsäure	HCl	-6
		Schwefelsäure	H ₂ SO ₄	-3
	stark	Phosphorsäure	H ₃ PO ₄	1,96
		Schweflige Säure	H ₂ SO ₃	1,81
Organische Säuren (COOH-Gruppe)	stark	Ameisensäure (Methansäure)	CH ₂ O ₂	3,74
		Milchsäure (2-Hydroxypropansäure)	C ₃ H ₆ O ₃	3,86
	mittelstark	Essigsäure (Ethansäure)	C ₂ H ₄ O ₂	4,76
		Buttersäure (Butansäure)	C ₄ H ₈ O ₂	4,82
		Valeriansäure (Pentansäure)	C ₅ H ₁₀ O ₂	4,84
		Propionsäure (Propan-säure)	C ₃ H ₆ O ₂	4,87
Capronsäure (Hexansäure)	C ₆ H ₁₂ O ₂	4,87		

Einige der zu betrachtenden organischen Säuren zählen auf Grund ihres pK_s – Wertes zu starken bzw. mittelstarken Säuren. Da sie in wässriger Lösung nur teilweise dissoziiert vorliegen, können sie auch mit höheren pH Werten größere Schäden an Betonbauteilen verursachen, da die verfügbare Gesamtmenge an H^+ größer ist. Beim Angriff von organischen Säuren steigt der pH-Wert erst an, wenn keine weitere Dissoziation mehr stattfinden kann und die Protonen durch die Reaktion mit Betonbestandteilen aufgebraucht wurden.

Unabhängig von der Säurestärke, die in erster Linie Ausmaß und Geschwindigkeit der Korrosion bestimmt, lässt sich der Säureangriff auf Beton über einen allgemeinen Chemismus beschreiben, der nachfolgend basierend auf den Ausführungen in [5], [9], [10] bzw. [11] beschrieben wird. Die Stabilität der Festphasen von Zementstein ist abhängig vom pH Wert der umgebenden Lösungen. Die Porenlösung von Zementstein hat einen relativ hohen pH Wert von ca. 13,5 und eine sehr niedrige Hydroniumkonzentration. Der hohe pH Wert stabilisiert zunächst Portlandit und die Hydratphasen. Aus thermodynamischer Sicht ergibt sich zu jeder Festphase ein korrespondierender pH Wert. Wird dieser unterschritten, löst sich die Phase auf. Die sich daraus ergebende Reihenfolge ist in Abbildung 2 nach Franke [9] schematisch wiedergegeben.

Auf der linken Seite befindet sich der ungeschädigte Zementstein. Die Auslaugungszone schließt sich rechts an. Aufgrund ihrer unterschiedlichen Stabilität eilt die Korrosionsfront des Portlandits der der CSH-Phasen voraus. Portlandit besitzt im Gegensatz zu den CSH-Phasen eine klare Lösungsfront gegen das angreifende Medium. Bei den CSH-Phasen dagegen kommt es mit abnehmendem pH-Wert zu einer kontinuierlichen Auslaugung des Calciums. In direktem Kontakt zur angreifenden Lösung befindet sich die sogenannte Gel-Schicht, die weitgehend aus amorphem Siliciumdioxid besteht und weitere anorganische Salze enthält.

Aufgrund der hohen Porosität und der damit verbundenen geringen Festigkeit hat die Randzone nur unter geschützten Bedingungen auf der Oberfläche des Materials Bestand.

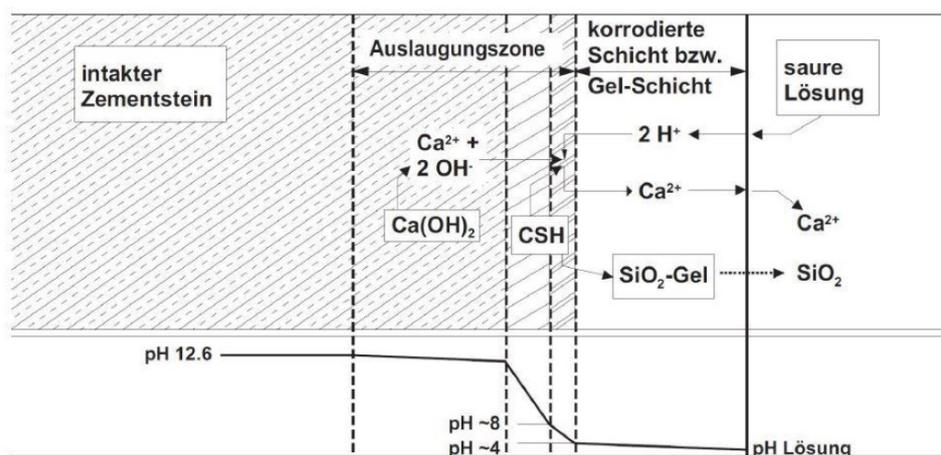


Abbildung 2 Schematische Darstellung der korrodierten Randzone bei saurem Angriff [10]

Zu Beginn ist die Korrosionsgeschwindigkeit abhängig von der Anwesenheit der aggressiven Ionen an der Baustoffoberfläche. Mit zunehmender Dauer nimmt die Dicke der korrodierten Randschicht zu, die ggf. als Art „Schutzschicht“ fungieren kann. Die Korrosionsgeschwindigkeit ist dann zunehmend abhängig von der Diffusionsgeschwindigkeit der Ionen innerhalb der korrodierten Randschicht. Die Stabilität der korrodierten Randschicht beeinflusst somit maßgeblich die Korrosionsgeschwindigkeit. Sie ist abhängig von ihrer chemischen Zusammensetzung sowie von mechanischen Einwirkungen. Bei einem kontinuierlichen Abtrag der korrodierten Randschicht bleibt die Korrosionsgeschwindigkeit abhängig von der Verfügbarkeit der Ionen an der Baustoffoberfläche.

Insbesondere CaO und seine Verbindungen, die Hauptbestandteil üblicher Zemente sind, werden von Säuren angegriffen. Besonders anfällig gegen Säureangriff ist Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Es wird in Form des Minerals Portlandit bei der Hydratation des Portlandzementklinkers insbesondere in den im Frischbeton mit Wasser gefüllten Räumen sowie an der Oberfläche der Gesteinskörnung gebildet. Es entsteht eine räumliche Struktur aus Portlandit [8], die das Eindringen betonangreifender Flüssigkeiten in die Zementsteinmatrix ermöglicht und die die Bildung charakteristischer Reaktionssäume an der Oberfläche der Gesteinskörnung erklärt.

Schädigende Einflüsse auf Beton durch die JGS-Flüssigkeiten sind in der Literatur vor allem für Essigsäure und Milchsäure beschrieben. Essigsäure ($\text{CH}_3 \cdot \text{COOH}$) und Milchsäure ($\text{CH}_3 \cdot \text{CHOH} \cdot \text{COOH}$) gehören zu den stärkeren organischen Säuren. Sie tragen wesentlich zu den auftretenden Schäden bei Einwirkung landwirtschaftlicher Flüssigkeiten auf Beton bei. Dies liegt an der sehr großen Löslichkeit in Wasser der beim Säureangriff gebildeten Salze Calciumacetat bzw. Calciumlactat. Angegriffen wird neben dem freien Kalk im Zementstein auch der an Kieselsäure gebundene Kalk. Nach [34] ist diese Wirkung besonders bei pH Werten kleiner als 5 zu beobachten. An gleicher Stelle wird über Versuchsergebnisse berichtet, nach denen Beton mit Portlandzement stärker angegriffen wird, als Beton mit Hochofenzement. Das Ergebnis korrespondiert mit dem höheren Anteil an Portlandzementklinker im Portlandzement.

Das Schädigungspotenzial von Silagesickersaft bedingt die Einordnung der Umgebungsbedingungen für den Beton in die Expositionsklasse XA3, die neben Anforderungen an die Betonzusammensetzung eine zusätzliche Schutzmaßnahme erfordert.

2.2.2.3 Angriff durch weitere wässrige Lösungen

Ähnlich wie Säuren verursachen auch saure Salze einen lösenden Angriff auf den Beton. Dabei handelt es sich um Salze, die durch das Verhalten der Ionen den pH-Wert der Lösung verändern. Das ist zum Beispiel beim Ammoniumion, das in wässriger Lösung ein Proton abgeben kann, der Fall. Der saure Charakter der Lösung führt wie beim Säureangriff zunächst zur Lösung von CaO bzw. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ und später zum Lösen von Bestandteilen der CSH-Phasen. Zu den austauschfähigen Salzen, die in landwirtschaftlichen Anlagen vorkommen und Beton angreifend sind, gehören neben den Ammoniumsalzen auch alle Magnesiumsalze außer MgCO_3 .

Jauche und Gülle wirken im Vergleich mit Silagesickersaft durch die in i.d.R. in geringer Konzentration auftretenden Salze gering chemisch angreifend. Die stoffliche Zusammensetzung von Gülleproben variiert stark, so dass kaum verallgemeinerbare Analyseergebnisse existieren.

Von Bedeutung ist anlagenabhängig u.U. der Angriff von tierischen und pflanzlichen Fetten und Ölen. Pflanzliche Fette und Öle stellen Glycerinester mehrfach ungesättigter Fettsäuren dar, die durch das Calciumhydroxid des Zementsteins verseift (Esterspaltung durch Wasseraufnahme) werden können. Die fettsauren Calciumsalze sind wasserlöslich und führen zur Schwächung des Betongefüges. Insbesondere bei höheren Temperaturen werden Betone durch pflanzliche Fette und Öle stark angegriffen.

Eine sehr hohe chemische Beanspruchung wirkt auf den Beton im Gasraum von Biogasanlagen, wo durch biogene Schwefelsäurebildung sowohl ein lösender Angriff durch die Säure (überwiegend) als auch ein treibender Angriff durch die Sulfatbeaufschlagung (untergeordnet) stattfindet. Auf diese Problematik wird hier nicht weiter eingegangen.

2.2.3 Korrosion von Bewehrungsstahl

Neben Schädigungsprozessen des Betons beeinflusst auch die Korrosion des Bewehrungsstahls die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton (-bauwerken). Nach [48] kommt es zur Korrosion der Bewehrung infolge:

- unzureichender und / oder lokal ganz fehlender schützender Betondeckung oder
- Verlust der Alkalität in der schützenden Betondeckung im Ergebnis der Reaktion des Betons mit dem Kohlendioxid aus der Luft und der daraus resultierenden Karbonatisierung oder
- chemisch auf den Beton einwirkender Agenzien, wie z.B. Chloride oder andere chemische Substanzen oder durch
- elektrische Streuströme.

Bei der in landwirtschaftlichen Anlagen aus Stahlbeton zu betrachtenden Korrosion handelt es sich im Allgemeinen um elektrochemische Vorgänge an der Stahloberfläche, die an das Vorhandensein eines Elektrolyten (i.d.R. Wasser) gebunden sind. Der Ort, an dem die Korrosionsreaktionen ablaufen, ist die Phasengrenze Metall / Elektrolyt, wobei der Zustand der Reaktionsfläche einen erheblichen Einfluss auf das Ausmaß der Korrosion hat. Neben diesem Einfluss muss die Möglichkeit gegeben sein, dass das angreifende wässrige Medium über Konvektion und Diffusion an die Oberfläche und in die Oberflächenschichten heran- und die Korrosionsprodukte ggf. auch abtransportiert werden. Naturgemäß ist das bei Trennrissen im Stahlbeton eher der Fall, als in ungerissenen Bereichen.

Das Maß für die Korrosionsbereitschaft von Metallen ist sein Potential (elektrochemische Spannungsreihe). Je höher das elektrochemische Potential in wässrigen Lösungen ist, desto geringer ist die Korrosionsbereitschaft des Metalls. Das in der elektrochemischen Spannungsreihe angegebene Elektrodenpotential gilt nur für standardisierte Randbedingungen. Sobald diese Randbedingungen geändert werden, verschiebt sich das Potential. Beeinflusst werden kann die Verschiebung durch Temperatur, pH Wert des Elektrolyten und Belüftungsbedingungen (Sauerstoffzufuhr).

Einen Überblick über die thermodynamischen Stabilitätsverhältnisse von Metallen gegenüber Korrosion in wässrigen Lösungen ermöglichen die Potential – pH Diagramme nach POURBAIX, welche die thermodynamisch berechneten Gleichgewichtspotentiale aller in einem System möglichen Elektrodenreaktionen enthalten [24]. Die folgende Abbildung zeigt das Potential-pH Diagramm für Eisen bei $T = 25^{\circ}\text{C}$ in Anlehnung an Pourbaix. Es zeigt die thermodynamischen Zustandsfelder für die Immunität von Eisenmetallen, die aktive Korrosion unter Bildung von Metallionen und die Passivierung durch die Entstehung von Oxidschichten.

Abbildung 3 POURBAIX-DIAGRAMM Fe – H₂O (25°C) [24]

Unterhalb der Linie 1 in Abbildung 3 tritt keine Korrosion auf, das Eisen wird nicht angegriffen. Der auf niedrige Potentiale beschränkte Immunitätsbereich ist aus thermodynamischen Gründen weitestgehend sicher vor Korrosion. Er ist gekennzeichnet durch die Fähigkeit von Eisenionen, Elektronen aufzunehmen (Reduktion).

Dieser Bereich wird durch kathodischen Korrosionsschutz gezielt erreicht, für die Dauerhaftigkeit von landwirtschaftlichen Stahlbetonkonstruktionen ist er von geringer Bedeutung.

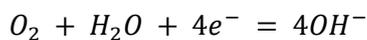
Im durch die Linien 6, 5, 4, 3 und 8 eingeschlossenen Gebiet wird Eisen passiviert. Die Passivität wird beim Eisen durch die Bildung einer sandwichartigen Struktur (Oxidschicht) mit stahlseitigem Fe₃O₄ verursacht, das elektrolytseitig zu $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ aufoxidiert wird. Fe₂O₃ ist nur im alkalischen Bereich ab ca. pH 9 beständig. Der Schutz gegen Eisenauflösung beruht auf der Dichte und Porrenfreiheit der Schicht, die den Übergang von Metallionen in den Elektrolyten praktisch unmöglich macht [6].

Die alkalische Umgebung von Bewehrungsstahl wird durch eine ausreichende Betondeckung hergestellt, deren pH Wert nicht unter 9 fällt. Sobald es durch Karbonatisierung oder andere Umsetzungsprozesse zur Verringerung des pH Wertes der Bewehrungsumgebung kommt, geht die Schutzwirkung auf dem Stahl verloren.

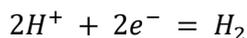
Die Linien 1, 4 und 5 umschließen das Gebiet mit Fe^{2+} als stabilem Korrosionsprodukt. Diese Herauslösung von Eisenionen ist der anodische Teilprozess der Korrosion. Er setzt die Anwesenheit eines Elektrolyten (Wasser oder wässrige Lösungen) voraus. Hier kann, ausreichendes Sauerstoffangebot vorausgesetzt, mehr oder weniger ungehindert Korrosion ablaufen. Der Vorgang findet, wie das Diagramm zeigt, bei pH-Werten unter 9 statt.

Etwas anders gestalten sich Korrosionsvorgänge bei Anwesenheit von Säuren. Grundsätzlich wird in Abhängigkeit vom Oxidationsmittel zwischen

Sauerstoffkorrosion



und Säurekorrosion



unterschieden. Durch die Phasengrenze Metall / Flüssigkeiten erfolgt ein Ladungstransport in Form von Metallionen und Elektronen, wobei die Geschwindigkeit der anodischen Grenzflächenreaktion der Metallionenbildung den eigentlichen Materialverlust beeinflusst. Für die Korrosion von Metallen in Säuren ist nach [34] zu beachten, dass bei nur wenig dissoziierten schwachen Säuren, als kathodische Teilreaktion auch eine Wasserstoffentwicklung aus dem Säuremolekül, siehe Abbildung 3 erfolgen kann.

Analog zum lösenden Angriff von Beton durch Säuren, Abschnitt 2.2.2.2, ist auch bei der Stahlkorrosion die Säurekonzentration und weniger der pH Wert ein Maß für die Korrosionsaggressivität. In reiner Form tritt die Säurekorrosion nur dann auf, wenn die angreifende Lösung völlig luftfrei ist. Da das in der Regel nicht der Fall ist, tritt ein zusätzlicher Elektrodenprozess auf, der in der Reduktion von gelöstem Sauerstoff unter Bildung von OH^- Ionen besteht. Der pH Wert der angreifenden Flüssigkeit kann durch diese kathodischen Teilreaktion dahingehend beeinflusst werden, dass Wandalkalität entsteht, die Deckschichtbildung gefördert wird und die Reduktion von Hydroniumionen den Säuregehalt reduziert.

Die einzelnen Mechanismen sind sehr komplex und von einer Vielzahl von Randbedingungen, u.a. auch der Löslichkeit der entstehenden Metallionen und das hiervon abhängige Ausbleiben einer Schutzschichtbildung abhängig. Wie bei der Sauerstoffkorrosion ist auch bei der Säurekorrosion die Diffusionsgeschwindigkeit, hier der H_3O^+ - Ionen geschwindigkeitsbestimmend [24]. Grundsätzlich begünstigen wässrige Elektrolyte mit niedrigen pH - / PKs - Werten Auftreten und Fortschreiten von Bewehrungsstahlkorrosion, zunächst über den Einfluss auf den alkalischen Beton (pH Wert Reduzierung) und im Anschluss über die Wirkung auf die Deckschichten des Stahls. Zu den einzelnen Mechanismen sei weiterführend auf [24] verwiesen.

Zur Einordnung und Bewertung der schädigenden Vorgänge in Bezug auf die Dauerhaftigkeit sollen die Betrachtungen basierend auf [12] herangezogen werden.

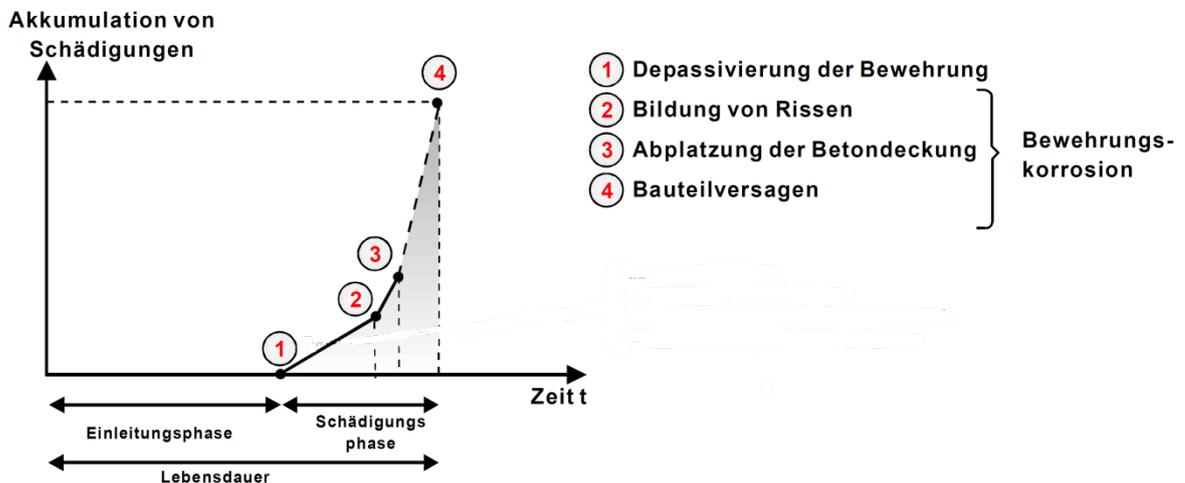


Abbildung 4 Akkumulation von Schädigungen am Stahlbeton, nach [51]

Die Bewehrungskorrosion lässt sich in eine Einleitungs- und eine Schädigungsphase unterteilen, die aufeinander folgen und deren Ausprägung bzw. Dauer eine komplexe Funktion von Baustoff- und Bauteileigenschaften sowie den Nutzungs- und Umgebungsbedingungen ist. Während der Einleitungsphase kommt es zur Reduzierung des pH Wertes des Beton (der Betondeckung) durch Karbonatisierung oder andere Umsetzungsprozesse auf Werte unter 9 und / oder zum Erreichen eines kritischen Chloridgehaltes im Beton. Die Bewehrung selbst erleidet in diesem Zeitraum keine Schädigung, genauso wenig muss der Einleitungsprozess für den Beton schädlich sein.

In Folge geht die Passivschicht und damit der Korrosionsschutz der Bewehrung entweder örtlich eng begrenzt oder über größere Oberflächenbereiche verloren. Korrosion der Bewehrung und damit der Beginn der Zerstörungsphase sind aber erst dann möglich, wenn die Karbonatisierungs- bzw. Umsetzungsfront oder ein kritischer Chloridgehalt die Oberfläche der Bewehrung erreicht haben. Während der Zerstörungsphase ist die Passivschicht nicht stabil und die Bewehrung korrodiert, d.h. die Schädigung beginnt. Die Korrosion der Bewehrung (i.d.R. gleichmäßig abtragende Korrosion oder Lochfraßkorrosion) führen flächig oder lokal begrenzt zur Reduzierung des Stahlquerschnittes. Das wesentlich größere Volumen der Korrosionsprodukte im Vergleich zum unkorrodierten Stahl erzeugt bereits bei relativ kleinen Korrosionsintensitäten Spannungen, in deren Folge Risse im Beton bzw. Betonabplatzungen auftreten.

Der Grenzzustand bedeutet, dass ein bestimmter, noch akzeptierter Grenzwert der Tragfähigkeits- und Nutzungseigenschaften erreicht ist (Abplatzungen der Betondeckung, unzulässige Abrostung des Stahls). Das kann entweder bedeuten, dass das Ende der Lebensdauer des Bauteils oder Bauwerkes erreicht ist oder dass eine grundlegende Instandsetzung erforderlich wird.

2.2.4 Einfluss der Rissgeometrie auf Dauerhaftigkeit und Durchlässigkeit

Risse sind im Stahlbetonbau typische, die Bauart kennzeichnende Erscheinungen. Wenn die Vorteile des Verbundwerkstoffs genutzt werden sollen, kann das deutlich größere Dehnvermögen des Stahls nur genutzt werden, wenn Risse entstehen. Sie kompensieren den Dehnungsunterschied zwischen Bewehrung und umgebendem Beton. Andererseits ermöglichen sie den Zutritt von flüssigen und/oder gasförmigen Stoffen ins Innere des Betons und im ungünstigsten Fall bis an die Bewehrung. Dort können Reaktionen ausgelöst werden, die den Stahl chemisch angreifen und die Dauerhaftigkeit des Bauteils langfristig beeinträchtigen.

Die zusammengefasste allgemeine Forderung der DIN EN 1992-1-1/NA (Eurocode 2) [43] an die Begrenzung der Rissbreiten lautet: „Die Rissbreite ist so zu begrenzen, dass die ordnungsgemäße Nutzung des Tragwerks, sein Erscheinungsbild und die Dauerhaftigkeit nicht beeinträchtigt werden“. Im Stahlbeton Hochbau wird davon ausgegangen, „dass Risse weder die Gebrauchstauglichkeit noch die Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauwerken beeinträchtigen, sofern sie unter Gebrauchslasten ausreichend verteilt und ihre Breite durch Maßnahmen, die auf die Umgebungsbedingungen sowie auf die Art und Funktion des Bauwerks abgestimmt sind, auf unschädliche Werte begrenzt werden“ [51]. Ohne zahlenmäßige Konkretisierung gilt allerdings, dass Risse mit größeren Rissbreiten im Vergleich zu Rissen mit kleineren Rissbreiten bei speziellen Umgebungsbedingungen die Korrosion der Bewehrung fördern können und so einen direkten Einfluss auf die Dauerhaftigkeit des entsprechenden Bauteils haben.

Zu den wichtigsten Eigenschaften eines Risses gehört daher die Rissbreite. Sie beeinflusst neben den Umgebungs- und Nutzungsbedingungen Dauerhaftigkeit und Flüssigkeitsdurchlässigkeit von Stahlbetonbauteilen, beides Eigenschaften, die in landwirtschaftlichen Lagerbehältern eine wichtige Rolle spielen. Für Gärfuttersilos, Güllebehälter, Behälter in landwirtschaftlichen Anlagen und Biogasanlagen gibt die aktuelle DIN 11622-2 [31] eine Begrenzung der rechnerischen Rissbreite von Trennrissen auf $w_k = 0,2$ mm unter quasi-ständiger Einwirkungskombination vor. Die Verringerung der zunächst entsprechend der Expositionsbedingungen auf $w_k = 0,3$ mm festgelegten Rissbreitenbegrenzung auf $w_k = 0,2$ mm war die Folge einer sicherzustellenden Flüssigkeitsundurchlässigkeit von Stahlbetonbehältern unter der Einwirkung von landwirtschaftlichen Flüssigkeiten.

Die einzige Möglichkeit, unter gegebenen Bedingungen eine zu erwartende Rissbildung bezüglich der Rissbreite zu beeinflussen, hat der Tragwerksplaner in der Planungsphase.

Die Schwierigkeiten, ein zutreffenderes Berechnungsergebnis zu erzielen, liegen in hohem Maß in der Streuung der realen Rissbreiten begründet. Abbildung 5 zeigt die Gegenüberstellung von Rechenwerten und zugehörigen Messwerten der Rissbreite. Es ist zu erkennen, dass z. B. dem Rechenwert der Rissbreite $w_{k,vers} = 0,20$ mm ein Wertebereich der Messwerte von 0,04 mm bis 0,30 mm zuordenbar ist (horizontale violette Linie).

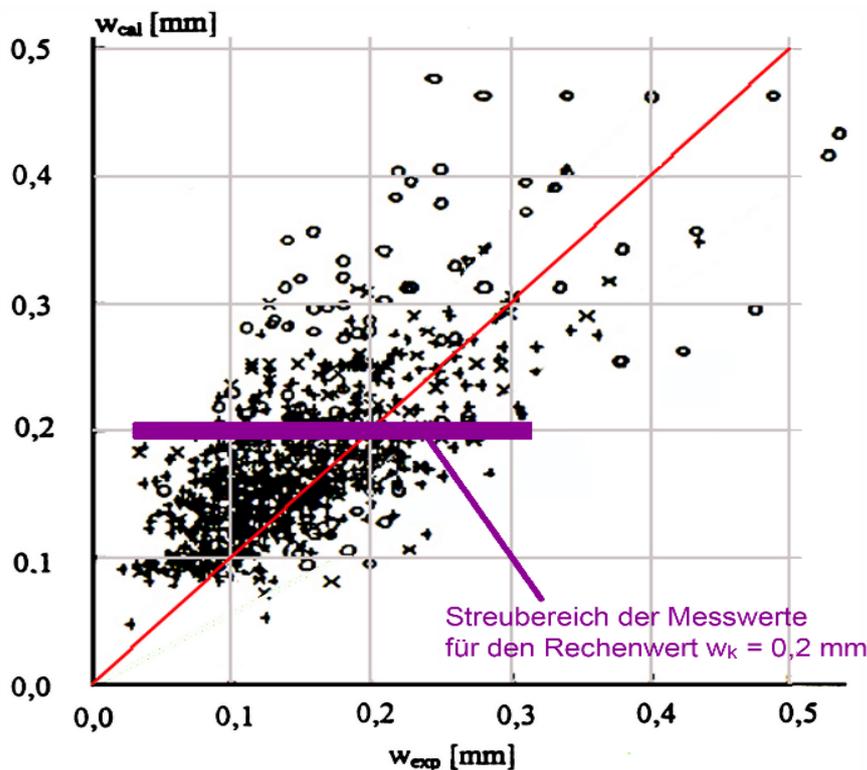


Abbildung 5 Gegenüberstellung von Rechenwerten $w_{k,cal}$ und Messwerten $w_{k,vers}$ der Rissbreite nach [20]

In den Einführungserläuterungen zur DIN 1045-1 [17], auf die bezüglich Rissbreitenberechnung heute noch verwiesen wird, ist der Rechenwert der Rissbreite folgendermaßen definiert:

„Für die Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit eines Betonbauteils ist der Riss mit maximaler Breite von größerer Bedeutung als die mittlere Breite aller Risse. Gemäß diesem Gedanken wird in der neuen DIN 1045-1 der Rechenwert der Rissbreite w_k der maximalen Rissbreite w_{max} gleichgesetzt. In diesem Zusammenhang soll jedoch erwähnt werden, dass die rechnerisch ermittelte maximale Rissbreite w_k von zahlreichen streuenden Faktoren abhängt und deshalb wiederum nur einen charakteristischen Wert möglicher maximale Rissbreiten darstellt. Mit anderen Worten bedeutet dies, dass Risse mit größeren Breiten als die rechnerische Rissbreite w_k nicht völlig ausgeschlossen werden können.“

Mit dieser Definition des Rechenwertes der Rissbreite ist ein direkter Vergleich einer gemessenen Rissbreite am Bauwerk mit einem Rechenwert nicht möglich, weil es keine eindeutige Zuordnung von Messwerten zu Rechenwerten gibt. Der Rechenwert ist ein oberer Grenzwert, unter dem mehrere Messwerte für mehrere Risse existieren können. Auch an einem realen Riss sind mehrere reale Rissbreiten messbar. Beispielsweise ist es dem persönlichen Ermessen der messenden Person überlassen, ob sie einen Einzelwert oder einen Mittelwert aus mehreren Einzelwerten zur Rissbreite des zu messenden Risses erklärt.

Die Differenz kann bis zu 0,1 mm betragen. Die statistische Aussagegenauigkeit der Rissbreitenberechnung wird durch die Vereinfachungen des Rechenmodells und durch die Streuungen der tatsächlichen Einwirkungen, der Materialeigenschaften, insbesondere Verbund- und Betonzugfestigkeit und der Ausführungsqualität bestimmt [51].

Für die Messung von Rissbreiten und die Bewertung der Rissbreite in Abhängigkeit vom Messverfahren existieren keine Prüfnorm und keine anerkannten Regeln. Es ist allerdings bereits seit längerem bekannt, dass die gebräuchlichen Messverfahren Einfluss auf das Messergebnis und damit unter ungünstigen Umständen auch einen direkten Einfluss auf die Bewertung von Versuchsergebnissen zum Durchflussverhalten von Trennrissen und einen indirekten Einfluss auf Dauerhaftigkeitsprognosen im hier betrachteten Anwendungsbereich haben können [18]. Deshalb soll im Folgenden unter Berücksichtigung dazu bereits vorliegender Veröffentlichungen und Diskussionen mit dem Autor [19] näher auf die in dieser Arbeit verwendeten Messverfahren und untersuchten Rissgeometrien eingegangen werden.

Es ist bekannt, dass der Trennrisse nicht nur aus zwei Rissufern und einem leeren Spalt besteht. Beim Zugbruch einer Betonprobe entstehen plastische Längenänderungen analog zur Stahlprüfung z. B. an Bewehrungsstäben. Beim Stahl entsteht beim Überschreiten der Streckgrenze durch plastische Verformungen eine Einschnürung. Beim Beton gibt es vor dem Entstehen eines Risses keine Einschnürung, aber sehr kleine plastische Verformungen. Bei der Rissöffnung bilden sie die Verbindungen zwischen den Rissufern, über die bis zu einer Rissuferverschiebung von 0,15 mm bis 0,20 mm noch geringe Zugspannungen übertragen werden können. Diese plastischen Verformungen verbleiben auch nach der vollständigen Trennung der Rissufer als Auflockerungszone an den Rissufern. Für den möglichen Wiederverschluss eines Trennrisses ist das sehr vorteilhaft, weil die Rissuferflächen durch die Reste der sog. Auflockerungszone eine natürliche Rauheit bekommen und dadurch günstige Anlagerungsmöglichkeiten für die im Wasser enthaltenen Partikel haben.

Die Messgenauigkeit der Rissbreiten liegt meist unter der Leistungsfähigkeit der Messgeräte. Das liegt an der Beschaffenheit der Risse, durch die bereits Unsicherheiten beim Positionieren der Messgeräte unvermeidlich sind. So hat es wenig Sinn, Rissbreiten besonders genau messen zu wollen. Die real erreichbare hohe Genauigkeit betrifft zunächst nur eine Messstelle. Wird an mehreren Messstellen gemessen, um einen Mittelwert zu bestimmen, nimmt die Genauigkeit wieder ab. Die „genaue“ Messung ist deshalb nicht sinnvoll, weil sie nicht mit irgendwelchen ebenso genauen Werten verglichen werden kann. In [16] wurde aus dieser Situation geschlossen, dass eine Messunsicherheit von 0,05 mm für Rissbreitenmessungen allen Anforderungen genügt.

In Abbildung 6 wurde ein einfaches Papiermodell eines Trennrisses fotografiert. Es besteht aus etwas dickerem Papier, das vorsichtig zerrissen wurde. Danach wurden beide Teile in Form eines Trennrisses aneinandergelegt und fotografiert. Zu sehen ist von links nach rechts in wachsender Vergrößerung, dass an beiden Rissufern ein unregelmäßig geformter weißer Rand entstanden ist, der die Grenze zwischen dem unveränderten Beton (blau) und der Auflockerungszone (weiß) bildet. An der anderen Seite der Auflockerungszone sind die Spuren des zerrissenen Materials zu erkennen. Sie ragen in den leeren Risspalt hinein.

Die größte Vergrößerungsstufe rechts zeigt, dass zwei „Rissbreiten“ entstanden sind: die eigentliche Rissbreite als Spaltbreite innen und die Rissuferverschiebung als Verschiebungsweg der äußeren Rissränder.

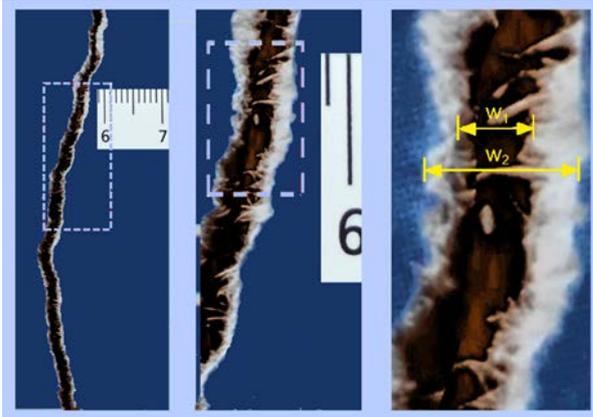


Abbildung 6 modellhafte Darstellung von Spaltbreite und Rissuferverschiebung eines Risses, nach [19]

Beide Rissmodifikationen sind messtechnisch nachweisbar, aber in Betonbauteilen optisch wegen der geringen Größe der Auflockerungszone und der einheitlichen grauen Betonfarbe nicht zu unterscheiden. Die Auflockerungszone ist sehr unregelmäßig geformt. Ihre mittlere Dicke beträgt meist 0,03 mm bis 0,10 mm, gelegentlich sind auch größere Werte messbar. Sie liegt nicht symmetrisch zwischen den äußeren Rissrändern, was auch an dem Modell zu sehen ist. Die Auflockerungszone verursacht die wenig bekannte Tatsache, dass an jedem Riss zwei messbare Rissbreiten existieren:

- die Rissbreite als lichte Breite des Risspalt (w₁ in Abbildung 6)
- die Rissuferverschiebung als Weg der beiden Rissufer bei der Rissöffnung (w₂ in Abbildung 6).

Die Rissuferverschiebung wird mit einem Wegmessgerät gemessen, die Rissbreite mit einem optischen Messgerät. Die Rissbreite kann sowohl am Bauteil als auch am Versuchskörper im Labor jederzeit gemessen werden.

Die Rissuferverschiebung ist nur messbar, wenn der Riss entsteht und das Messgerät vorher am ungerissenen Beton angebracht wird. Die Rissentstehung (Zugbruch) muss in der Messung mit erfasst werden. Bei Untersuchungen zum Durchflussverhalten von Trennrissen erfolgt die Rissbreitenmessung überwiegend durch Messung der Rissuferverschiebung.

In der folgenden Tabelle sind die beiden grundsätzlichen Messverfahren vergleichend gegenübergestellt.

Tabelle 4 Prinzipien der Rissbreitenmessung in Erweiterung von [14]

	Optische Messverfahren	Wegmessverfahren
Messgeräte	Vergleichsmaßstab, Rissmesslupe Kamera für fotografische Methoden	Setzdehnungsmesser, Messung mit Messuhren, induktive Wegaufnehmer
Beschreibung	Gemessen wird die lichte Breite des Risspaltens durch einmaliges Anlegen des Messgerätes oder durch ein Foto, das später am Computer ausgewertet wird. Im einfachsten Fall wird ein Vergleichsmaßstab mit fotografiert und am Bildschirm als Messgerät benutzt.	An der ungerissenen Betonfläche werden zwei Messmarken fest angebracht, zwischen denen der Riss entstehen muss. Um sicher zu gehen, soll im Beton eine Sollrissstelle eingebaut werden. Entsteht der Riss nicht zwischen den Messmarken, kann nicht gemessen werden.
Vorteile	Einfache Handhabung, kleine Messgeräte, bis auf gelegentlich eine Lichtquelle keine weitere Technik notwendig	Hohe Messgenauigkeit sichert eine geringe Streuung der Messwerte Messwert ist als Regelgröße bei Bauteilversuchen verwendbar
Nachteile	Mit wachsender Vergrößerung wird das Bildfeld einer Messlupe kleiner, was Anschlussmessungen erschwert, wenn die gleiche Messstelle gesucht werden muss. Empfindlich gegenüber zu wenig Licht, kann mit mobiler Lichtquelle kompensiert werden.	Die Geräte sind empfindlicher als optische Messgeräte. Vor Ort unbequem zu handhaben. Bei induktiven Wegaufnehmern sollte die Infrastruktur eines Labors verfügbar sein. Die Bedienung erfordert geschultes Personal. Die Geräte sind nach den gültigen Regelungen regelmäßig zu kalibrieren.

Die im Rahmen der Durchflussversuche in den einzelnen Forschungsvorhaben [1] - [3] angegebenen Rissbreiten basieren ausschließlich auf Verschiebungsmessungen mit Rissmessuhren. Bei den Verschiebungsmessungen wird für den gleichen Riss die gemessene Rissbreite größer als bei der optischen Messung ausgewiesen. Der vergleichsweise an einem Bauwerk optisch vermessene Riss hätte demnach immer eine geringere Breite.

Die Differenz zwischen Lupen- und Wegmessung liegt je nach Rissbreite zwischen 0,05 mm und 0,1 mm. Die folgende Abbildung verdeutlicht diesen Zusammenhang.



Abbildung 7 optische Rissmessung und Verschiebungsmessung mit Messuhr, schematisch

Neben der Rissbreite haben auch die Rauigkeit der Rissflächen und die Fließgeschwindigkeit (Druckdifferenz zwischen Flüssigkeits- und Luftseite) und die Verfügbarkeit von Partikeln Einfluss auf Durchfluss- und Dichtungsverhalten.

Die Rissbreite ist bei Wasser, in dem die Dichtungspartikel erst entstehen müssen, der bestimmende Faktor. Sie bestimmt die Größe des Reaktionsraumes „Rissvolumen“, in dem als Voraussetzung für das Entstehen und das Wachstum von Calcitkristallen eine übersättigte Lösung von Calciumcarbonat entstehen muss. Ist das in einem zu großen Rissvolumen nicht möglich, dann ist auch keine Selbstdichtung möglich, auch wenn alle anderen Bedingungen günstig sind. Anders ist das bei Flüssigkeiten, bei denen die Partikel nicht erst entstehen müssen, sondern bei denen sie in den Riss hineintransportiert werden. Dabei spielen das Rissvolumen und damit die Rissbreite eine weniger bedeutende Rolle. Wichtiger ist wahrscheinlich die Fließgeschwindigkeit. Einerseits muss sie so groß sein, dass es nicht zur schnellen Sedimentation kommt und andererseits darf sie nicht so groß sein, dass die Partikel wieder ausgeschwemmt werden.

Einen weiteren Einflussfaktor auf das Durchfluss- und Dichtungsverhalten stellt die Risslänge dar. Die Verteilung der Flüssigkeitspfade im Riss wird von der Auflockerungszone mit ihren Zufälligkeiten bestimmt. Bei längeren Rissen wird es Zonen geben, bei denen es Flüssigkeitspfade gibt und solche, die vergleichsweise undurchlässig sind. Die Wahrscheinlichkeit, beide Arten von Rissabschnitten in einem Riss zu haben, wächst mit der Risslänge. Sehr kurze Risse werden von beiden Arten der Risse nur immer eine haben. Das bedeutet, dass sich unter realen Bedingungen durchlässige Rissabschnitte mit weniger durchlässigen in einem Riss abwechseln. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich lange Risse selbst abdichten, ist unter sonst gleichen Bedingungen damit geringer als bei kurzen Rissen.

3 Abgeschlossene Forschungsvorhaben

3.1 Durchflussverhalten von Trennrissen

3.1.1 Versuchsmethodik

Wesentlicher Bestandteil der bereits abgeschlossenen Forschungsvorhaben [1], [2], [3] waren experimentelle Untersuchungen zum Durchflussverhalten von Lagerflüssigkeiten in Behältern nach DIN 11622 durch Trennrisse. Ausgangsthese war die Vermutung, dass die in den Lagerflüssigkeiten vorhandenen Feststoffe analog dem „Selbstheilungsverhalten“ von wasserundurchlässigem Beton vorhandene Trennrisse mit zunehmender Zeit zusetzen. Zur Überprüfung dieser These wurden anwendungstechnisch orientierte Versuche durchgeführt, bei denen die Durchlässigkeit von Trennrissen in Abhängigkeit von der Rissbreite, der Flüssigkeitsdruckhöhe, der Beaufschlagungsdauer und mit unterschiedlichen allgemein wassergefährdenden Flüssigkeiten untersucht wurde. Für alle Untersuchungen wurden Betonprüfkörper verwendet, die hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und Abmessungen den Anforderungen der DIN 11622 entsprechen. Der Beton genügt den Anforderungen an die Expositionsklassen XA1 bzw. XA3, XF3 und XC4. In der folgenden Tabelle sind die für die Versuche verwendeten Betone zusammengestellt.

Tabelle 5 Betonzusammensetzung der verwendeten Rissprüfkörper

Quellen	[1]	[2]	[3]	[3]
Expositionsklassen	C35/45, XA3, XF3 und XC4	C35/45, XA3, XF3 und XC4,	C25/30, XA1, XF1, XC4	C30/37, XA3, XF4, XC4
Bestandteile				
CEM I 42,5 R / CEM I 32,5 R	320 kg/m ³	330 kg/m ³	330 kg/m ³	360 kg/m ³
Steinkohlenflugasche	70 kg/m ³	33 kg/m ³	33 kg/m ³	---
Zugabewasser	139 kg/m ³	146 kg/m ³	166 kg/m ³	162 kg/m ³
Fließmittel	1,5 M.-% v. Z. FK43	0,5 M.-% v. Z. FM 30	0,1 M.-% v. Z. FM30 (BASF SE)	0,31 M.-% v. Z. LZ 85 (Mapei S.p.A)
Luftporenbildner	---	---	---	0,37 M.-% ; LP 4-2 (Mapei S.p.A.)
w/z-Wert	0,43	0,50	0,60	0,45
w/z _{eq} -Wert	0,40	0,48	0,58	0,43
Gesteinskörnung (Sieblinie A/B 16) quarzitisches runde Körnung		1.806,9 kg/m ³	1.725 kg/m ³	1.624 kg/m ³

Quellen	[1]	[2]	[3]	[3]
Expositionsklassen	C35/45, XA3, XF3 und XC4	C35/45, XA3, XF3 und XC4,	C25/30, XF1, XC4	XA1, C30/37, XA3, XF4, XC4
Bestandteile				
Körnung 0/1	---	---	---	142 kg/m ³
Körnung 0/2		731,1 kg/m ³	698 kg/m ³	494 kg/m ³
Körnung 2/8		540,0 kg/m ³	515 kg/m ³	528 kg/m ³
Körnung 8/16		535,8 kg/m ³	511 kg/m ³	600 kg/m ³
Druckfestigkeit nach 28 Tagen (Mittelwert)			36,7 N/mm ²	43,9 N/mm ²

Alle Untersuchungen zum Durchflussverhalten von Trennrissen erfolgten an Rissprüfkörpern des gleichen Aufbaus mit Gesamtabmessungen von 500 x 400 x 200 [mm]. Aus der gewählten Risseinstellung über Spezialkeile ergibt sich die flüssigkeitsdurchströmte Rissgeometrie mit einer Risslänge von 200 mm und einer Risstiefe von ebenfalls 200 mm. Eine schematische Darstellung der Geometrie einer Prüfkörperhälfte zeigt Abbildung 8. Die Einstellung und Kontrolle der Rissbreite erfolgte in allen Versuchen über Verschiebungsmessungen, siehe Abs. 2.2.4. Sofern nicht aus Gründen sehr starker Durchlässigkeit reduziert werden musste, wurden alle Versuche planmäßig mit einer Flüssigkeitsdruckhöhe von 1 bar, entsprechend den in landwirtschaftlichen Bauwerken üblichen maximalen Flüssigkeitsfüllständen von 10 m durchgeführt. Die überprüften Ausgangsrissbreiten lagen überwiegend zwischen $w = 0,2$ mm und $w = 0,3$ mm.

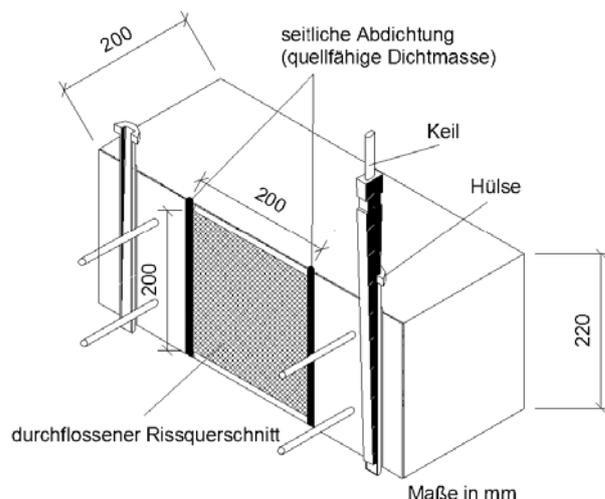


Abbildung 8 Schematische Darstellung des Rissquerschnittes

Zur Nachbildung von Füll- und Entleerungsvorgängen und ihrer Auswirkungen auf das Selbst-dichtungsverhalten durchflossener Trennrisse erfolgte die Flüssigkeitsbeaufschlagung in der überwiegenden Anzahl der Versuche zyklisch. Einer siebentägigen Beaufschlagung mit Flüssigkeitsdruck folgte jeweils eine 14 - tägige Trocknungsphase. Insgesamt bestand eine Prüfserie aus je drei Intervallen von Flüssigkeitsbeaufschlagung und je zwei Trocknungsphasen, was zu einer Gesamtprüfdauer von 49 Tagen führte. Zusätzlich wurde exemplarisch das Verhalten bei einer kontinuierlichen Beaufschlagung über einen Gesamtprüfzeitraum von 180 Tagen untersucht.

Die Überprüfung erfolgte sowohl mit realen Flüssigkeiten – Gülle, Gärsubstraten und Gärresten - die aus landwirtschaftlichen Betrieben der Umgebung bezogen wurden, als auch mit den vom DIBt festgelegten Referenzflüssigkeiten gemäß DIBt Medienliste, Liste 7 [36]. Die folgende Zusammenstellung ordnet die Prüfflüssigkeiten den Grundanwendungen zu.

Tabelle 6 Zusammensetzungen verwendeter Prüfflüssigkeiten [1] bis [3]

Prüfflüssigkeit	Zusammensetzung	Einordnung / Bezeichnungen	Herkunft
Dünngülle	Rinder- oder Schweinegülle, i.d.R. mit reduziertem Feststoffgehalt (Trockensubstanz)	Wirtschaftsdünger oder Gärsubstrat	landwirtschaftliche Anlage allgemein
Gärsubstrat	Frischgülle (Schwein), Maissilage, Hirsesilage, Grassilage, Getreideschrot, Wasser	Gärsubstrat	Biogasanlage
Gärrest	Frischgülle (Schwein), Maissilage, Hirsesilage, Grassilage, Getreideschrot, Wasser nach der Vergärung	Gärrest	Biogasanlage
Silagesickersaft	aus Mais-, Hirse-, Grassilage mit Niederschlagswasser	Silagesickersaft	Fahrsilo
Referenz Gülle	Basische Diammoniumlösung	JGS 2, JG bzw. MG 1	[36]
Referenz Silagesickersaft	wässrige Lösung einer Gärsäure-Mischung	JGS1; S bzw. MG 2	[36]

In der folgenden Tabelle sind alle bislang im Rahmen von Forschungsvorhaben durchgeführten Versuche mit den jeweils gewählten Randbedingungen zusammengestellt.

Tabelle 7 Zusammenstellung Durchflussversuche

Prüf- körper Nr.	Prüfflüssigkeiten	Feststoff- gehalt [%]	Riss- breite [mm]	Prüf- druck [bar]	Dauer
1	Wasser	0	0,2	0,5	49 d , 3 Zyklen
2	Referenz Gülle	0	0,2	0,5	49 d , 3 Zyklen
3	Rohgülle 7 % Feststoffgehalt	7	0,2	1,0	49 d , 3 Zyklen
4	Dünngülle 5 % Feststoffgehalt	5	0,2	1,0	49 d , 3 Zyklen
5	Dünngülle 5 % Feststoffgehalt	5	0,2	0,5	49 d , 3 Zyklen
6	Dünngülle 2 % Feststoffgehalt (minimaler Feststoffgehalt)	2	0,2 – 0,3	1,0	49 d , 3 Zyklen
7	Dünngülle 2 % Feststoffgehalt	2	0,3 – 0,4	1,0	49 d , 3 Zyklen
8	Referenz Silagesickersaft	0	0,2	0,5	49 d , 3 Zyklen
9	JGS 2 mit 2 % Feststoffzumischung - Fasermischung mit inerten Fasern unterschiedlicher Geometrie (Größenverteilung wie Rindergülle)	2	0,2	0,5	49 d , 3 Zyklen
10	JGS 2 mit 2 % Feststoffzumischung - mit organischer Zumischung einheitlicher Teilchengröße (gemahlene Tierfutter)	2	0,2	0,5	49 d , 3 Zyklen
11	Gärs substrat (Schweinegülle u.a.) 2 % TS + 25 % Silagesickersaft	2 ¹⁾	0,2	1,0	49 d , 3 Zyklen
12	Referenz MG 1 (+ 2 % TS) 25 % Referenz S	2	0,2	1,0	49 d , 3 Zyklen
13	Referenz MG 1 (+ 2 % TS) 10 % Referenz S	2	0,2	1,0	49 d , 3 Zyklen
14	Gärs substrat (Schweinegülle u.a.) 2 % TS + 25 % Silagesickersaft	2 ¹⁾	0,3	1,0	49 d , 3 Zyklen

Prüf- körper Nr.	Prüfflüssigkeiten	Feststoff- gehalt [%]	Riss- breite [mm]	Prüf- druck [bar]	Dauer
15	Gärsubstrat (Schweinegülle u.a.) 2 % TS + 10 % Silagesickersaft	2 ¹⁾	0,2	1,0	49 d , 3 Zyklen
16	Gärsubstrat (Schweinegülle u.a.) 2 % TS + 10 % Silagesickersaft	2 ¹⁾	0,3	1,0	49 d , 3 Zyklen
17	100 % Gärrest	2,9	0,3	1,0	49 d , 3 Zyklen
18	100 % Gärrest	2,9	0,3	1,0	180 d
19	Gärsubstrat (2 % TS) + 10 % Silagesickersaft	2	0,3	1,0	49 d , 3 Zyklen
20	Gärsubstrat (2 % TS) + 10 % Silagesickersaft	2	0,3	1,0	180 d
21	100 % Silagesickersaft	2,1 ²⁾	0,3	1,0	49 d , 3 Zyklen
22	100 % Silagesickersaft	2,1 ²⁾	0,3	1,0	90 d

1) Feststoffgehalt von Silagesickersaft auf Grund des sehr hohen Feinkornanteils < 0,062 mm nicht zusätzlich berücksichtigt

2) Nur zur Information, wird auf Grund des sehr hohen Feinkornanteils bei der Bewertung nicht berücksichtigt

Bei der Bearbeitung des ersten Forschungsvorhabens [1] sind darüber hinausgehend in Nachbildung von Füll- und Entleerungsprozessen Rissbreitenänderungen in die Untersuchungen einbezogen worden. Rissbreitenänderungen von $\Delta w = 0,1$ mm, die bei realen Bauwerken in Abhängigkeit vom Füllstand bzw. als Folge von Temperaturdifferenzen auftreten, wurden in den entsprechenden Versuchen sowohl bei Rissen mit einer Ausgangsrissbreite von $w = 0,2$ mm durch Aufweitung von $w = 0,2$ auf $w = 0,3$ mm als auch bei Rissen mit einer Ausgangsrissbreite von $w = 0,3$ mm durch Aufweitung von $w = 0,3$ mm auf $w = 0,4$ mm nachgestellt.

3.1.2 Ergebnisse

In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse der Durchflussversuche, die im Rahmen vergleichbarer experimenteller Untersuchungen in den Vorhaben [1], [2] und [3] durchgeführt wurden, zusammengefasst.

Tabelle 8 Ergebnisse von Durchflussversuchen an Trennrissen

PK	Flüssigkeit	Rissbreite [mm]	Druck [bar]	Austritt	Mengen / Beobachtungen
1	Wasser	0,2	0,5	ja	Anfangsdurchfluss je Zyklus: 41,2 l/h*m; 2 l/h*m und 1,25 l/h*m mit abnehmender Leckrate je Zyklus
2	Referenz MG 1	0,2	0,5	ja	Anfangsdurchfluss je Zyklus: 83 l/h*m; 12,5 l/h*m und 8,5 l/h*m mit abnehmender Leckrate je Zyklus
3	Rohgülle mit 7 % FS	0,2	1,0	nein	Feuchtefront: max. 170 mm Ablagerungen: 17 – 65 mm tief
4	Dünngülle mit 5 % FS	0,2	1,0	nein	Feuchtefront: max. 160 mm Ablagerungen: 50 - 160 mm tief
5	Dünngülle mit 5 % FS	0,2 – 0,3	0,5	nein	Feuchtefront lokal begrenzt max. 200 mm tief, Ablagerungen mit abnehmender Intensität bis max. 200 mm tief
5.1	Dünngülle mit 5 % FS	0,6	0,5	ja	tropfend
6	Dünngülle mit 2 % FS	0,2 – 0,3	1,0	nein	Feuchtefront max. 200 mm tief; Ablagerungen mit abnehmender Intensität bis max. 200 mm tief
6.1	Dünngülle mit 2 % FS	0,6	1,0	ja	tropfend
7	Dünngülle mit 2 % FS	0,3 – 0,4	1,0	nein	Feuchtefront max. 200 mm tief Ablagerungen mit abnehmender Intensität von 45 mm bis max. 200 mm tief
8	Referenz MG 2	0,2	0,5	ja	Anfangsdurchfluss je Zyklus: 100 l/h*m; 78 l/h*m und 33 l/h*m mit zunehmender Leckrate je Zyklus Ausbildung Schädigungsfront, ausgeprägt bis 4 mm Eindringtiefe
9	Referenz MG1 mit 2 % FS (inerte Fasern)	0,2	0,5	ja	Anfangsdurchfluss je Zyklus: 16 l/h*m; 1,2 l/h*m und 1,6 l/h*m mit abnehmender Leckrate je Zyklus Ablagerungen im oberen Bereich bis ca. 40 mm tief

PK	Flüssigkeit	Rissbreite [mm]	Druck [bar]	Austritt	Mengen / Beobachtungen
10	Referenz MG1 mit 2% FS (organisch)	0,2	0,5	Ja, bis zum 3. Zyklus	Anfangsdurchfluss je Zyklus: 18 l/h*m; 8 l/h*m und 0,1 l/h*m mit abnehmender Leckrate je Zyklus bis zur Rissabdichtung durch quellende Bestandteile Ablagerungen im oberen Bereich bis ca. 40 mm tief
10.1	Referenz MG 1 mit 2 % FS	0,3	0,5	Ja, kurzzeitig	Anfangsdurchfluss ca. 1 l/h*m mit abnehmender Tendenz bis zum Stillstand
10.2	Referenz MG 1 mit 2 % FS	0,4	0,5	ja	konstanter Durchfluss ca. 1,2 l/h
11	Gärsubstrat mit 2 % TS + 25 % SiSa	0,2	1,0	nein	Feuchtefront max. 175 mm tief Ablagerungen mit abnehmender Intensität zwischen 37 mm bis max. 138 mm tief
12	Referenz MG 1 mit 2 % TS + 25 % Referenz MG 2	0,2	1,0	Ja, im 1. Zyklus	Anfangsdurchfluss 1. Zyklus: 4 l/h*m mit abnehmender Tendenz bis zum Stillstand; Ablagerungen, Zusetzen des Rissquerschnittes in den oberen 13 mm, Ausbildung Schädigungsfront durchschnittlich 120 mm tief
13	Referenz MG 1 mit 2 % TS) + 10 % Referenz MG 2	0,2	1,0	ja	Anfangsdurchfluss je Zyklus: 1 l/h*m; 0,1 l/h*m und 0,075 l/h*m mit abnehmender Leckrate je Zyklus Ablagerungen in den oberen 22 mm
14	Gärsubstrat mit 2 % TS + 25 % SiSa	0,3	1,0	Ja, im 1. Zyklus	Feuchtefront durchgängig bis 200 mm, Anfangsdurchfluss 1. Zyklus: 0,9 l/h*m mit abnehmender Tendenz bis zum Stillstand; Verfärbungen und flächige Ablagerungen bis maximal 50 mm von oben, Restquerschnitt mit bereichsweise Faserablagerungen
15	Gärsubstrat mit 2 % TS + 10 % SiSa	0,2	1,0	n. m.	Feuchtefront durchgängig bis 200 mm, Verfärbungen und Partikelablagerungen bis maximal 41 mm tief,
16	Gärsubstrat mit 2 % TS + 10 % SiSa	0,3	1,0	Ja, gering, im 1. Zyklus	Feuchtefront lokal begrenzt bis 200 mm, Anfangsdurchfluss 1. Zyklus: 0,03 l/h*m nur kurzfristig; Verfärbungen und flächige Ablagerungen bis maximal 37 mm tief,

PK	Flüssigkeit	Rissbreite [mm]	Druck [bar]	Austritt	Mengen / Beobachtungen
17	100 % Gärrest	0,3	1,0	n. m.	Feuchtefront bis 200 mm,; Verfärbungen und flächige Ablagerungen bis maximal 160 mm tief,
18	100 % Gärrest	0,3	1,0	n. m.	Feuchtefront bis 200 mm, Verfärbungen und flächige Ablagerungen durchgehend
19	Gärsubstrat mit 2 % TS + 10 % SiSa	0,3	1,0	Ja, im 1. Zyklus	Feuchtefront lokal begrenzt bis 200 mm, Anfangsdurchfluss 1. Zyklus: 0,3 l/h*m, kurzfristig; Verfärbungen und flächige Ablagerungen bis maximal 170 mm tief
20	Gärsubstrat mit 2 % TS + 10 % SiSa	0,3	1,0	Ja	Feuchtefront bis 200 mm, Anfangsdurchfluss 1. Zyklus: 0,12 l/h*m, kurzfristig; Verfärbungen und flächige Ablagerungen von 60 mm bis 200 mm tief
21	100 % SiSa	0,3	1,0	ja	Anfangsdurchfluss in Zyklus 1 und 2: 2 l/h*m bzw. 0,2 l/h*m; dann 0 Ablagerungen in den oberen 22 mm
22	100 % SiSa	0,3	1,0	n. m.	Feuchtefront bis 200 mm, Verfärbungen und flächige Ablagerungen von 30 bis lokal 180 mm

TS	Trockensubstanz
MG 1	Referenzflüssigkeit nach Medienliste [36], für Jauche, Gülle
MG 2	Referenzflüssigkeit nach Medienliste [36], für Silagesickersaft
GS	Gärsubstrat
GR	Gärrest
SiSa	Silagesickersaft
n. m.	nicht messbar

In der vorangehenden Tabelle sind die Versuche farblich hinterlegt, bei denen ein messbarer Flüssigkeitsaustritt stattfand oder an der Rissunterseite eine Durchfeuchtung, Verfärbung oder Tropfenbildungen beobachtet wurden. Bei insgesamt 26 Versuchen, die ausgewertet wurden, kam es nur bei 3 Versuchen nicht zum lokalen Durchdringen innerhalb der für die Versuche gewählten Risslänge von 200 mm und der einer durchschnittlichen Behälterwand entsprechenden Risstiefe (Wanddicke) von 200 mm. In allen anderen Versuchen wurden mindestens eine dauerhafte Durchfeuchtung der Rissflanken auf der gesamten Risstiefe oder austretende Flüssigkeiten in unterschiedlichem Umfang festgestellt. Risse mit zeitweiligem Durchfluss (außer bei Beaufschlagung mit Referenzmedien ohne Feststoffgehalt) zeigten relativ rasch eine Reduzierung des Durchflusses, der im 3. Zyklus meist gegen 0 strebte.

3.2 Beeinflussung der Dauerhaftigkeit durch Lagerflüssigkeiten

3.2.1 Versuchsmethodik

Parallel zu den in [1] bis [3] beschriebenen Durchflussversuchen wurde bei den meisten Prüfkörpern nach Abschluss der Beaufschlagung sowohl durch reale landwirtschaftliche Flüssigkeiten als auch durch Referenzflüssigkeiten an Bruch- oder Schnittflächen visuell und zum Teil mit Hilfe der Mikroskopie untersucht, in welchem Umfang es zur Betonschädigung in Form von Bindemittelveränderungen, Lösen von Bindemittel, Lockerung der Gesteinskörnung in der Matrix, Treiberscheinungen, Verfärbungen oder sonstige Strukturänderungen oder zum Verlust der Alkalität gekommen ist. Zur Untersuchung der Rissflächen und der beaufschlagten Betonoberflächen wurden aus den Prüfkörpern Betonproben herausgeschnitten. Dies erfolgte jeweils zeitnah nach dem Spalten der Prüfkörper, um Veränderungen durch längere Luftlagerung und eine damit möglicherweise einhergehende Karbonatisierung auszuschließen. An jeder Betonprobe wurde die Rissfläche und die durch die Prüfflüssigkeit beaufschlagte, geschaltete Betonoberfläche der Prüfkörper untersucht. Zur Anfertigung der dafür notwendigen Anschliffe wurden die Proben hälftig geteilt.

Zusätzlich wurde an den Schliffproben, ebenso wie an den frischen Prüfkörperbruchflächen, die Umsetzungstiefe unter Verwendung der pH-Wert Indikatoren Phenolphthalein bzw. Thymolphthalein bestimmt. Der Farbumschlag (magenta bei Phenolphthalein, blau bei Thymolphthalein) stellt den Bereich dar, der nicht umgesetzt ist, d.h. noch über eine ausreichende Alkalität verfügt, um den Bewehrungsstahl zu schützen bzw. die Passivierung aufrecht zu erhalten. Dazu wurden in Einzelfällen auch weitere Verfahren eingesetzt, mit denen Umwandlungsprozesse sichtbar gemacht werden können. Zum Einsatz kamen die in Tabelle 9 aufgeführten Verfahren.

Tabelle 9 Untersuchungsverfahren aus [3]

Verfahren	Beschreibung / Erläuterung
Lichtmikroskopie	Zur optischen Darstellung der Betonstruktur und eventueller Schädigungen wurden Teilproben, die aus Gesamtproben vorher herausgeschnitten wurden, mittels des Auflichtmikroskops „VX100 X“ des Herstellers Olympus mikroskopiert
Rasterelektronenmikroskopie (REM) mit energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX)	Die betonschädigende Wirkung von landwirtschaftlichen Flüssigkeiten wurde unter Verwendung von REM+EDX untersucht. Zum Einsatz kam ein Gerät mit der Bezeichnung LEO des Herstellers Zeiss. Hierfür wurden die Teilproben evakuiert, mit Kohlenstoff bedampft und unter Hochvakuum untersucht.
Röntgendiffraktometrie (XRD)	Neben Aussagen zur Veränderung der chemischen Zusammensetzung (s. REM+EDX) wurden röntgenographische Untersuchungen („D8“, Bruker) auf den Oberflächen der beaufschlagten Betonproben (Betonproben nach Eindringversuch) zur Klärung des sich ändernden Phasenbestandes orts aufgelöst durchgeführt. Die Untersuchungen dienen der Klärung, welche Flüssigkeiten Änderungen des Phasenbestandes und somit der Betonleistungsfähigkeit verursachen

Im Zusammenhang mit der Bearbeitung des Vorhabens [3] wurden auch das Eindringverhalten und die Schädigungstiefe des Betons unter der Einwirkung von ausgewählten Flüssigkeiten in Abhängigkeit von Zeitdauer und Betoneigenschaften untersucht. Die Ergebnisse werden ebenfalls mit in die zusammenfassende Bewertung einbezogen.

3.2.2 Ergebnisse experimenteller Untersuchungen

In der folgenden Tabelle sind alle Untersuchungen im Zusammenhang mit der Beurteilung des Umsetzungs-, Eindring- und / oder Schädigungsverhaltens von gerissenem und ungerissenem Beton zusammengestellt, die inzwischen aus [1] - [3] vorliegen. Die letzte Spalte enthält, sofern ermittelt, Zahlenangaben zur Umsetzungstiefe nach beendeter Beaufschlagung, die den einzelnen Berichten entnommen worden sind. Für die Bewertung wurden die Werte vermittelt, bei denen die Maximalwertmessung an Gesteinskörnungen erfolgte.

Tabelle 10 Untersuchungen zum Verhalten von Beton

Prüfkörper Nr.	Beton	Prüfflüssigkeit	Beaufschlagungsdauer	Umsetzungstiefen Nachweis mit Phenolphthalein, mikroskopisch oder EDX/RDX
1	2013 XA 3	Wasser	49 d , 3 Zyklen	Nicht bestimmt
2	2013 XA 3	MG 1	49 d , 3 Zyklen	Nicht bestimmt
3	2013 XA 3	Rohgülle 7 % Feststoffgehalt	49 d , 3 Zyklen	Max. 0,44 mm Oberfläche max. 0,15 mm Riss
4	2013 XA 3	Dünngülle 5 % Feststoffgehalt	49 d , 3 Zyklen	Max. 0,3 mm Oberfläche max. 0,3 mm Riss
5	2013 XA 3	Dünngülle 2 % Feststoffgehalt	4. Zyklus	Max. 0,3 mm Oberfläche max. 0,37 mm Riss
6	2013 XA 3	Dünngülle 2 % Feststoffgehalt	49 d , 3 Zyklen	Max. 0,41 mm Oberfläche max. 0,62 mm Riss
8	2013 XA 3	Gärsäuremischung (Referenz) MG 2	4. Zyklus	Max. 1 mm Oberfläche max. 0,2 mm Riss
10	2013 XA 3	MG 1 mit org. Feinbestandteilen	49 d , 3 Zyklen	Max. 1,52 mm Oberfläche max. 3,7 mm Riss
1	2015 XA1, XF3, XC4	Gärs substrat (Schweinegülle u.a.) 2 % TS + 25 % SiSa	49 d , 3 Zyklen	Oberseite 0,76 – 2,18 mm Rissfläche 0 – 1,57 mm
2	2015 XA1, XF3, XC4	MG 1 mit 2 % TS und 25 % MG 2	49 d , 3 Zyklen	Oberseite 1,19 – 2,44 mm Rissfläche 0 – 1,97 mm

Prüf- körper Nr.	Beton	Prüfflüssigkeit	Beaufschla- gungsdauer	Umsetzungstiefen Nachweis mit Phenolphthalein, mikro- skopisch oder EDX/RDX
3	2015 XA1, XF3, XC4	MG 1 mit 2 % TS und 10 % MG 2	49 d , 3 Zyklen	Oberseite 1,33 – 3,45 mm Rissfläche 1,31 – 11,03 mm
4	2015 XA1, XF3, XC4	Gärsubstrat (Schweinegülle u.a.) 2 % TS + 25 % SiSa	49 d , 3 Zyklen	Oberseite 2,74 – 5,78 mm Rissfläche 0 – 7,73 mm
5	2015 XA1, XF3, XC4	Gärsubstrat (Schweinegülle u.a.) 2 % TS + 10 % SiSa	49 d , 3 Zyklen	Oberseite 1,86 – 5,50 mm Rissfläche 0 – 2,24 mm
6	2015 XA1, XF3, XC4	Gärsubstrat (Schweinegülle u.a.) 2 % TS + 10 % SiSa	49 d , 3 Zyklen	Oberseite 2,25 – 4,01 mm Rissfläche 0 – 3,35 mm
1	2018 XA1	100 % Gärrest (2,9 % TS)	49 d , 3 Zyklen	Nicht bestimmt (RissPK)
2	2018 XA1	100 % Gärrest (2,9 % TS)	180 d	Nicht bestimmt (RissPK)
3	2018 XA1	Gärsubstrat (2 % TS) + 10 % SiSa	49 d, 3 Zyklen	Nicht bestimmt (RissPK)
4	2018 XA1	Gärsubstrat (2 % TS) + 10 % SiSa	180 d	Nicht bestimmt (RissPK)
5	2018 XA3	100 % SiSa	49 d, 3 Zyklen	Nicht bestimmt (RissPK)
6	2018 XA3	100 % SiSa	90 d	Nicht bestimmt (RissPK)
1	2018 XA1	100 % Gärrest (2,9 % TS)	90 d	Eindringverhalten ¹ Eindringtiefe 2 mm
2	2018 XA1	Gärsubstrat (2 % TS) + 10 % SiSa	90 d	Eindringverhalten ¹ Eindringtiefe 2 - 3 mm
3	2018 XA3	100 % SiSa	90 d	Eindringverhalten ¹ Eindringtiefe 2 - 5 mm
4	2018 XA3	100 % MG 2	90 d	Eindringverhalten ¹ Eindringtiefe 8 – 10 mm
1	2018 XA3	100 % SiSa	3, 28, 90 d	zeitabh. Schädigungstiefe ² Schädigungstiefe 3d: i.M. 0,34 mm Schädigungstiefe 28d i.M. 0,43 mm Schädigungstiefe 90d i.M. 1,22 mm

Prüf- körper Nr.	Beton	Prüfflüssigkeit	Beaufschla- gungsdauer	Umsetzungstiefen Nachweis mit Phenolphthalein, mikro- skopisch oder EDX/RDX
2	2018 XA3	100 % MG 2	3, 28, 90 d	zeitabh. Schädigungstiefe ² Schädigungstiefe 3 d i.M. 1,41 mm Schädigungstiefe 28 d i.M. 4,5 mm Schädigungstiefe 90 d i.M. 8,9 mm

- 1 Eindringversuch in Anlehnung an [52], Anhang A2
 2 Ermittlung Schädigungstiefe Versuch in Anlehnung an [52], Anhang A4
 TS Trockensubstanz
 MG 1 Referenzflüssigkeit nach Medienliste [36], für Jauche, Gülle
 MG 2 Referenzflüssigkeit nach Medienliste [36], für Silagesickersaft
 GS Gärsubstrat
 GR Gärrest
 SiSa Silagesickersaft

Die Einwirkung von Gülle, Gärsubstraten und Gärresten aus landwirtschaftlichen Anlagen ohne Zusatz von Silagesickersaft zeigte im Beobachtungszeitraum von 49 Tagen (21 Tage flüssigkeitsbeaufschlagt mit zwischenzeitlicher Trocknung) Umsetzungstiefen zwischen 0,15 mm und 0,62 mm bei den untersuchten XA 3 Betonen. Die vergleichsweise mit der Referenzflüssigkeit MG 1 durchgeführte Beaufschlagung ergab im gleichen Beobachtungszeitraum etwa die dreifachen Werte. In gleicher Weise führten die Untersuchungen mit XA1 – Betonen zu höheren Umsetzungstiefen bei allen Beaufschlagungen.



Abbildung 9 Detail Rissfläche Versuch Nr. 4 (2015) mit Ablagerungen [2]

Offensichtlich ist ein Beaufschlagungszeitraum von 3 x 7 Tagen ausreichend, um einen ersten Angriff der Flüssigkeiten auf die kalkhaltigen Betonbestandteile hervorzurufen. Neben der stärkeren betonschädigenden Wirkung bei höheren Anteilen des Silagesickersaftes spielt bei den für die Untersuchungen verwendeten Flüssigkeiten auch die stark variierende Zusammensetzung

eine Rolle bei den beobachteten Schädigungen. Der für jeden Versuchszyklus neu aus den Anlagen beschaffte Silagesickersaft wies unterschiedliche Feststoffgehalte und pH Werte zwischen pH 4 und pH 5,4 auf, was ebenfalls die Ergebnisse beeinflussen kann.

Die zusätzlich zu den Versuchen mit realen Lagerflüssigkeiten durchgeführten Versuche mit Referenzmedien gemäß [36] bestätigen die Annahme, dass für die untersuchten Zusammensetzungen kein direkt proportionaler Zusammenhang zwischen Anteil an Silagesickersaft und festgestellter Umsetzungstiefe besteht, siehe folgende Tabelle.

Tabelle 11 Umsetzungstiefe von XA 1 Betonen aus [2]

Beaufschlagungs- dauer [d]	MG 1 mit 2 % TS und 10 % MG 2	MG 1 mit 2 % TS und 25 % MG 2
	mittl. Schädigungs- tiefe [mm]	mittl. Schädigungs- tiefe [mm]
21	3,45 - 5 ¹	1,97 - 2,44

Den Einfluss wechselnder Zusammensetzung und Eigenschaften realer Silagesickersäfte gegenüber einer gleichbleibenden Zusammensetzung von Referenzflüssigkeiten verdeutlicht die folgende Tabelle, in der die mittleren Schädigungstiefen in Abhängigkeit von der Beaufschlagungszeit für eine reale Flüssigkeit und die entsprechende Referenzflüssigkeit gegenübergestellt sind. Die zugrunde liegenden Versuche basieren auf der DAfStb RILI [52]. Sie zeigen, dass reiner Silagesickersaft in der verwendeten, vermutlich wasserverdünnten Zusammensetzung, ein geringeres Schädigungspotential als die Referenzflüssigkeit aufweist.

Tabelle 12 Schädigungstiefe von XA 3 Betonen aus [3]

Beaufschlagungs- dauer [d]	Silagesickersaft	MG 2
	mittl. Schädigungs- tiefe [mm]	mittl. Schädigungs- tiefe [mm]
3	0,34	1,41
28	0,43	4,5
90	1,22	8,9

4 Datenerfassung an realen Lageranlagen

4.1 Zusammenstellung vorliegender Analysedaten

Im Rahmen der bereits durchgeführten Forschungsvorhaben sind Betreiber von Biogasanlagen sowie sonstige landwirtschaftliche Betriebe gebeten worden, Analysen zu gelagertem Wirtschaftsdünger bzw. zu Gärsubstraten zur Verfügung zu stellen. Die Bereitschaft zur Mitwirkung war und ist verhalten, so dass die folgende Zusammenstellung von Analysedaten relativ wenig neue Daten enthält. Interessant in diesem Zusammenhang ist die Auswertung einer Parteienanfrage an die Sachsen – Anhaltinische Landesregierung [29], die die Vielfalt möglicher Gärsubstratzusammensetzungen verdeutlicht.

Die meisten Anlagen verwerteten eigene Schweine- oder Rindergülle in unterschiedlich hohen Anteilen sowie Silage unterschiedlicher Art, einige wenige Betriebe kauften zu und / oder verwerteten sonstige (eigene) Gärsubstrate wie z.B. Abfälle aus der Ethanolherstellung, Zuckerrüben, Fettabscheiderrückstände oder machten nur allgemeine Angaben wie Biomasse nach BiomasseVO pflanzlich, NAWARO. Tabelle 13 enthält in Auswertung der Anfrage die Anteile der in den 38 Anlagen verwerteten Güllen und Silagen.

Tabelle 13 Hauptbestandteile von Gärsubstraten in Sachsen - Anhalt auf Basis von [29]

	Schweinegülle	Rindergülle	Gülle gesamt	Silage
Mengenanteil (Mittelwert)	43%	50%	57%	44%
Min. Anteil	11%	2%	11%	2%
Max. Anteil	82%	100%	100%	90%
Anteil an 38 Anlagen	37%	39%	76%	66%

Interessant in diesem Zusammenhang sind auch die Informationen zu den eingesetzten Silagen. In 25 Anlagen wird Maissilage verwendet, in 9 Anlagen Grassilage und in 7 Anlagen GPS (Ganzpflanzensilage von Getreidepflanzen). Für eine Anlage wird explizit die Zugabe von Sickersaft in Höhe von 2,1 % angegeben.

Die über den erfassten Querschnitt von 38 Anlagen, der bundesweit aus einer sicher noch viel größeren Vielfalt besteht, sehr unterschiedliche Zusammensetzung der Gärsubstrate führt zu sehr unterschiedlichen Inhaltsstoffen, wie die folgenden Zusammenstellungen zeigen.

Tabelle 14 fasst eine Auswahl von vorliegenden Analyseergebnissen, unterteilt in Minimum, Maximum, Mittelwert und Median zusammen, die zu Gärsubstraten aus Sachsen und Sachsen Anhalt vorliegen. Ausgewertet wurden Informationen zu unterschiedlichen Substraten aus den Jahren 2013 bis 2020. Die Mengenangaben beziehen sich auf alle ausgewerteten Analysen, während die Prozentangaben den jeweiligen Anteil für die konkreten Gärsubstrate gemittelt angeben, die in [1], [2], [3] für die experimentellen Untersuchungen zur Verfügung standen.

Tabelle 14 Auswertung Laboranalysen Gärsubstrate

Untersuchte Parameter	Einheit	MIN	MAX	Ø	MEDIAN
Trockensubstanz (TS)	kg/t	46,80	973,90	158,74	75,40
	%	2,70	10,50	5,65	5,20
organische Substanz (oS)	kg/t	36,30	841,20	131,58	59,00
	%	4,15	32,00	9,66	4,85
pH-Wert	-	6,20	9,10	7,81	7,95
Stickstoff gesamt (Nges)	kg/t	2,50	23,96	6,83	4,29
	%	0,30	2,10	0,78	0,54
Ammonium-Stickstoff (NH₄-N)	kg/t	0,62	6,31	3,50	3,27
	%	0,19	0,90	0,37	0,24

Untersuchte Parameter	Einheit	MIN	MAX	Ø	MEDIAN
Calcium (Ca)	kg/t	0,90	10,41	4,31	3,10
	%	0,21	2,10	0,57	0,28
Calciumoxid (CaO)	kg/t	1,27	14,57	6,04	4,34
Phosphor (P)	kg/t	0,47	6,10	1,97	1,50
	%	0,05	1,16	0,46	0,39
Phosphoroxid (P ₂ O ₆)	kg/t	1,09	14,03	4,33	1,93
Magnesium (Mg)	kg/t	0,40	4,08	1,40	0,70
	%	0,05	1,03	0,43	0,16
Magnesiumoxid (MgO)	kg/t	0,79	6,77	2,73	1,70
Kalium (K)	kg/t	1,41	29,16	7,19	3,10
	%	0,13	5,47	1,39	0,44
Kaliumoxid (K ₂ O)	kg/t	1,69	35,00	9,36	4,19
Schwefel (S)	kg/t	0,29	3,06	0,99	0,44
	%	0,05	0,62	0,31	0,28
Sulfat (SO ₄)	kg/t	1,11	9,17	3,81	2,23
Essigsäure	mg/kg	0,01	0,93	0,47	0,46
Propionsäure	mg/kg	0,02	0,36	0,07	0,04
Essigsäureäquivalent	mg/kg	0,16	1,11	0,55	0,51

In Tabelle 15 sind die vorliegenden Analysen zu den Inhaltsstoffen von Gärresten aus überwiegend den gleichen Anlagen zusammengestellt.

Tabelle 15 Auswertung vorliegender Laboranalysen zu Gärresten

untersuchter Parameter	Einheit	MIN	MAX	Ø	MEDIAN
Trockensubstanz (TS)	kg/t	47,90	62,70	55,12	54,55
	%	2,00	12,40	5,99	5,65
organische Substanz (oS)	kg/t	34,60	44,80	39,50	39,65
	%	3,07	4,48	3,96	4,34
pH-Wert	-	7,10	8,30	7,83	7,80
Stickstoff gesamt (Nges)	kg/t	3,21	7,10	4,29	3,97
	%	0,21	0,56	0,40	0,42

untersuchter Parameter	Einheit	MIN	MAX	Ø	MEDIAN
Ammonium-Stickstoff (NH₄-N)	kg/t	1,88	5,40	2,71	2,52
	%	0,15	0,27	0,22	0,23
Calcium (Ca)	kg/t	1,00	2,67	1,77	1,64
	%	0,48	0,53	0,50	0,50
Calciumoxid (CaO)	kg/t	1,40	4,90	2,82	2,49
Phosphor (P)	kg/t	0,47	0,81	0,60	0,57
	%	0,03	0,14	0,07	0,05
Phosphoroxid (P ₂ O ₆)	kg/t	1,07	1,86	1,46	1,45
Magnesium (Mg)	kg/t	0,15	1,63	0,77	0,58
	%	0,01	0,32	0,14	0,14
Magnesiumoxid (MgO)	kg/t	0,62	2,70	1,51	1,43
Kalium (K)	kg/t	0,13	4,60	2,80	3,10
	%	0,21	0,52	0,30	0,28
Kaliumoxid (K ₂ O)	kg/t	2,70	3,94	3,36	3,34
Schwefel (S)	kg/t	0,33	0,56	0,42	0,40
	%	0,04	0,14	0,09	0,09
Sulfat (SO ₄)	kg/t	1,00	1,46	1,19	1,14
Essigsäure	mg/kg	0,40	0,56	0,48	0,48
Propionsäure	mg/kg	0,02	0,02	0,02	0,02
Essigsäureäquivalent	mg/kg	0,40	0,58	0,49	0,49

Im Wesentlichen kommt es durch die Vergärung zu einer starken Reduzierung der organischen Substanz, einhergehend mit einer Verringerung der Trockensubstanz sowie einer moderaten Verringerung der einzelnen Inhaltstoffe, bei etwa gleichbleibender Säurebelastung. Die Ergebnisse decken sich in etwa mit den Angaben des DLG Merkblattes 397 – Gärreste im Ackerbau effizient nutzen [25]. Ähnliche Angaben macht auch die Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft innerhalb eines zwischen 2004 und 2012 bei 125 Biogasanlagen durchgeführten Monitoring [26].

In der folgenden Tabelle sind die vorliegenden Laboranalysen zur Zusammensetzung und wesentlicher Eigenschaften von Silagesickersaft zusammengefasst.

Tabelle 16 Laboranalysen zur Zusammensetzung von Silagesickersaft

Inhalt	ME	in kg Futter			
		min	max	mittelwert	median
Trockensubstrat	g	214	371	300,33	300
Rohasche	g	11	51	19,42	13
Rohprotein	g	19	51	27,50	26,5
Rohfaser	g	40	98	69,08	65
Rohfett	g	2	13	8,33	9
Stärke	g	17	145	93,50	116,5
pH-Wert		3,5	5,2	4,04	3,75
Ammoniak-Stickstoff	% des Ges-N	2,8	20	8,63	7,35
puRpr	% des Rpr	24	24	24,00	24
ADFom	g	81	101	90,75	90,5
pepsinlösl. Rohprotein	% des Rpr	26	46	34,73	32,2
ELOS	%	14,8	0	14,80	
Proteinlöslichkeit	% des Rpr	28,6	69,5	58,77	59,5
aNDFom	g	116	116	116,00	116
Zucker	g	0	62	15,60	0,2
HFT	ml/200mg	10	10	10,00	10

Interessant bei dieser Zusammenstellung sind die Angaben zum pH Wert der insgesamt 12 ausgewerteten Analysen. Der pH Wert beträgt im Minimum 3,5 und liegt durchschnittlich bei 4,04, was sich mit den für die bisherigen Untersuchungen verwendeten Flüssigkeiten deckt. Neben den Angaben zum pH - Wert und den Säurekonzentrationen sind auch die Angaben zu gelösten Anionen und Kationen im Gärsubstrat und –rest für die Bewertung des chemischen Angriffs auf den Beton von Interesse. In den Lagerflüssigkeiten können u. a. Magnesium- und Sulfationen in Größenordnungen auftreten, die Einfluss auf die Dauerhaftigkeit haben. Tabelle 17 stellt die Grenzwerte der Expositionsklassen für chemischen Angriff nach DIN 4030-1 [40] den durchschnittlichen und maximal auftretenden Magnesium- und Sulfationengehalten der stichprobenartig ausgewerteten Analysen aus [1] bis [4] gegenüber.

Tabelle 17 Gegenüberstellung Grenzwerte chemischer Angriff

Gelöstes Ion	Expositionsklassen bei chemischem Angriff gem. DIN 4030			Gärsubstrate aus Tabelle 14		Gärreste aus Tabelle 15	
	XA1	XA2	XA3	Ø	MAX	Ø	MAX
für betonangreifende Stoffe in [mg/l]							
Mg	> 300 ≤ 1000	> 1000 ≤ 3000	> 3000	1400	4080	770	1400
SO ₄	>200 ≤ 600	>600 ≤ 3000	> 3000 ≤ 6000	3810	9170	1190	1460

Die Gegenüberstellung zeigt, dass die Gärsubstrate Inhaltstoffe aufweisen (können), aus deren Größenordnung sich bei Bewertung des Betonangriffs gemäß DIN 4030 [41] für den Beton die Notwendigkeit von Beton mit Eigenschaften entsprechend der Expositionsklasse XA 3 ergibt, um den Dauerhaftigkeitsanforderungen zu genügen.

Bei der Bewertung ist zu berücksichtigen, dass die in den Analysen ausgewiesenen Sulfatgehalte mit großer Wahrscheinlichkeit nicht analytisch bestimmt wurden, sondern aus dem analytisch bestimmten Gesamtschwefelgehalt über Umrechnungsfaktoren [27] berechnet wurden. Da aktuell keine belastbaren Informationen vorliegen, zu welchen Anteilen und zu welchem Zeitpunkt innerhalb der Lager- und Gärprozesse der total enthaltene Schwefel als Sulfat oder organisch gebunden vorliegt, ist eine abschließende Bewertung nicht möglich. Selbst wenn nur ein Teil des in Gärsubstraten vorliegenden Schwefels als Sulfat verfügbar ist, was zur Zeit keiner Quantifizierung zugänglich ist, sollte zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit dieser Thematik zukünftig verstärkt Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die DIN 4030 [41] die Bewertung von Wässern, Böden und Gasen zum Inhalt hat und nicht die hier betrachteten landwirtschaftlichen Flüssigkeiten.

4.2 Feststellungen an Lagerbehältern aus Stahlbeton

Zusätzlich zu den bereits in [2] relativ ausführlich beschriebenen wesentlichen Schäden an Lagerbehältern für Gülle, Gärsubstrate und Gärreste aus Stahlbeton sind im Rahmen der aktuellen Bearbeitung mit Unterstützung aus der Betreuergruppe und der jeweiligen Anlagenbetreiber vier landwirtschaftliche Anlagen in Sachsen, jeweils bestehend aus mehreren Behältern besichtigt worden. Besichtigung und Datenerfassung erfolgten Ende November 2019.

Die besichtigten Behälter sind aus Stahlbeton in runder Form errichtet worden. Das Baujahr liegt zwischen 1970 und 2017, wobei die meisten Stahlbetonbehälter in den Jahren zwischen 1994 und 2017 errichtet worden sind. Die Innendurchmesser variieren zwischen 10 m und 14 m, die Behälterhöhen lagen zwischen 5 m und 7 m. Die Behälter wurden in Ort betonbauweise ringförmig in Betonierabschnitten errichtet, wobei ein Betonierabschnitt eine Höhe zwischen 0,8 m bis 1 m aufwies. Die Wandstärke der untersuchten Behälter liegt zwischen 20 cm und 30 cm. Die Einbindetiefe in das Erdreich ist von Behälter zu Behälter unterschiedlich. Während die Nachgärbehälter überwiegend oberirdisch angeordnet sind, variiert die Einbindetiefe im Erdreich bei den Gärrest Lagerbehältern zwischen 2 m und 4 m.

Neben der Erfassung von Baudaten und Informationen zu wesentlichen Inhaltsstoffen der gelagerten Gärsubstrate und Gärreste erfolgte im Rahmen der Begehung die Begutachtung der zwischen 3 und 50 Jahre alten Behälter im Hinblick auf visuell erkennbare Bauschäden. Da sich alle Behälter in Nutzung befanden, beschränkten sich die Feststellungen auf die zugänglichen äußeren Bereiche.

Die Ergebnisse lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Alle Behältern wiesen Wanddicken > 18 cm auf; die teilweise in den vorliegenden Statiken mit 18 cm geplanten Wände besaßen nach eigenen Messungen überwiegend größere Wanddicken;

- Alle Behälter weisen Trennrisse auf, die mindestens Rissbreiten von 0,1 mm besitzen (optische Messung). Damit sollte eine Durchfeuchtung ausgeschlossen sein. An einigen Behältern wurde allerdings beobachtet, dass auch diese Risse abschnittsweise Durchfeuchtungen und Aussinterungen aufweisen, die auf eine temporäre Durchfeuchtung bzw. eine abgeschlossene Durchfeuchtung verweisen. Dafür kommen sowohl der Füllgrad (zum Zeitpunkt der Besichtigung fast leerer Behälter, eine Aufweitung von Trennrissen bei Erhöhung des Füllstandes auf flüssigkeitsdurchlässige Breite ist wahrscheinlich) als auch der Einfluss der Risslänge auf den Messwert der Rissbreite, siehe Abs. 2.2.4 als Ursache in Frage;
- Viele Behälter weisen auffällige Lunker- und Poren an der Außenseite auf, die eine Reduzierung der Betondeckung in diesen Bereichen darstellen. Einige Schalanker sind nicht wasserundurchlässig ausgeführt.
- Nur wenige Behälter weisen Rissbreiten von $w \geq 0,3$ mm auf. Diese optisch gemessenen Rissbreiten waren überwiegend von Durchfeuchtungen, Verfärbungen und Aussinterungen begleitet. Die Behälter, bei denen diese Feststellungen getroffen wurden, sind überwiegend älter als 20 Jahre und nach den damals geltenden Vorgaben vermutlich mit rechnerisch größerer zulässiger Rissbreite geplant worden. An einigen wenigen Stellen sind rostfarbene Verfärbungen an den Rissen sichtbar, die auf Korrosionserscheinungen an der Bewehrung deuten.
- Lediglich an einem Behälter, Baujahr 2007 wurden am Wandfuß Risse mit Rissbreiten von $w \geq 0,3$ mm festgestellt, aus denen in geringem Umfang auch Flüssigkeiten austraten. Zur Ausbildung der relativ breiten Risse haben vermutlich Zwangbeanspruchungen durch behinderte Verkürzung der Behälterwand beigetragen, die vermutlich in der Statik nicht ausreichend berücksichtigt wurden. Ggf. liegen auch Ausführungsmängel vor.
- Die Leckageerkennungssysteme weisen vereinzelt optische Mängel auf. Inwieweit diese optischen Auffälligkeiten Auswirkungen auf die Funktionsfähigkeit haben, wurde nicht untersucht.
- Der mit knapp 50 Jahren älteste Behälter besitzt Reste eines Schwarzanstriches, welcher praktisch keine Funktion mehr besitzt. Die im Behälter vorhandenen Trennrisse queren die stark abgewitterte Beschichtung und sind mit Aussinterungen und Feuchtstellen versehen.
- Die bei den Anlagenbetreibern durchgeführte Erhebung zur Zugabe von Silagesickersaft bzw. säurehaltigen Flüssigkeiten ergab für das Jahr 2019, dass die Zugabemenge von organischen Säuren zwischen 10 mg/kg und 557 mg/kg lag.

5 Experimentelle Untersuchungen

5.1 Vorversuche

5.1.1 Zielstellung

Im Rahmen der Bearbeitung des Forschungsvorhabens P 52-5- 19.75.2-2040/19 sollte die Beständigkeit von Beton und Bewehrung gegen landwirtschaftliche Flüssigkeiten untersucht werden. Um eine Aussage über den Zustand der Bewehrung in Abhängigkeit von der Einwirkungs-dauer der ausgewählten Referenzflüssigkeiten treffen zu können, sind Potenzialfeldmessungen der Bewehrung geplant.

Zur Sicherstellung des Kontaktes der Bewehrung mit der Prüfflüssigkeit wird an den Prüfkörpern ein Biegeriss erzeugt. Biegerisse haben für die hier vorgesehenen Untersuchungen den Vorteil, dass durch die untenliegende Druckzone der erzeugte Riss nicht durch den kompletten Prüfkörper geht. Somit wird sichergestellt, dass die Prüfflüssigkeit während der Dauer der Beaufschlagung auf der Bewehrung stehen bleibt und nicht an der Unterseite der Prüfkörper austritt. Die Wahl der Biegerisse erfolgte ausschließlich aus versuchstechnischen Gründen und soll der Untersuchung dienen, ob landwirtschaftliche Prüfflüssigkeiten, die auf der Bewehrung im Bereich eines ca. 0,3 mm breiten Risses stehen, zu einer erhöhten Korrosionsgefährdung der Bewehrung führen. Technisch relevant sind eher Trennrisse, die flüssigkeitsdurchflossen sind. Einerseits weil sie in der Regel wesentlich häufiger in Behältern auftreten und andererseits den größeren Einfluss auf die Dauerhaftigkeit von Behältern haben.

Das Einstellen der Biegerisse erfolgt im Dreipunkt-Biegeversuch. Die Überprüfung der Rissbreite an der Oberfläche wird mit Wegmessuhren (Genauigkeit 1/100 [mm]) durchgeführt. Gemäß Vorhabensbeschreibung sollte der Einfluss von mediengefüllten Rissen mit einer Rissbreite von 0,3 mm auf den Korrosionszustand der Bewehrung untersucht werden. Um diese Breite an der Bewehrung zu erzeugen, muss der Biegeriss an der Probekörperoberseite eine größere Breite besitzen. Welche Breite erforderlich ist und ob die dazu leicht geänderte Prüfkörpergeometrie valide ist, sollte in Vorversuchen geklärt werden. Im Ergebnis der Vorversuche war das Prüfprogramm zu präzisieren und mit einer Zeitplanung zu untersetzen.

5.1.2 Versuchskörper

Für die Vorversuche wurden bewehrte Rissplatten in Anlehnung an die DIN EN 1062-7:2004-08, jedoch mit etwas vergrößerter Dicke von 50 mm hergestellt. Es wurden drei quaderförmige Platten aus Beton der Festigkeitsklasse C25/30, der den Anforderungen der Expositionsklassen XA1, XF1, XC4 entspricht, verwendet. Die Betoneigenschaften entsprechen den Mindestanforderungen der DIN 11622-2 [31].

Da im Rahmen der Projektbearbeitung nicht der Verbund von Beton und Stahl untersucht werden sollen, wurde als Bewehrung Rundstahl blank EN 10278 h9 - 4 mm EN 10277-1+2 S235JRC+C HL verwendet. Er entspricht von seiner metallurgischen Zusammensetzung üblichem Baustahl und begünstigt die gezielte Einstellung der geplanten Rissbreite.

Die Abmessung der Prüfkörper beträgt 300 x 200 x 50 [mm]. Die Abbildung 10 zeigt eine schematische Darstellung der verwendeten Rissplatten in Anlehnung an DIN EN 1062-7:2004-08. Die Dicke der Rissplatte wurde von 40 mm auf 50 mm erhöht, um dadurch eine Erhöhung der Betondeckung zu erreichen. Um den Biegeriss an der vorgesehenen Stelle zu erzeugen, erfolgte eine Querschnittsschwächung in Form einer dreieckigen Kerbe über die gesamte Breite.

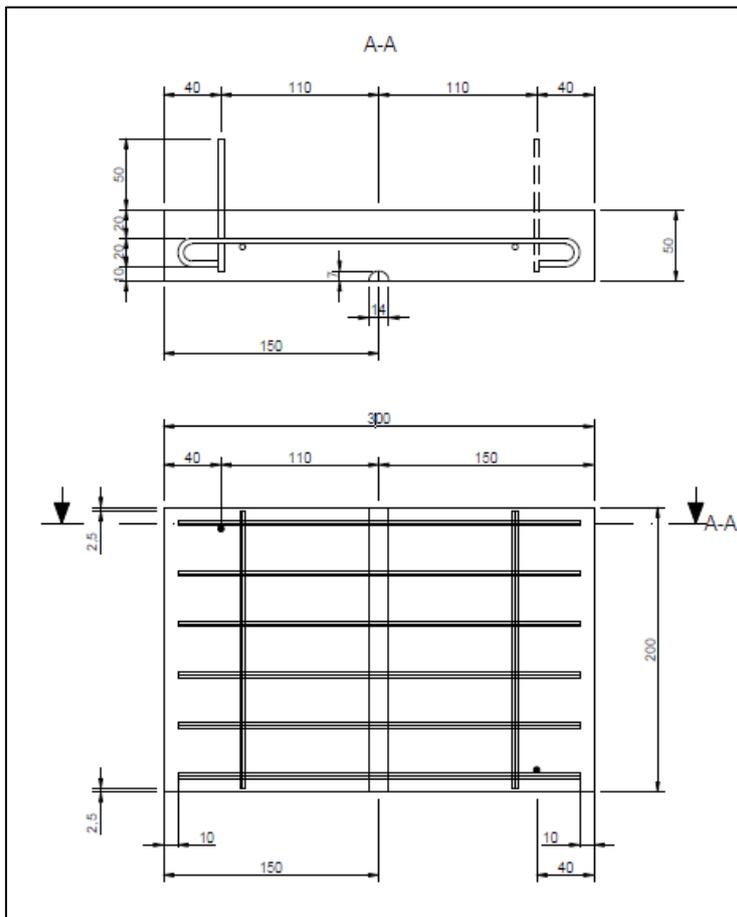


Abbildung 10 schematische Darstellung Rissplatten

5.1.3 Erzeugung Biegeriss und Einstellung Rissbreite

Mit Hilfe einer Einspannvorrichtung in Anlehnung an DIN EN 1062-7 [40] und der vorhandenen Querschnittsschwächung wird im Versuchstand ein definierter Biegeriss im jungen Betonalter (Alter < 7d) erzeugt. Bei der Risserzeugung sind die Prüfkörper mit zwei Messuhren (Skalenteilung 1/100 [mm]) bestückt, so dass die geplanten Rissbreiten mit hoher Genauigkeit eingestellt werden können.



Abbildung 11 Prüfkörper in Einspannvorrichtung mit Messuhren

Im Rahmen der Vorversuche sollte untersucht werden, wie groß der Biegeriss an der Oberseite der Prüfkörper eingestellt werden muss, um die geforderte Rissbreite von $w = 0,3$ mm an der Bewehrung sicherzustellen. Zu diesem Zweck wurden an drei Rissplatten Biegerisse mit einer Rissbreite von $w = 0,4; 1,0$ und $1,5$ [mm] an der Oberfläche mit Hilfe einer Prüfmaschine eingestellt. Um die geforderte Rissbreite an der Oberfläche zu erreichen, waren während des Dreipunkt-Biegeversuches Wegemessuhren (Skalenteilung $1/100$ [mm]) an den Seiten der Prüfkörper befestigt. Während der Risserzeugung konnte so die Breite kontinuierlich kontrolliert werden. Am Ende der Belastungsphase, mit Erreichen der Sollrissbreite, wurde der Riss fixiert, indem der Prüfkörper in einer Haltevorrichtung eingespannt wurde. Abbildung 11 zeigt einen Prüfkörper samt Einspannvorrichtung im Versuchsstand.

Die erzeugten und fixierten Biegerissbreiten wurden nach dem Ausbau aus dem Versuchsstand mit einer Rissmesslupe überprüft. Da die Messung nur an der Oberfläche der Prüfkörper erfolgte, stand eine Bestätigung der tatsächlichen Rissbreite an der Bewehrung aus. Zu diesem Zweck wurden die fixierten Biegerisse mit Epoxidharz gefüllt, um ein Aufsägen der Prüfkörper nach dessen Erhärtung zu ermöglichen. Nach Erhärtung des Harzes wurden die Rissplatten, zur Ermittlung der Rissbreite in Höhe der Bewehrungslage, in drei gleich große Teile zersägt und die am gefüllten Riss im Bereich der Bewehrung vorhandene Rissbreite gemessen. Die Ergebnisse der Messungen sind in der Tabelle 18 dargestellt, bzw. anhand der Abbildung 12 bis Abbildung 14 ersichtlich.

Tabelle 18 Rissbreiteneinstellung an der Bewehrung

Prüfkörper 1		Prüfkörper 2		Prüfkörper 3	
	Rissbreite [mm]		Rissbreite [mm]		Rissbreite [mm]
Oberseite	1,0	Oberseite	0,4	Oberseite	1,5
Schnittfläche 1	0,3	Schnittfläche 1	0,2	Schnittfläche 1	0,4
Schnittfläche 2	0,3	Schnittfläche 2	0,1	Schnittfläche 2	0,5

Prüfkörper 1		Prüfkörper 2		Prüfkörper 3	
Schnittfläche 3	0,2	Schnittfläche 3	0,1	Schnittfläche 3	0,4
Schnittfläche 4	0,2	Schnittfläche 4	0,1	Schnittfläche 4	0,4



Abbildung 12 Rissbreite Bewehrungslage PK 1, Schnittfläche 2



Abbildung 13 Rissbreite Bewehrungslage PK 2, Schnittfläche 2



Abbildung 14 Rissbreite Bewehrungslage PK 3, Schnittfläche 2

Im Ergebnis der durchgeführten Vorversuche wurde festgestellt, dass bei einer Einstellung des Biegerisses auf der Prüfkörperoberfläche von 1,0 mm im Bereich der Bewehrung eine Rissbreite von 0,3 mm gewährleistet ist.

5.1.4 Potenzialfeldmessung

Wesentlicher Bestandteil der durchzuführenden Untersuchungen war die Klärung der Frage, ob an der Bewehrung von Stahlbetonbauteilen, die im Bereich von Trennrissen Kontakt zu landwirtschaftlichen Flüssigkeiten haben, Korrosionserscheinungen auftreten.

Diese Fragestellung sollte für unterschiedliche Flüssigkeiten in Abhängigkeit von der Einwirkungsdauer geklärt werden. Damit schieden zerstörende Untersuchungsverfahren zunächst aus und das Augenmerk wurde auf den Einsatz von zerstörungsfreien Methoden gelegt, mit denen eine Aussage zu Korrosionsprozessen möglich ist.

Für die Untersuchungen wurde als Verfahren die Potenzialfeldmessung ausgewählt und in Vorversuchen auf die Eignung für die hier zu bearbeitende Aufgabenstellung untersucht. Die elektrochemische Potentialmessung dient der Lokalisierung aktiver Korrosionsprozesse an der Bewehrung von Stahlbetonbauteilen. Dabei wird die Spannung zwischen einer auf der Betonoberfläche angeordneten Bezugselektrode mit bekanntem Potential und der Bewehrung gemessen. Wenn die Stahloberfläche im Beton, z. B. durch Eintrag von Schadstoffen oder durch Karbonatisierung des Betons, depassiviert wird, kann es zur Korrosion des Stahls kommen. Dabei bilden sich auf der Stahloberfläche anodische (aktive) und kathodische (passive) Bereiche. Der in jedem Korrosionselement fließende Korrosionsstrom führt zu einer Polarisierung der Anoden und Kathoden, wobei das entstehende und an der Betonoberfläche messbare Mischpotential ortsabhängig verändert wird. Die Korrosionswahrscheinlichkeit nimmt mit negativeren Potentialwerten zu, ebenso zeigen hohe Potentialgradienten eine höhere Korrosionswahrscheinlichkeit an. Das Prinzip der Messung ist in folgender Abbildung dargestellt.

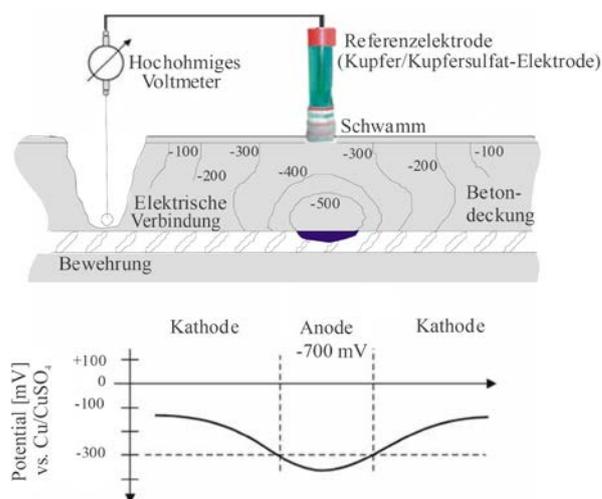


Abbildung 15 Prinzip der Potentialfeldmessung, entnommen aus [53]

Die Potentialfeldmessung liefert eine qualitative Aussage über das Vorhandensein von Bereichen mit aktiver Korrosion. Die Absolutwerte der Potentialmessungen werden durch Eigenschaften des Betons, die Betondeckung der Bewehrung und weitere Umgebungsbedingungen beeinflusst. Sie müssen deshalb im Zusammenhang mit anderen Kriterien, insbesondere dem Potentialgradienten, beurteilt werden. Gemessen wird die Summe aus dem am Bauteil vorliegenden Korrosionspotential und dem konstanten Bezugspotential der verwendeten Bezugselektrode. Bei den in diesem Forschungsvorhaben durchgeführten Messungen kommen als Bezugselektrode ausschließlich Elektrodensysteme auf der Basis von Kupfer / Kupfersulfat, deren Bezugspotential +320 mV beträgt, zum Einsatz.

Diese Bezugselektrode wird in der Messpraxis vor Ort fast ausschließlich verwendet. Deshalb sind praktisch alle in der Literatur angegebenen Beurteilungskriterien auf das Bezugspotential der Cu/CuSO₄-Elektrode bezogen, so dass direkt die Messwerte betrachtet werden können.

Für die Potentialfeldmessungen kann wahlweise ein spezielles Messgerät, z.B. Canin+ (Firma: Proceq) oder ein ausgewähltes hochohmiges Spannungsmessgerät zur Anwendung kommen. Bezüglich der Ergebnisse sind beide Messgeräte als technisch gleichwertig anzusehen. Bei der Messung mit dem canin-Gerät werden die Messdaten gespeichert, während die Werte bei Verwendung eines Spannungsmessgerätes manuell zu erfassen sind.

Das Ziel der Untersuchungen besteht darin, Anzeichen für aktive Korrosionsprozesse im Beton nach unterschiedlichen Beaufschlagungszeiten messtechnisch nachzuweisen, wobei durch rasterförmige Messungen auf der beaufschlagten Oberfläche, am Riss sowie an nicht beaufschlagten Flächen der speziell hergestellten Probekörper, ggf. ein abweichendes Verhalten gezeigt werden kann. Der Vorteil der zerstörungsfreien Messung besteht in der Möglichkeit, zeitlich aufeinanderfolgende Messreihen aufzunehmen, während eine visuelle Beurteilung der Korrosion des Stahls durch zerstörende Untersuchung erst zum Ende des Versuchszeitraumes möglich ist.

Im Rahmen der Vorversuche wurden unterschiedliche Randbedingungen bezüglich des Untergrundes und der Messanordnungen getestet. Während der Messungen war stets darauf zu achten, dass der Kontakt vom Messgerät zur Bewehrung sichergestellt ist. An realen Bauteilen wird dazu an mindestens zwei Stellen Bewehrung durch Stemmen freigelegt. An den, im Vergleich zu realen Bauteilen, kleinen Laborprüfkörpern wurde an der Bewehrung ein Anschluss vorgesehen, der aus der Prüfkörperoberfläche herausragte. Im Zusammenhang mit den verschweißten Bewehrungskörben war sichergestellt, dass alle Bewehrungselemente einer Probe elektrisch leitend miteinander verbunden waren und eine zuverlässige Verbindung zum Messgerät existierte.

Um die Messungen unter gleichmäßigen Feuchtebedingungen durchzuführen, wurde eine einheitliche Vorgehensweise festgelegt. Insbesondere waren die Prüflüssigkeiten vor der Messung von der Betonoberfläche zu entfernen.

Zur Bewertung der Messergebnisse kann als eine Möglichkeit die absolute Größe des gemessenen Potentials betrachtet werden. Tendenziell wächst die Korrosionswahrscheinlichkeit mit abnehmenden Messwerten des Potentials an der Betonoberfläche. Zur Bewertung werden im DGzFP-Merkblatt [53] und in der ASTM C876-91 [54] Anhaltswerte vorgeschlagen.

Gemäß Anhang ASTM C876-91 [54] lassen sich die gemessenen Potentiale in 3 Grenzbereiche unterteilen, die für die Auswertung der Versuche unterschieden werden.

- Fall 1 $U_{Cu/CuSO_4} < 200 \text{ mV}$: Mit über 90 % Wahrscheinlichkeit findet in diesem Bereich keine Korrosion während der Messung statt,
- Fall 2 $200 \text{ mV} \leq U_{Cu/CuSO_4} \leq 350 \text{ mV}$: Aussagen über das Korrosionsverhalten in diesem Bereich sind unsicher,
- Fall 3 $U_{Cu/CuSO_4} > 350 \text{ mV}$; Mit über 90 % Wahrscheinlichkeit findet Korrosion in diesem Bereich während der Messung statt.

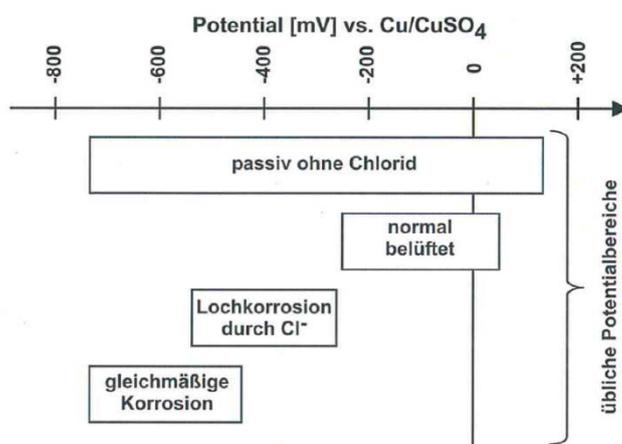


Abbildung 16 Potenzialbereiche und Korrosionsarten nach [53]

Die Angaben weichen stellenweise voneinander ab, was durch eine Reihe von Einflussfaktoren auf das Messergebnis erklärbar ist. In [13] werden insbesondere folgende Einflüsse betrachtet:

- Ausbreitung des Potentialfeldes wird beeinflusst durch Betondeckung, Elektrolytwiderstand des Betons, Bauteilgeometrie, Anoden-Kathoden-Verhältnis, Karbonatisierung des Betons
- elektrokinetische Effekte, Diffusionspotentiale im Material und an Übergängen zwischen einzelnen Schichten (Messelektrode, Koppel Elektrolyt, karbonatisierter Beton, alkalischer Beton, Elektrolyt an der Anode)
- Niveau des Elektrodenpotentials, beeinflusst durch Sauerstoffgehalt des Betons
- Messung und Auswertung (Messraster, Oberflächenvorbehandlung)

Als zweite Möglichkeit der Bewertung kommt die Betrachtung der Potentialgradienten in Frage. Von aktiver Korrosion ist an Stellen auszugehen, an denen das Potenzial lokal deutlich kleiner ist, als in der Umgebung (Potentialtrichter), Abbildung 17. Diese Bewertung ist an den hier untersuchten Proben zu bevorzugen, da der Einfluss der Flüssigkeiten auf die Bewehrung an einem Riss untersucht werden sollte. Im Bereich des Risses ist bei aktiver Korrosion mit einer lokalen Potentialverschiebung in Richtung negativer Potentiale zu rechnen.

Die Betrachtung des Potentialgradienten eliminiert Einflüsse der speziellen Probenform auf die absolute Höhe der gemessenen Potentiale. An realen Bauteilen ist die Potentialdifferenz zwischen dem Boden eines solchen Potetialtrichters und seiner Umgebung oft deutlich größer als 100 mV.

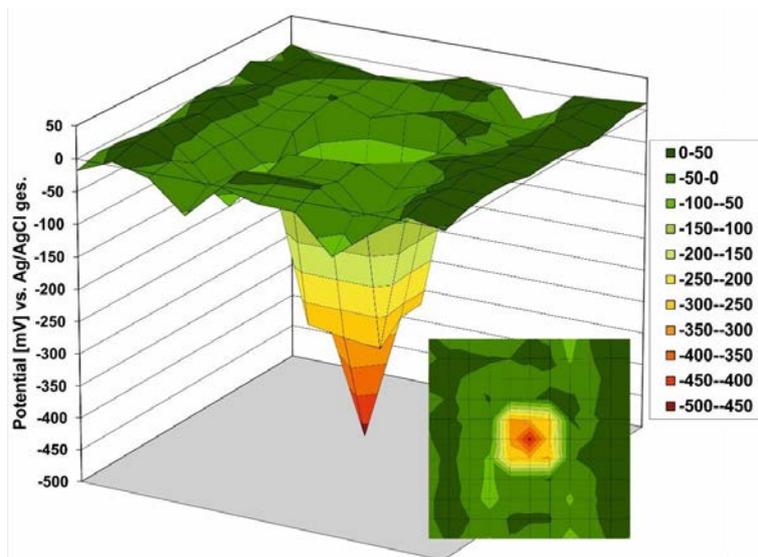


Abbildung 17 lokale Potenzialverschiebung (Potentialtrichter), aus [53],

Die Darstellungsweise in der Draufsicht aus Abbildung 17 wurde in diesem Bericht verwendet. An den unterschiedlich vorbereiteten Versuchsmessflächen wurde mittels einer Bezugselektrode, die auf die Betonoberfläche in dem vorher definierten Raster (auf die angezeichneten Messpunkte) gesetzt wurde, die Spannung gegenüber der Bewehrung gemessen. Die gemessene Spannung beschreibt das Mischpotential an der Betonoberfläche, was durch die Polarisierung der Anoden und Kathoden an der Stahloberfläche durch Korrosionselemente entsteht.

Für die Messungen wurde auf der mit Flüssigkeiten beaufschlagten Fläche ein Raster von 6 x 6 Messpunkten für jeden Prüfkörper festgelegt, wobei die Messpunkte in Längsrichtung jeweils auf den 6 Bewehrungsstäben angeordnet sind. In Längsrichtung erfolgt die Messung entlang der Bewehrung, deren Lage durch den Bewehrungsplan bekannt ist, siehe nachfolgende Abbildungen. Auf jedem Bewehrungsstab liegen sechs Messpunkte, drei beidseitig des Biegerisses (rot markiert) und zusätzlich zwei Messpunkte außerhalb des Flüssigkeitsreservoirs.

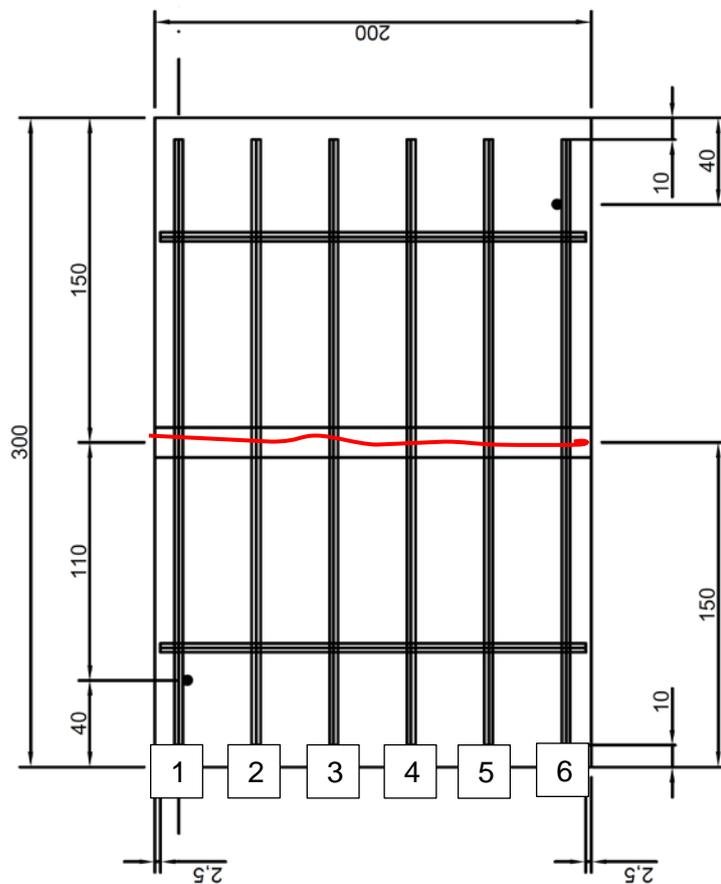


Abbildung 18 Bewehrungsplan Rissplatte und Kennzeichnung der Messlinien

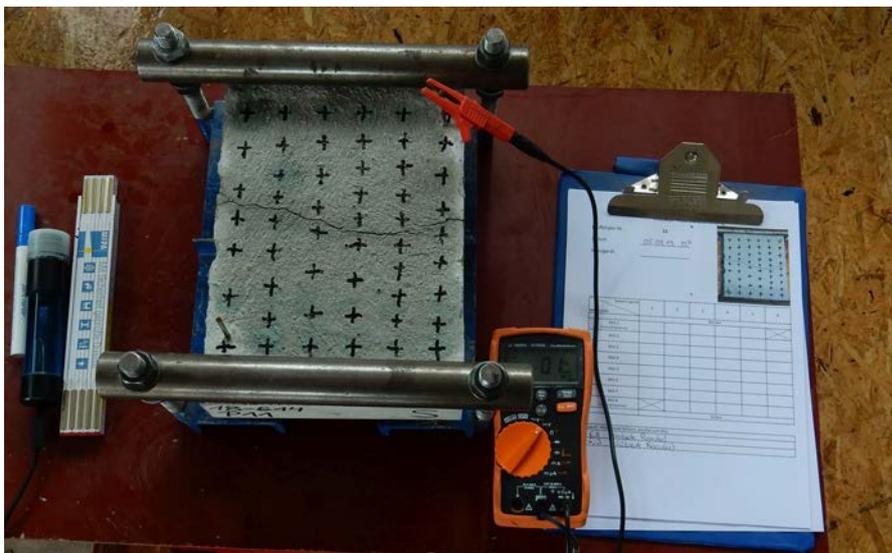


Abbildung 19 Potentialfeldmessungen

Zum Nachweis der Signifikanz der Messungen wurden im Vorversuch Messungen mit trockener Oberfläche sowie Messungen mit feuchten Oberflächen durchgeführt. Zusätzlich wurde überprüft,

wie sich eine gesättigte Salzlösung auf Prüfkörperoberfläche, im Riss und an der Bewehrung, auf die Messwerte auswirken. Abbildung 20 zeigt die Korrosionspotenziale nach Beaufschlagung des Risses mit Kochsalzlösung am Bewehrungsstab 6. Die einsetzende Korrosion ist deutlich an der Potentialverschiebung im beaufschlagten Bereich zu erkennen. Die Wirkung der eigentlichen Prüfflüssigkeiten kann auch durch Vergleich mit dem Ergebnis des Vorversuchs abgeschätzt werden. Die Ergebnisse der Vorversuche mit Kochsalzlösung belegen, dass das gewählte Verfahren grundsätzlich geeignet ist, um korrosionsbedingte Reaktionen auch bei den für das Forschungsvorhaben gewählten, relativ kleinen Prüfkörpern darzustellen.

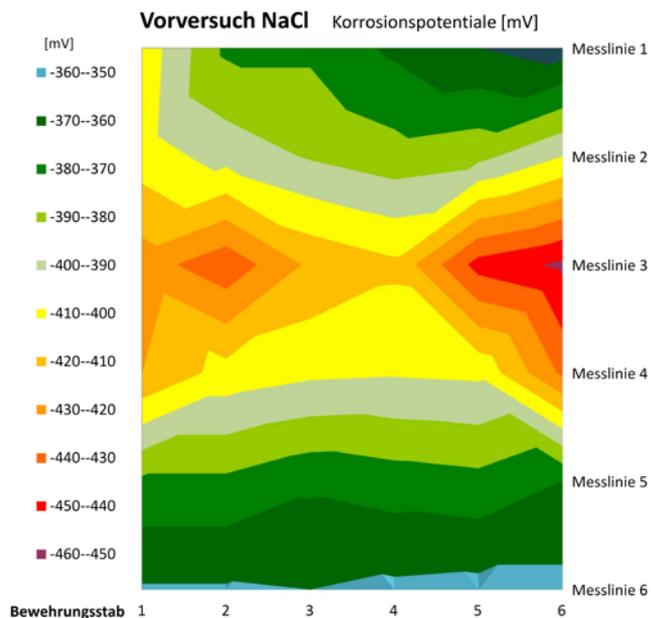


Abbildung 20 Potentialverschiebung nach Beaufschlagung mit Kochsalzlösung

Nach Klärung der Randbedingungen und der Signifikanz der Potentialfeldmessungen wurde überprüft, mit welchem Reservoir die Flüssigkeit auf die gerissene Betonoberfläche gebracht werden kann. Dazu wurden zunächst zylindrische Behälter ausgewählt, die auf Grund von Beeinträchtigungen der Potentialfeldmessung nicht zum Einsatz kommen konnten. Verwendet wurde ein gesondert hergestelltes rechteckiges Reservoir aus Acrylglas (PMMA) mit den Abmessungen von 226 x 200 x 80 [mm], das auf den Rissprüfkörpern nach Anzeichnen der Messpunkte flüssigkeitsdicht aufgeklebt wurde, siehe Abbildung 21. Mit dieser Anordnung konnte die Potenzialfeldmessung durchgeführt werden, ohne dass der Behälter zurückgebaut werden musste. Einige Messstellen befanden sich außerhalb des Flüssigkeitsreservoirs. Sie wurden bei den Messungen ebenfalls erfasst, jedoch wichen die Ergebnisse unsystematisch von den Werten innerhalb des Reservoirs ab, so dass die außerhalb gemessenen Werte nicht in die Auswertung einbezogen wurden.

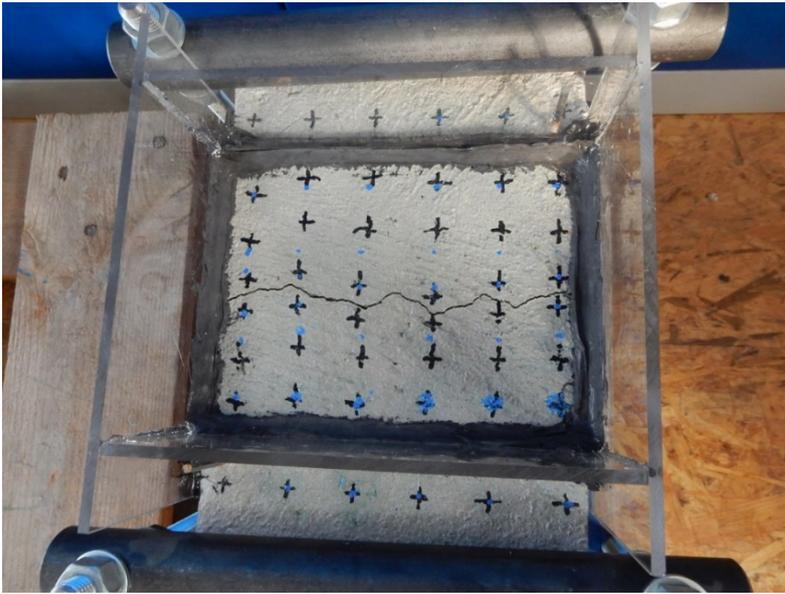


Abbildung 21 Rissprüfkörper mit Messpunkten und Flüssigkeitsreservoir

5.2 Versuchsplanung

5.2.1 Konzeption

Auf Grund der Vielfalt möglicher Zusammensetzungen von landwirtschaftlichen Flüssigkeiten wurden die durchzuführenden Versuche unter Verwendung der vom DIBt festgelegten Referenzflüssigkeiten konzipiert. Zum Einsatz kamen die Referenzflüssigkeiten für Gülle (MG 1) unverdünnt sowie verdünnt mit 10 % bzw. 20 % der Referenzflüssigkeit für Silagesickersaft (MG 2). Damit sollen die gemäß DIN 11622 [31] aktuell maximal zulässige Zumischung an Silagesickersaft sowie eine Verdopplung dieses Wertes in die Untersuchungen einbezogen werden.

Zum Vergleich verblieben drei gleichartig vorbereitete Prüfkörper während der gesamten Versuchszeit im Laborklima und wurden zu den gleichen Zeiten den entsprechenden Messungen unterzogen.

Basierend auf den bisherigen Erkenntnissen zur Durchlässigkeit von Trennrissen mit Rissbreiten von $w \leq 0,3$ mm unter Einwirkung von landwirtschaftlichen Flüssigkeiten, deren Hauptmerkmal mehr in einer dauerhaften Durchfeuchtung als im Durchströmen besteht, wurde die Flüssigkeitssäule abweichend von üblichen Eindringversuchen nach [52] mit 50 mm festgelegt. Diese Beaufschlagungshöhe, die über den gesamten Versuchszeitraum, ausgenommen sind die Messzeitpunkte, permanent auf den Riss einwirkte wurde als ausreichend für die Induzierung der relevanten Transportvorgänge erachtet. Über die regelmäßige Kontrolle der pH Werte der Flüssigkeiten sollte zudem sichergestellt werden, dass durch die Reaktion der Betonprüfkörper mit den Prüfflüssigkeiten keine gravierende Veränderung wesentlicher Eigenschaften stattfindet. Alle 12 Prüfkörper erhielten im Dreipunkt - Biegeversuch einen Biegeriss, der im Bereich der kreuzenden Bewehrung eine Rissbreite von 0,3 mm aufwies.

5.2.2 Versuchskörper und -aufbau

Für die experimentellen Untersuchungen wurden 12 quaderförmige Stahlbetonplatten gemäß DIN EN 1062 – 7 [40], abweichend von der Norm jedoch mit einer Dicke von 50 mm, in der Betonhalle der MFGPA Leipzig hergestellt. Als Bewehrung wurde in die Platten Rundstahl eingebaut. Der Stahl entspricht von seiner metallurgischen Zusammensetzung üblichem Baustahl und begünstigt die gezielte Einstellung der geplanten Rissbreite in den als Rissplatten mit Kerbe ausgebildeten Versuchskörpern. Im Ergebnis der Vorversuche wurden die Abmessungen und Eigenschaften der Prüfkörper für das geplante Prüfprogramm festgelegt. Die nachfolgende Tabelle fasst die Randbedingungen für die Prüfkörper zusammen, die für die im Forschungsvorhaben durchzuführenden Untersuchungen verwendet werden sollen.

Tabelle 19 Prüfkörpergestaltung

Geometrie Prüfkörper	
Länge / Breite / Höhe	300 mm / 200 mm / 50 mm
Betondeckung	20 mm
Breite Biegeriss (Oberseite)	1,0 mm
Breite Riss an der Bewehrung	0,3 mm
Betoneigenschaften (C25/30; XA1, XF1, XC4)	
Stahlsorte	
Rundstahl, blank EN 10278 h9 4 mm EN 10277-1+2 S235JRC+C HL	
Geometrie Prüfflüssigkeitsreservoir	
Länge / Breite / Höhe ü. OK Pk	226 mm / 200 mm / 80 mm
Wandstärke	5 mm
Flüssigkeitssäule Prüfflüssigkeit	
Höhe	50 mm

Die Vorversuche haben gezeigt, dass die Rissprüfkörper mit modifizierter Geometrie (größere Dicke) und Einstellung einer größeren Rissbreite an der Oberfläche die gewünschten Randbedingungen für die Untersuchungen einhalten.

Für die Potenzialfeldmessungen hat sich das rechteckförmige Flüssigkeitsreservoir, welches alle Messpunkte auf der Oberseite der Prüfkörper umschließt, als am günstigsten erwiesen. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit zwischen den bisher durchgeführten Forschungsvorhaben wurde Beton der Festigkeitsklasse C25/30, der den Anforderungen der Expositionsklassen XA1, XF1, XC4 entspricht, verwendet. Die Betoneigenschaften entsprechen den Mindestanforderungen der DIN 11622 - 2 (2015-09) [42]. Tabelle 20 enthält die Mischungszusammensetzung.

Tabelle 20 Betonmischung

Betonrezeptur (C25/30; XA1, XF1, XC4)	
CEM I 32,5 R Schwenk	300 kg/m ³
Zusatzmittel Glenium Sky 593	0,4 M-% von CEM I
Wasser	180 kg/m ³
w/z-Wert	0,60
w/Z _{eq}	0,60
Gesteinskörnung	16 mm Größtkorn

Die Risserzeugung und Einstellung der gewählten Rissbreiten erfolgte mit Hilfe einer Einspannvorrichtung in Anlehnung an DIN EN 1062-7 [40] unter Nutzung der im Rissprüfkörper vorhandenen Querschnittsschwächung im jungen Betonalter (Alter < 7d). Zur definierten Einstellung der in den Vorversuchen ermittelten Rissbreite an der Oberfläche, wurden vor der Durchführung des Dreipunkt-Biegeversuches zur Risserzeugung und Einstellung Wegmessuhren mit einer Skalenteilung von 1/100 mm an den Seiten der Prüfkörper befestigt. Nach Erreichen der festgelegten Rissbreite an der Oberseite der Rissplatten wurde die Rissbreite durch Einspannen der Prüfkörper in einer Haltevorrichtung fixiert.

Der eingestellte Biegeriss, dessen Rissbreite auf Höhe der Oberseite der Bewehrung $w = 0,3$ mm beträgt, wird über eine festgelegte Zeitdauer kontinuierlich mit Flüssigkeit beaufschlagt. Der Vorteil der verwendeten Prüfkörper besteht darin, dass der nicht durchgängige Riss ein Verbleiben der Flüssigkeit auf der Bewehrung ermöglicht. Ein regelmäßiges monatliches Austauschen der Prüfflüssigkeiten gewährleistet eine weitgehende Konstanz der Flüssigkeitseigenschaften. Die ausgewählten Prüfflüssigkeiten befinden sich in einem Reservoir, das auf die Rissplatten geklebt wurde. Mit dieser Versuchsanordnung kann die Potenzialfeldmessung durchgeführt werden, ohne dass der Behälter zurückgebaut werden muss.

5.2.3 Versuchsdurchführung

Auf Grund der begrenzten Prüfkörperanzahl wurde im Rahmen der durchgeführten Versuche nur die Auswirkung einer dauerhaften Flüssigkeitsbeanspruchung überprüft und keine Wechselbeanspruchung wie in vorangehenden Forschungsvorhaben. In Umsetzung der für landwirtschaftliche Anlagen nach den beim DIBt hinterlegten Prüf- und Zulassungsgrundsätzen geltenden Prüfdauer wurde die maximale Beaufschlagungszeit für alle Prüfkörper in Abstimmung mit der Beratungsgruppe auf 180 Tagen festgelegt. Zu den festgelegten Messzeitpunkten 60, 90, 120, 150 und 180 Tage erfolgten Potentialfeldmessungen.

Vor den Messungen wurden jeweils die Prüfflüssigkeiten entfernt und die Betonoberfläche leicht abgetupft, bevor die Messungen entsprechend der in Abschnitt 5.1.4 beschriebenen Vorgehensweise durchgeführt wurden. Anschließend erfolgte die Wiederbeaufschlagung mit erneuerter Prüfflüssigkeit. Nach Beendigung der Prüfungen wurden alle Prüfkörper gespalten und Beton und Bewehrung visuell bzw. mikroskopisch beurteilt.

5.2.4 Prüfflüssigkeiten

Abweichend von den bisher durchgeführten Forschungsvorhaben, bei denen die Untersuchungen unter Verwendung von realen landwirtschaftlichen Flüssigkeiten erfolgten, wurden für alle Untersuchungen die und die Beaufschlagung über den langen Zeitraum mit Prüfflüssigkeiten von gleichbleibender Zusammensetzung erfolgt. In Weiterführung der bisherigen Forschungsarbeiten war der Einfluss von Gülle, ggf. mit Zumischung von Silagesickersaft, auf Stahlbetonbauteile unter Verwendung der folgenden Referenzflüssigkeiten zu untersuchen. Tabelle 21 zeigt die Zusammensetzung der Prüfflüssigkeiten.

Tabelle 21 Zusammensetzung der Prüfflüssigkeiten in Anlehnung an [36]

PF Nr.	Mischungs- nachbildung	Zusammensetzung
PF 1	MG 1 [36] Gülle	100 Vol.-% basische wässrige Lösung auf einen pH-Wert von 8,5 bis 9,0 eingestellt
PF 2	MG 1 + 10 % MG 2 [36] Gülle mit 10 % Silage- sickersaft	90 Vol.-% basische wässrige Lösung 10 Vol.-% Gärsäure-Mischung
PF 3	MG 1 + 20 % MG 2 [36] Gülle mit 20 % Silage- sickersaft	80 Vol.-% basische wässrige Lösung 20 Vol.-% Gärsäure-Mischung

Während der Beaufschlagung der Prüfkörper mit den Flüssigkeiten erfolgte regelmäßig die Überprüfung des pH Wertes. Es wurde festgelegt, dass ab einer pH Wert Änderung von $\Delta\text{pH} > 0,5$ die Erneuerung der Flüssigkeiten erforderlich ist. Im Verlauf der Voruntersuchungen und Versuche kristallisierte sich die Notwendigkeit zum Wechsel der Prüfflüssigkeiten von einmal monatlich heraus. Innerhalb dieses Zeitraumes blieben die pH Werte innerhalb der festgelegten Grenzen, so dass von gleichartigen Beanspruchungsverhältnissen auszugehen ist.

Zur Überprüfung der Auswirkung der Zumischungen von Silagesickersaft (Referenzflüssigkeiten) auf den pH Wert der Gülle (Referenzflüssigkeit) wurden am Mathematisch - Naturwissenschaftlichen Zentrum (MNZ) der HTWK Leipzig unter Laborbedingungen pH-Messungen durchgeführt. Dazu wurde zunächst die wässrige basische Lösung hergestellt. Für die Nachbildung der Prüfflüssigkeit "Silagesickersäfte" wurde eine Gärsäure - Mischung nach [36] hergestellt, die im Folgenden mit Stammlösung bezeichnet wird.

Die hergestellte Stammlösung wurde in einem ersten Schritt zunächst in verschiedenen Anteilen mittels Wasser verdünnt und anschließend der pH-Wert gemessen. Die Messung erfolgte mit einem vorher kalibrierten pH-Meter. Abbildung 22 zeigt die in verschiedensten Anteilen verdünnte Stammlösung, Tabelle 22 die gemessenen pH-Werte.



Abbildung 22 Stammlösung in verschiedenen Anteilen verdünnt

Tabelle 22 pH-Werte verdünnte Stammlösung

Mischung	pH-Wert	Temp [°C]
1% Stammlösung + 99% H ₂ O	3,15	22,5
5% Stammlösung + 95% H ₂ O	2,71	22,6
10% Stammlösung + 90% H ₂ O	2,50	22,7
15% Stammlösung + 85% H ₂ O	2,40	22,8
20% Stammlösung + 80% H ₂ O	2,32	23,0

Der pH-Wert in Abhängigkeit von der Konzentration der Stammlösung ist in Abbildung 23 grafisch dargestellt.

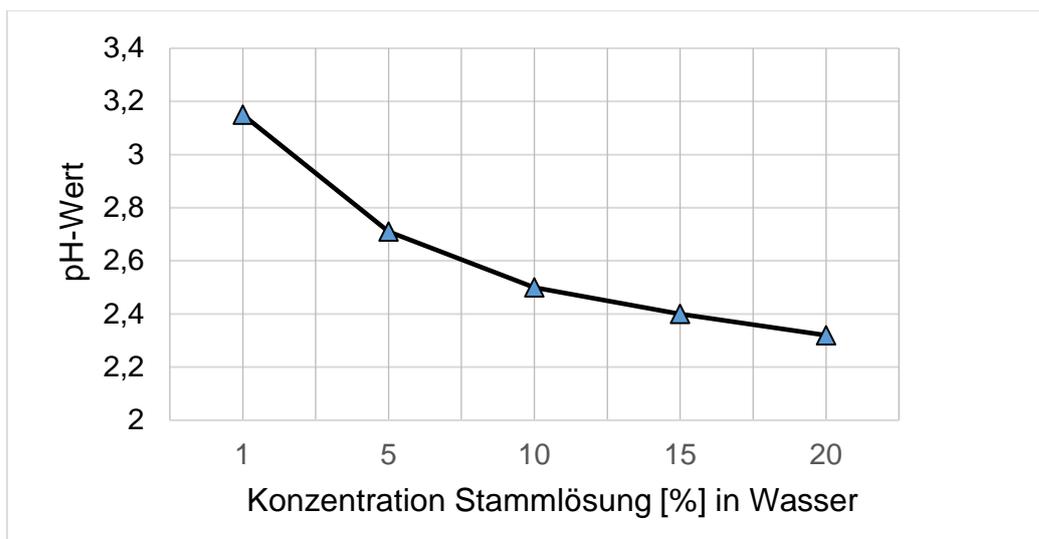


Abbildung 23 Abhängigkeit pH-Wert von der Konzentration Stammlösung in Wasser

Das Diagramm zeigt, dass mit steigender Konzentration der Gärsäuremischung der pH-Wert abfällt. Der negative Anstieg der Graden ist bei niedriger Konzentration steiler als bei höheren Konzentrationen. Der Graph gleicht einem logarithmischen Kurvenverlauf. Das entspricht der Erwartung, da der pH-Wert als negativer dekadischer Logarithmus der Wasserstoffionenaktivität definiert ist. In gleicher Weise wurde die pH-Wert-Änderung bei Zugabe der Referenzflüssigkeit für Gülle untersucht. Dazu wurden unterschiedliche Mischungen von Stammlösung und basischer Güllenachbildung hergestellt und anschließend der pH-Wert ermittelt, siehe Tabelle 23.

Tabelle 23 pH Werte der Mischflüssigkeiten (Ansatz pro Mischung 100ml)

Mischungszusammensetzung	pH-Wert	Temp [°C]
7 %ige $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ -Lösung	8,09	22,1
1% Stammlösung + 99% $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ -Lösung	8,09	22,1
5% Stammlösung + 95% $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ -Lösung	7,76	22,3
10% Stammlösung + 90% $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ -Lösung	7,44	22,2
15% Stammlösung + 85% $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ -Lösung	7,18	22,4
20% Stammlösung + 80% $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ -Lösung	6,96	22,6
30% Stammlösung + 70% $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ -Lösung	6,24	21,9
40% Stammlösung + 60% $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ -Lösung	5,62	21,9
50% Stammlösung + 50% $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ -Lösung	4,66	21,9

Der Zusammenhang ist im folgenden Diagramm grafisch dargestellt.

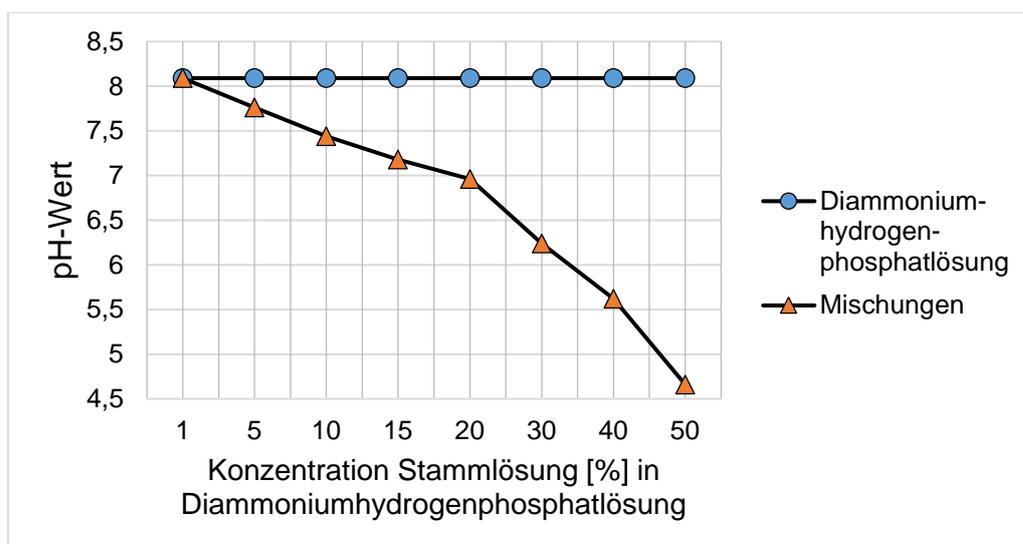


Abbildung 24 pH-Wert Entwicklung bei Zugabe von MG 1 zur MG 2 gemäß [36]

5.2.5 Versuchsprogramm

Die experimentellen Untersuchungen umfassten neben den zerstörungsfreien Potentialfeldmessungen zu festgelegten Prüfzeitpunkten eine laufende visuelle Beurteilung und Kontrolle des pH Wertes der Prüflüssigkeiten. Die folgende Tabelle fasst die einzelnen Versuchsschritte und Prüfkörpernummerierungen zusammen.

Tabelle 24 Versuchsprogramm Laborprüfungen

PK Nr.	Flüssigkeit gem. Tabelle 21	Potentialfeldmessungen	Spalten, visuelle Beurteilung	Mikroskopie und Umsetzungstiefe
1	PF 1	Start, nach 60, 90, 120, 150 und 180 Tagen	Nach 180 d	X
2	PF 1	Start, nach 60, 90, 120, 150 und 180 Tagen	Nach 180 d	X
3	PF 1	Start, nach 60, 90, 120 Tagen	Nach 120 d	X
4	PF 2	Start, nach 60, 90, 120, 150 und 180 Tagen	Nach 180 d	X
5	PF 2	Start, nach 60, 90, 120, 150 und 180 Tagen	Nach 180 d	X
6	PF 2	Start, nach 60, 90, 120 Tagen	Nach 120 d	X
7	PF 3	Start, nach 60, 90, 120, 150 und 180 Tagen	Nach 180 d	X
8	PF 3	Start, nach 60, 90, 120, 150 und 180 Tagen	Nach 180 d	X
9	PF 3	Start, nach 60, 90, 120 Tagen	Nach 120 d	X
10	---	Start, nach 60, 90, 120, 150 und 180 Tagen	Nach 180 d	X
11	---	Start, nach 60, 90, 120, 150 und 180 Tagen	Nach 180 d	X
12	---	Start, nach 60, 90, 120 Tagen	Nach 120 d	X

Zur Ermöglichung einer zeitabhängigen Aussage zur Betonschädigung und zum visuell feststellbaren Korrosionszustand der Bewehrung wurde jeweils ein Prüfkörper je Prüflüssigkeit bzw. Lagerung nach 120 Tagen ausgebaut und untersucht. Das betraf die Prüfkörper 3, 6, 9 und 12. Die übrigen Prüfkörper verblieben bis zum Abschluss der auf 180 Tage festgelegten Beanspruchungsdauer in den jeweiligen Prüflüssigkeiten und wurden erst im Anschluss zerstörend untersucht.

Aus technischen Gründen wurde die Beaufschlagung bis zum 203. Tag fortgeführt, bevor die Spaltung der Prüfkörper erfolgen konnte.

Zur Untersuchung der Rissflächen und der durch die Prüflüssigkeit beaufschlagten Betonoberflächen auf Schädigungen wurden Teile des Prüfkörpers gespalten und aus Teilen Betonproben herausgeschnitten. Dies erfolgte zwei Tage nach dem Spalten der Prüfkörper, um Veränderungen durch längere Luftlagerung auszuschließen. Die folgende Abbildung zeigt die gewählte Teilung der Proben am Beispiel des Prüfkörpers Nr. 6.

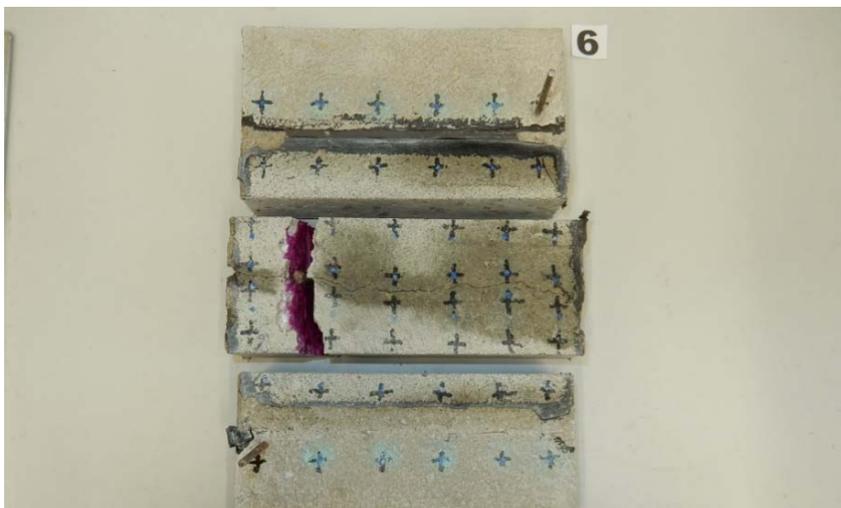


Abbildung 25 Teilung der Prüfkörper nach Abschluss der Beaufschlagungsdauer

An allen Prüfkörpern wurden zum einen die Rissfläche und zum anderen die durch die Prüflüssigkeit beaufschlagte, geschaltete Betonoberfläche der Prüfkörper untersucht. Hierfür wurden die Proben hälftig geteilt, um Anschliffe anzufertigen. Zu Ermittlung der Schädigungstiefe im Betongefüge senkrecht zur Betonoberfläche diente eine lichtmikroskopische Untersuchung. Mit Hilfe der Lichtmikroskopie wurden die Proben auf typische Schädigungen in Form von Bindemittelveränderungen, Lösen von Bindemittel, Lockerung der Gesteinskörnung in der Matrix, Treiberscheinungen, Verfärbungen oder sonstige Strukturänderungen untersucht. Zusätzlich wurde an den Bruchflächen und den Schliffflächen die Umsetzungstiefe unter Verwendung des pH-Wert Indikators Phenolphthalein bestimmt.

6 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

6.1 pH Wert Entwicklung Prüfmedien

Während der Beaufschlagung wurde der pH - Wert der Prüfflüssigkeiten in regelmäßigen Abständen gemessen. Dabei ließ sich, wie erwartet feststellen, dass sich der pH Wert der Prüfflüssigkeiten permanent veränderte. Bei den saurehaltigen Flüssigkeiten kam es zum Anstieg des pH Wertes und bei der Diammoniumlösung zur Verringerung.

Das folgende Diagramm enthält die grafische Darstellung der pH Wert Entwicklung über den Versuchszeitraum. Es ist gut zu erkennen, dass die Betonprüfkörper den pH Wert der Prüfflüssigkeiten beeinflussen und eine Wechselwirkung zwischen Flüssigkeit und Beton stattfindet, die sich im Laufe der Untersuchungen in unterschiedlichem Umfang reduziert.

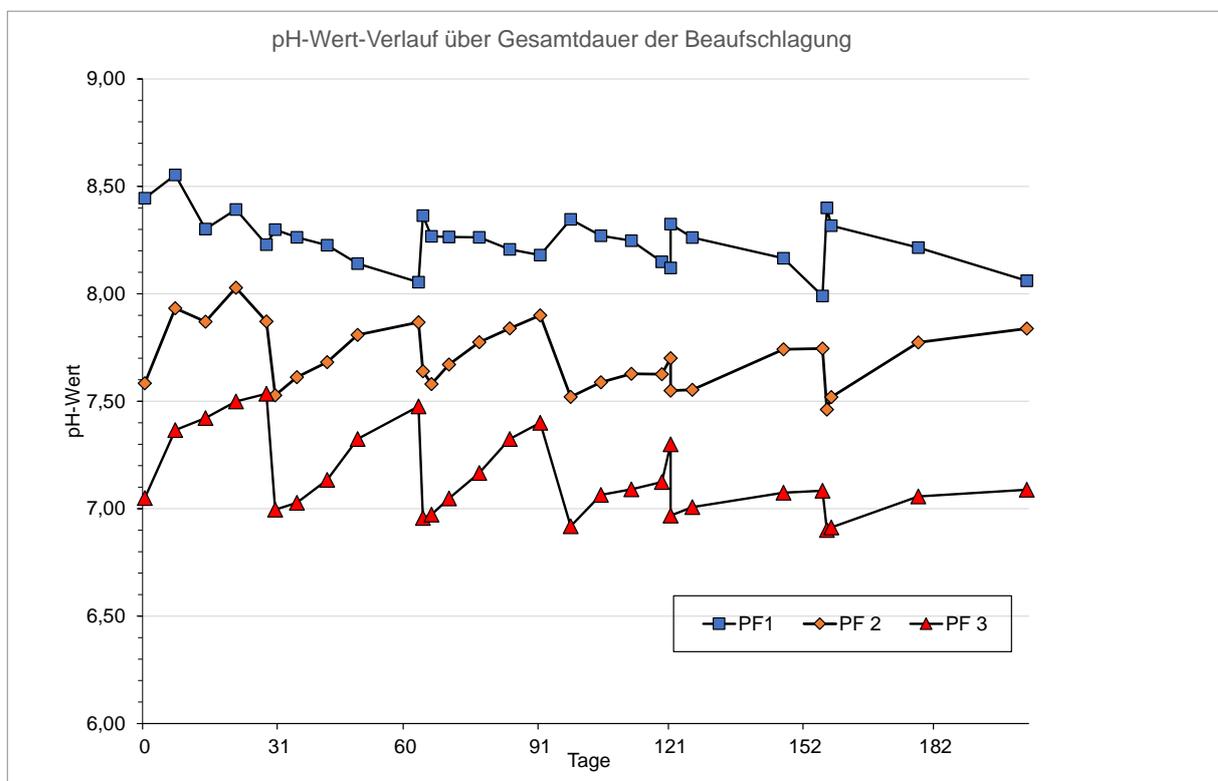


Abbildung 26 pH-Wert der Prüfflüssigkeiten

Relativ gleichmäßig verändern sich die pH Werte von PF 1 und PF 2. Während zu Beginn der Untersuchungen auf Grund des Betonalters größere Veränderungen im pH Wert erkennbar waren, flachte sich dieses Verhalten im Verlauf der Untersuchungen ab.

Interessant ist die Beobachtung, dass sich der pH Wert von PF 3 etwa ab dem 4. Wechselzyklus nur noch geringfügig im Gegensatz zum Versuchsanfang verändert. Hier ist vermutlich davon auszugehen, dass die Umsetzung im Kontaktbereich abgeschlossen ist und ein tieferes Eindringen in das Porensystem des Betons u. a. durch die entstandenen Umsetzungsprodukte behindert wird.

6.2 Betonkorrosion durch chemischen Angriff

Nach Abschluss der Beaufschlagung der Prüfkörper mit den ausgewählten Prüfflüssigkeiten bzw. der Parallellagerung im Laborklima wurde die Schädigungstiefe durch Messung der Umsetzungstiefe an frischen Betonbruchstellen bestimmt und der Korrosionszustand der Bewehrung festgestellt. Im Anhang 2 sind für alle Prüfkörper Daten und Fotodokumentation der wesentlichen visuellen Feststellungen und Messungen einzeln aufgeführt.

Die Umsetzungstiefe kennzeichnet den Bereich des oberflächennahen Betons, in dem der basische Charakter des Betons durch Umsetzung mit sauren Substanzen aus der Umgebung verlorengegangen ist. Die chemische Reaktion (Umsetzung) kommt zwischen dem $\text{Ca}(\text{OH})_2$ im Zementstein einerseits und der aus dem CO_2 der Luft gebildeten Kohlensäure oder sauren Substanzen aus den Prüfflüssigkeiten andererseits zustande. Die an den Prüfkörpern ermittelte Umsetzungstiefe entsteht durch Überlagerung der Einflüsse von CO_2 in Zeiträumen der Luftlagerung und von sauren Flüssigkeiten in Zeiträumen der Lagerung unter der Prüfflüssigkeit.

Der Nachweis der Umsetzung erfolgt durch Besprühen frischer Betonbruchflächen mit dem Indikator Phenolphthalein. Die Substanz nimmt im pH-Bereich zwischen 8,2 und 12 eine violette Färbung an. In diesem Bereich liegt der pH-Wert von nicht umgesetztem Beton. Der Abstand zwischen Betonoberfläche und Umschlaggrenze zwischen farblos und violett wird als Umsetzungstiefe gemessen. Zusätzlich wurde die Umsetzungstiefe ausgehend vom Riss gemessen. Dabei wurden die Rissflanken als Betonoberfläche betrachtet. Die Messungen wurden mit dem Tiefenmaß eines elektronischen Messschiebers vorgenommen. Sie hatten folgende Ergebnisse.

Tabelle 25 Umsetzungstiefe an der Betonoberfläche nach 180 d Beaufschlagung

Prüfkörper	Umsetzungstiefe (Oberfläche) [mm]			Mittelwert je Einwirkung
	Minimum	Maximum	Mittelwert	
Pk1	1,8	5,78	2,69	2,5
Pk2	1,49	2,85	2,36	
<i>Pk3¹</i>	2,0	2,55	2,27	--
Pk4	1,78	4,02	2,52	2,2
Pk5	1,4	2,74	1,98	
<i>Pk6¹</i>	1,35	2,11	1,72	--
Pk7	1,4	2,61	1,97	2,3
Pk8	2,26	3,64	2,64	
<i>Pk9¹</i>	1,92	2,11	2,01	--
Pk10	4,1	4,91	4,40	4,7
Pk11	4,28	5,66	4,96	
<i>Pk12¹</i>	4,0	4,67	4,33	--

¹ Nach 120 Tagen Beaufschlagung, geht nicht in Mittelwertbildung ein

Tabelle 26 Umsetzungstiefe, von den Rissflanken ausgehend

Prüfkörper	Umsetzungstiefe (Oberfläche) [mm]			
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Mittelwert je Einwirkung
Pk1	1,74	3,82	2,70	2,9
Pk2	2,52	3,45	3,14	
<i>Pk3¹</i>	<i>2,85</i>	<i>4,03</i>	<i>3,44</i>	
Pk4	1,87	2,81	2,19	2,4
Pk5	2,13	3,27	2,60	
<i>Pk6¹</i>	<i>2,23</i>	<i>2,42</i>	<i>2,32</i>	
Pk7	1,55	2,58	2,22	2,1
Pk8	1,79	2,16	2,03	
<i>Pk9¹</i>	<i>2,31</i>	<i>2,46</i>	<i>2,38</i>	
Pk10	1,88	5,89	3,89	4,0
Pk11	2,62	5,22	4,03	
<i>Pk12¹</i>	<i>3,02</i>	<i>4,91</i>	<i>3,96</i>	

¹ Nach 120 Tagen Beaufschlagung, geht nicht in Mittelwertbildung ein

Die Messwerte zeigen, dass die Umsetzungstiefe bei nicht flüssigkeitsgelagerten Proben am größten ist, sowohl bei Betrachtung der Mittelwerte als auch bei Betrachtung der maximalen Einzelwerte. Es fällt auf, dass an den Prüfkörpern 1 bis 8, die sowohl mit Prüflüssigkeit beaufschlagt wurden als auch an der Luft lagerten, kleinere Umsetzungstiefen gemessen wurden, als an den ausschließlich an der Luft gelagerten Prüfkörpern. Es soll deshalb der Einfluss der Flüssigkeitsbeaufschlagung rechnerisch von dem der Luftlagerung getrennt werden. Dazu wird die Karbonatisierungsrate unter Annahme eines Wurzel-aus-Zeit-Gesetzes für den Karbonatisierungsfortschritt für die luftgelagerten Prüfkörper 10 und 11 berechnet.

Alle Prüfkörper unterlagen dem folgenden Lagerungs- und Beaufschlagungsregime.

Herstellung	Zeit differenz	Beginn Beaufschlagung	Zeit differenz	Ende Beaufschlagung, Messung 1	Zeit differenz	Messung 2	Alter	Beaufschlagung	Luftlagerung bis Messung 2
	[d]		[d]		[d]		[d]	[d] [a]	[d] [a]
17.06.19	56	12.08.19	203	02.03.20	268	25.11.20	527 1,444	203 0,556	324 0,888

Für die ausschließlich luftgelagerten Prüfkörper 11 und 12 ergibt sich, ausgehend von der Betonoberfläche eine Karbonatisierungsrate von $3,9 \text{ mm}/\sqrt{a}$. Bei Ansatz dieser Karbonatisierungsrate ergäbe sich für die anderen Prüfkörper rechnerisch ein Karbonatisierungsanteil von

$$3,9 \text{ mm}/\sqrt{a} \cdot \sqrt{0,888} \cdot \sqrt{a} = 3,6 \text{ mm}.$$

Dieser rechnerische Anteil übersteigt deutlich die an den flüssigkeitsbeaufschlagten Prüfkörpern gemessene Umsetzungstiefe. Das ist zunächst ein überraschendes Ergebnis.

Der Vergleich der Betonoberflächen ohne und mit Säurebeanspruchung zeigte Unterschiede. Der nach Luftlagerung sichtbare Zustand ist gekennzeichnet durch eine durchgängige Zementhaut sowie eine aus dem Abreiben der Oberfläche resultierende Rauigkeit. Er entspricht dem Herstellungszustand. An den säurebeanspruchten Oberflächen war die Zementhaut abgetragen, die Oberseiten der feinen Gesteinskörnung waren zum Teil freigelegt. Die Oberfläche zeigte eine geringere Rauigkeit als im Herstellungszustand. Abbildung 27 zeigt den Zustand der Oberflächen im Vergleich.



Abbildung 27 Betonoberfläche, links: nur Luftlagerung, rechts: 20 % Säure

An den flüssigkeitsbeaufschlagten Oberflächen hatten sich Kristalle abgelagert, Abbildung 28. Da die Oberflächen nach der Beaufschlagung für die Potentialmessung durch Aufnehmen der Flüssigkeiten vorbereitet wurden, handelt es sich bei den Kristallen in der vorgefundenen Menge vermutlich nicht nur um Reste der verdampften Prüfliquidität.



Abbildung 28 Kristalle an der Betonoberfläche, Detail aus Abbildung 27 rechts

Aus den Beobachtungen lassen sich für den Prüfzeitraum folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Die Bewegung der Umsetzungsfront im Beton wird durch die Karbonatisierung dominiert. Bei ausschließlicher Luftlagerung würde an den beobachteten Probekörpern die Bewehrung früher von der Umsetzungsfront erreicht, als bei ausschließlicher Lagerung unter der Prüfflüssigkeit.
- Die Prüfflüssigkeiten bewirken einen chemischen Angriff, der zum Abtrag der Betonoberfläche führt. Der Säuregehalt der Prüfflüssigkeiten führte im Beaufschlagungszeitraum von 203 Tagen zu einem geringen, aber visuell erkennbaren Abtrag von Zementstein an der Betonoberfläche. Auf der Grundlage der fotografischen Muster in [49] ist von einer Abtrags-tiefe zwischen 0,5 mm und maximal 1 mm auszugehen. Luftlagerung führt naturgemäß nicht zu Betonabtrag.
- Nach der Flüssigkeitsbeaufschlagung der Betonoberfläche war vermutlich der Gasaustausch zwischen Atmosphäre und Porensystem des Betons eingeschränkt, so dass sich die Karbonatisierungsrate verringert hat. Unmittelbar nach der Beaufschlagung kommt die Sättigung der Poren mit Flüssigkeit als Ursache in Frage. Nach einigen Tagen Trocknungszeit entfällt jedoch dieser Effekt. Insgesamt hat sich das Diffusionsverhalten des trockenen Betons in Bezug auf CO₂ durch den Einfluss der Beaufschlagung mit den Prüfflüssigkeiten verschlechtert. Schließt sich an die Lagerung in einer sauren Flüssigkeit erneut Luftlagerung an, wird die ursprüngliche Karbonatisierungsrate nicht wieder erreicht. Die obenstehende Überschlagsrechnung zum Karbonatisierungsfortschritt kann diesen Umstand nicht abbilden.

Auf der Oberfläche der mit Flüssigkeit beaufschlagten Proben sind weiße kristalline Ablagerungen erkennbar. Auch im Riss in saurer Prüflüssigkeit gelagerter Proben sind auskristallisierte Reaktionsprodukte erkennbar. Die für Austauschvorgänge von Flüssigkeiten und Gasen verfügbare Rissbreite ist erheblich reduziert, Abbildung 29.



Abbildung 29 Riss mit Reaktionsprodukt, Prüfkörper Prüfkörper 8

Es ist zu vermuten, dass die Kristallisation auch außerhalb der Risse in den Poren des oberflächennahen Betons stattgefunden hat und die entstandenen Ablagerungen die CO_2 -Diffusion einschränken.

An den mit der Prüflüssigkeit für Gülle (neutral bis leicht basisch) beaufschlagten Proben sind ebenfalls Reaktionsprodukte an den Rissflanken sichtbar. Sie engen den Riss jedoch nur geringfügig ein, Abbildung 30.



Abbildung 30 Rissflanke mit Reaktionsprodukt, Prüfkörper Pk1

Die Beaufschlagung mit den unterschiedlichen Prüfflüssigkeiten führte zu Umsetzungstiefen, die kleiner waren, als die Karbonatisierungstiefe bei Luftlagerung der Prüfkörper. An den Rissen ist jedoch sichtbar, dass die Prüfflüssigkeiten ungeachtet dieser unerwarteten Beobachtung im Inneren des Betons zu Schäden geführt haben. Es ist nicht sichergestellt, dass die Ablagerungen in den Rissen dauerhaft die Schadensausbreitung verlangsamen. Vielmehr ist damit zu rechnen, dass die Reaktionsprodukte sich unter den schlechteren Austauschverhältnissen im Riss - und vermutlich auch in Poren - langsamer auflösen. Die Schäden sind bei höherem Säuregehalt der Flüssigkeiten deutlicher sichtbar.

Die Schädigung des Betons durch die Prüfflüssigkeiten zeigte sich im Beobachtungszeitraum an der Betonoberfläche sowie in den Rissen. An der Betonoberfläche waren Reaktionsprodukte weitgehend aufgelöst. In durchströmten Trennrissen ist das ebenfalls zu erwarten.

6.3 Potentialfeldmessungen

Die in regelmäßigen Abständen an allen Prüfkörpern durchgeführten Potentialfeldmessungen haben eine Vielzahl von Einzelwerten ergeben, die über ein entsprechendes Auswerteprogramm skaliert und graphisch umgesetzt wurden. Anlage 3 enthält die einzelnen Messbilder, getrennt nach Prüfkörpern und Beanspruchungsdauer.

Bei der graphischen Umsetzung der Messwerte sollten vor allem Unterschiede auf jeder einzelnen Probe sichtbar gemacht werden. Dazu wurde bei allen Proben eine einheitliche Farbabstufung in Schritten von 10 mV gewählt. Das ermöglicht bei den meisten Proben die Unterscheidung zwischen höheren und niedrigeren Potentialen und damit die Visualisierung von Potenzialgradienten. Dagegen ist ein Vergleich zwischen den Proben auf der Grundlage der farblichen Umsetzung der Messwerte nicht möglich.

Die Potentialfeldmessungen hatten folgende wesentliche Ergebnisse:

- Die Korrosionspotenziale zeigten deutliche Unterschiede in ihrer Größenordnung sowohl zwischen den einzelnen Proben als auch im Verlauf der Beaufschlagung einzelner Proben. Der Grund ist in den Einflüssen auf das Messergebnis zu sehen, die im Abschnitt 5.1.4 auf der Grundlage von [13] beschrieben wurden. Die im Vergleich zu realen Bauteilen sehr kleinen Proben vergrößern vermutlich den Anteil äußerer Einflüsse auf das Messergebnis.
- Innerhalb einer Messfläche waren oft nur geringe Potenzialunterschiede feststellbar.
- Die bei Korrosion der Bewehrung erwarteten Potenzialtrichter waren nur an einigen Proben erkennbar, weil die Beaufschlagung mit den Prüfflüssigkeiten bis zum Abschluss der Messung nicht zu wesentlichen Korrosionserscheinungen geführt hat. Die am Ende des Beobachtungszeitraumes festgestellten geringen Korrosionserscheinungen haben vermutlich erst bei der abschließenden Luftlagerung ihre Ausprägung erhalten und wurden deshalb unmittelbar im Anschluss an die Beaufschlagung mit Flüssigkeiten noch nicht detektiert.
- Die Potenzialdifferenz an Potenzialtrichtern ist geringer als bei realen Bauteilen oft beobachtet. Das entspricht der geringen Korrosionsaktivität und hat Auswirkungen auf die Darstellung der Ergebnisse.
- Messbare Potenzialverschiebungen, insbesondere Absenkungen des Potentials in der Nähe des Risses, wurden nur an den Proben 10, 11 und 12 festgestellt. Das deckt sich mit der Feststellung im Abschnitt 6.2, wonach die Luftlagerung am schnellsten zur Depassivierung des Stahls geführt hat.
- An den luftgelagerten Proben, die stellvertretend für Bauwerksaußenseiten oder andere, nicht flüssigkeitsberührte Anlagenteile stehen, fiel das relativ frühzeitige Einsetzen der Stahlkorrosion der Bewehrung im Rissbereich auf, während der ungerissene Beton keinen ungewöhnlich hohen Karbonatisierungskoeffizienten besaß. Zu vermuten, aber nicht durch Experimente belegt ist, dass die versuchstechnisch gewählte Rissgeometrie zu dem unerwarteten Verhalten geführt hat. Die geringe Höhe der gekerbten Probekörper erzwingt bei der Einstellung der Risse auf 0,3 mm Breite in Höhe der Bewehrung eine starke gegenseitige Rotation der beiden Prüfkörperhälften am Riss. Dadurch öffnet sich der Riss an der Betonoberfläche auf ca. 1 mm. Das ist, bei zusätzlich geringer Betondeckung von 20 mm, unter dem Gesichtspunkt der Dauerhaftigkeit kritisch, war aber aus versuchstechnischen Gründen zur Beurteilung notwendig.
- Grundsätzlich ist das gewählte Messverfahren geeignet, Korrosionsprozesse frühzeitig nachzuweisen.

7 Diskussion der Ergebnisse

7.1 Selbstdichtungsverhalten von Trennrissen

Die in [1] bis [3] durchgeführten Untersuchungen zum Durchflussverhalten von Trennrissen erfolgten sowohl mit realen Flüssigkeiten, die in landwirtschaftlichen Lageranlagen auftreten können als auch mit Modellflüssigkeiten. Letztere bilden in erster Linie die wesentliche chemische Zusammensetzung nach und enthalten planmäßig keine Feststoffe. Da die in landwirtschaftlichen Flüssigkeiten, Gärsubstraten, Gärresten, Silagesickersaft immer, wenn auch in unterschiedlichem Umfang und variierender Größenverteilung, enthaltenen Feststoffe einen wesentlichen Einfluss auf das Durchfluss- und Abdichtungsverhalten haben, wurden den Referenzflüssigkeiten teilweise auch inerte Feststoffe zugegeben. Im Ergebnis der Untersuchungen in [2] wurden inerte Feststoffzusätze vorgeschlagen, mit denen Laboruntersuchungen zum Durchflussverhalten mit Referenzflüssigkeiten durchgeführt werden können.

Die aus [1] bis [3] bewerteten Durchflussversuche können auf Grund der begrenzten Versuchszahl die Vielfalt der landwirtschaftlichen Flüssigkeiten und die damit verbundenen unterschiedlichsten Zusammensetzungen nicht annähernd nachbilden. Um dennoch zu belastbaren Aussagen zu gelangen, werden nachfolgend die Ergebnisse unabhängig von der Art der Lagerflüssigkeiten, nur nach signifikanten Eigenschaften sortiert, bewertet. Dazu gehören der Feststoffgehalt, die Korngrößenverteilung bzw. die Größe der Feststoffe in den Flüssigkeiten sowie der Flüssigkeitsdruck auf der Einwirkungsseite und die Rissbreite bzw. Rissgeometrie auf der Widerstandsseite. Je nach Anteil an Silagesickersaft beeinflusst auch der pH Wert dieser Flüssigkeiten unter Umständen das Ergebnis.

In Bewertung der vorliegenden Ergebnisse lassen sich die folgenden Thesen formulieren:

- (1) Die für Betonbauteile unter ständiger Einwirkung von Wasser bekannten Zusammenhänge zum „Selbsteheilungsverhalten“ lassen sich nicht bzw. nur in eingeschränktem Umfang auf das Durchflussverhalten von Trennrissen in landwirtschaftlichen Stahlbetonkonstruktionen übertragen. Die bei Wasser das Selbstdichtungsverhalten begünstigenden chemischen Vorgänge treten unter Einwirkung von Gülle mit Silagesickersaft überwiegend nicht auf, da einerseits das Durchfließen der Risse mit Wasser dafür Voraussetzung ist und andererseits die zum Teil betonangreifenden Eigenschaften der Flüssigkeiten die Bildung von Calciumkarbonat und die Nachhydratisierung be- oder verhindern können. Dennoch ist unter bestimmten Randbedingungen ebenfalls von einer Selbstdichtung durchströmter Trennrisse auszugehen, deren Mechanismus in [2] dargestellt ist.
- (2) Feststoffe in landwirtschaftlichen Flüssigkeiten liegen in sehr unterschiedlicher Größenverteilung vor. Maßgeblich an der Verringerung der Durchflussbreiten und dem Zusetzen von Strömungspfaden sind Partikel, deren Durchmesser D der Bedingung Spaltbreite Riss $w \geq D > 0,063$ mm genügt.
- (3) Ein Mindestfeststoffgehalt von 2 Masse-% führt bei den Lagerflüssigkeiten Gülle, Gärsubstrat bzw. Gärresten unter Berücksichtigung der in realen Bauwerken bei einer rechnerischen Rissbreitenbeschränkung von $w_k = 0,2$ mm auftretenden Trennrissen bis zu einem ständig wirkenden Flüssigkeitsdruck von 1 bar überwiegend nicht zum messbaren Flüssigkeitsaustritt.

- (4) Rissbreite und Rissgeometrie beeinflussen maßgeblich das Durchflussverhalten / Selbstdichtungsverhalten. Auf Grund der bezogen auf die Risslänge lokal variierenden Spaltbreiten (s. Abs. 2.2.4) kann es lokal begrenzt und temporär auch unter Einhaltung der Rissbreitenbeschränkung zum Flüssigkeitsaustritt kommen. Das belegen auch die Ergebnisse der stichprobenartigen Bauwerksuntersuchungen, siehe Abs. 4.2, bei denen vereinzelt Risse mit Rissbreiten von 0,1 mm zum Begutachtungszeitraum mit Feuchtstellen und Aussintungen behaftet waren. Ausführliche Darstellungen zur Messung von Rissbreiten und zur Bedeutung von rechnerischer und gemessener Rissbreite sind in [16] und [19] enthalten.
- (5) Der in den bewerteten Untersuchungen [1] bis [3] zur Verfügung stehende Silagesickersaft wies relativ hohe Feststoffgehalte auf, die nach Korngrößen- bzw. Schlämmanalyse im Wesentlichen (> 95 %) im Größenbereich von $\leq 0,063$ mm lagen. In dieser Größenordnung sind Feststoffpartikel nicht primär an der Induzierung der Selbstdichtungsvorgänge beteiligt. Die Zumischung von Silagesickersaft ist in jedem Fall mit einer Verdünnung der Lagerflüssigkeiten verbunden und beeinflusst den potentiellen Durchfluss durch einen Trennriss maßgeblich. Es ist von einem größeren Durchfluss auszugehen.
- (6) Unabhängig von der Rissbreite weisen Trennrisse unter dauerhafter und / oder zyklischer Flüssigkeitsbeanspruchung eine Durchfeuchtung der Rissflanken überwiegend über die gesamte Bauteildicke auf, mit der damit einhergehenden chemischen Beanspruchung durch in den Flüssigkeiten enthaltene Säuren oder betonangreifende Stoffe. In den Rissen bilden sich in Abhängigkeit von Art und Feststoffgehalt der Lagerflüssigkeiten unregelmäßige Ablagerungshorizonte aus, die zum lokalen Zusetzen der Risse führen können. Zyklische Beanspruchungen schieben die Ablagerungsfront weiter und führen, sofern die Lagergüter keine Inhaltsstoffe aufweisen, die den Beton chemisch angreifen, im Laufe der Zeit zum Zusetzen von Trennrissen. Dieser komplexe Mechanismus ist von sehr vielen Randbedingungen abhängig und lässt sich nicht verallgemeinernd konkretisieren.
- (7) Reaktionsprozesse zwischen den landwirtschaftlichen Flüssigkeiten und Beton auf Grund eines chemischen Angriffes analog Abschnitt 2.2.2 können zu Strukturveränderungen im Riss führen, die einerseits über Volumenvergrößerungen oder die Bildung von schwerlöslichen Umsetzungsprodukten den Durchflussquerschnitt verengen und andererseits im Fall der Bildung leicht löslicher Reaktionsprodukte bei Durchströmung des Risses den Durchfluss vergrößern können. Bei einem hohem Anteil von organischen Säuren in den Lagerflüssigkeiten besteht die Möglichkeit, dass lose Betonpartikel aus den Rissflächen, die zunächst eine Barriere gebildet haben, unter dem Einfluss der Säuren aufgelöst werden, so dass ihre Wirkung mit der Zeit nachlässt.

In der folgenden Abbildung sind die herausgearbeiteten wesentlichen Einflussfaktoren auf die potentielle Möglichkeit der Selbstdichtung von Trennrissen in Lagerbehältern mit landwirtschaftlichen Flüssigkeiten dargestellt.

Der rote Pfeil verweist auf den zu Bauwerken unter reiner Wasserbeanspruchung wesentlichen Unterschied, der maßgeblich an der Behinderung des Durchflusses von Trennrissen in landwirtschaftlichen Anlagen beteiligt ist.

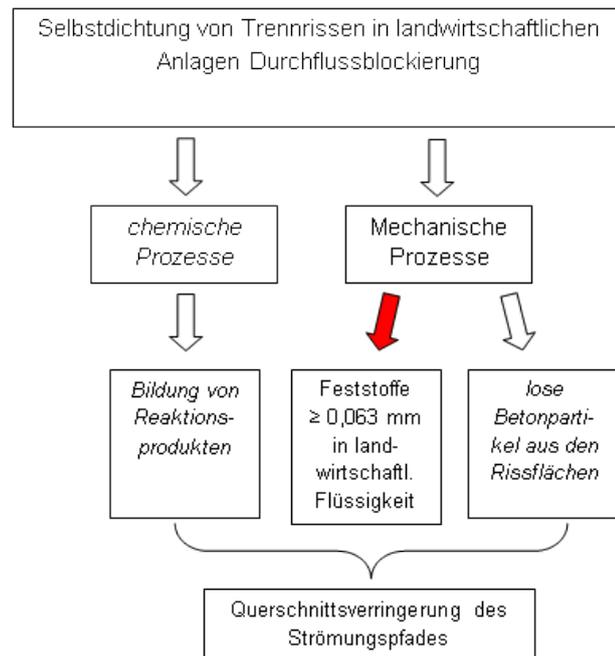


Abbildung 31 Einflussfaktoren auf die „Selbstdichtung“ von Rissen [1]

Mit der Begrenzung der rechnerischen Rissbreite auf 0,2 mm und entsprechender baupraktischer Umsetzung ist weitestgehend sichergestellt, dass keine als allgemein wassergefährdend eingestuft Flüssigkeiten aus Lagerbehältern austreten und ins Grundwasser gelangen können. Die Begrenzung deckt in ausreichendem Umfang sowohl die Streuung tatsächlich auftretender Rissbreiten (siehe Abbildung 5) sowie die Tatsache ab, dass bei größeren Risslängen durchaus Abschnitte mit lokal 0,2 mm überschreitende Querschnittstrennungen (siehe Abschnitt 2.2.4) auftreten können.

7.2 Einflüsse auf die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton

Die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton wird einerseits durch den Widerstand des Betons gegen Umgebungseinflüsse und andererseits durch den Schutz der Bewehrung gegen Korrosion bestimmt. In diesem Forschungsprojekt wurden Fragen der Betonkorrosion durch chemischen Angriff und der Bewehrungskorrosion durch die Wirkung von Lagerflüssigkeiten und CO₂ behandelt. Im Zusammenhang mit der Umsetzungstiefe des Betons wurden unter Abschnitt 2.2.2 Aspekte des chemischen Angriffs betrachtet. Insbesondere von den sauren Anteilen der landwirtschaftlichen Flüssigkeiten geht ein chemischer Angriff auf die Betonoberfläche, aber auch auf die Flanken von Rissen aus.

Im Ergebnis der chemischen Umsetzung des Betons tritt eine Depassivierung der Stahloberfläche durch Verlust der basischen Umgebung ein. Der Zeitpunkt des Eintrittes der Korrosion hängt, wie nachfolgend dargestellt, von den Betoneigenschaften und den geometrischen und hydraulischen Verhältnissen an Rissen ab.

Im Anhang 2 ist der Korrosionszustand der Bewehrung fotografisch dokumentiert. Außerhalb der Risse waren die Bewehrungsstäbe durchgängig blank, ohne Anzeichen von Korrosion. Die Umsetzungstiefe war kleiner als die Betondeckung der Bewehrung, so dass es noch nicht zur Depassivierung des Stahls kam. Im Bereich der Risse zeigte sich an der Bewehrung das in Tabelle 27 zusammengefasste Bild.

Tabelle 27 Korrosionszustand der Bewehrung im Riss

Prüfkörper	Einwirkung	Zustand	Bemerkung
P1	PF 1	oberflächlicher Rostansatz	
P2		Rostspuren	
P3		blank	kürzere Einlagerung
P4	PF 2	oberflächlicher Rostansatz	
P5		Rost, beginnende Narbenbildung	
P6		nahezu blank	kürzere Einlagerung
P7	PF 3	oberflächlicher Rostansatz	
P8		oberflächlicher Rostansatz	
P9		nahezu blank	kürzere Einlagerung
P10	Laborklima	Rost, beginnende Narbenbildung	
P11		Rostnarben	
P12		Rostansatz	kürzere Einlagerung

Die Feststellungen zeigen, dass die Beobachtungszeit der Prüfkörper in diesem Forschungsvorhaben annähernd mit dem Beginn nennenswerter Korrosionserscheinungen an der Bewehrung zusammenfällt. Dabei war die Korrosion der luftgelagerten Proben am weitesten fortgeschritten, Abbildung 32.



Abbildung 32 korrodierte Bewehrung, Prüfkörper P11, Luftlagerung

Wegen des wenig behinderten Stoffaustauschs im Riss ist davon auszugehen, dass bei dieser Lagerungsart die Karbonatisierung des Betons und die Depassivierung des Stahls früher als bei den anderen Lagerungsarten eingetreten sind.

Bei den Proben mit Flüssigkeitseinwirkung ist der Korrosionszustand das Ergebnis zweier gegenläufiger Effekte. Lösungen mit höherem Säureanteil führen grundsätzlich zu einer schnelleren Umsetzung des Betons. In den nicht durchströmten Biegerissen hat sich jedoch in einigen Fällen eine Barriere aus Reaktionsprodukten der Umsetzung gebildet, die den Korrosionsangriff auf den Stahl verzögert, Abbildung 33 und Abbildung 34. Ähnlich wie bei der Betrachtung der Umsetzungstiefen führt auch hier ein höherer Säureanteil nicht zwangsläufig zu schnellerem Korrosionsangriff, weil der Stoffaustausch im Riss durch Reaktionsprodukte behindert wird.

Dieser Zustand ist bei den in landwirtschaftlichen Behältern überwiegend als Trennriss auftretenden Rissen im Fall einer Durchströmung nur in geringem Maße zu erwarten. Hier sind insbesondere im Zusammenhang mit zyklischen Befüllungs- und Entleerungsvorgängen eine schnellere Umsetzung des Betons und ein früherer Korrosionsbeginn bei steigendem Säuregehalt zu erwarten.

Abbildung 33 Rostansatz, Prüfkörper P1, Flüssigkeit PF1, Einwirkungsseite unten im Bild



Abbildung 34 Rostansatz, Prüfkörper P8, Flüssigkeit PF3, Einwirkungsseite unten im Bild

8 Zusammenfassung

In dem bearbeiteten Forschungsvorhaben sollten alle bereits vorliegenden experimentellen Erkenntnisse zum Durchflussverhalten von Trennrissen unter der Einwirkung landwirtschaftlicher Flüssigkeiten (Gülle, Gärsubstrate, Gärreste) zusammengefasst und bewertet werden. Für die Bewertung standen insgesamt 26 Versuchsreihen zur Verfügung, in denen die Durchlässigkeit von Trennrissen sowohl mit realen Flüssigkeiten als auch mit den vom DIBt festgelegten entsprechenden Referenzflüssigkeiten untersucht wurde.

Unabhängig von der sehr großen Varianz möglicher realer Flüssigkeiten und ihrer das Durchflussverhalten beeinflussenden Eigenschaften hat sich gezeigt, dass die an Lagerbehältern bei Umsetzung der Begrenzung der rechnerischen Rissbreite auf 0,2 mm auftretenden Trennrisse nicht zu einem dauerhaften Austreten von wassergefährdenden Flüssigkeiten führen. Das gilt unabhängig von der Flüssigkeitsdruckhöhe für alle mit Feststoff angereicherten Lagerflüssigkeiten. Die in Versuchen mit Referenzflüssigkeiten unter Feststoffzugabe anfangs festgestellten temporären Durchflüsse sind in weiteren Beaufschlagungszyklen in der Regel zum Stillstand gekommen. Damit werden die Ergebnisse, die mit realen Flüssigkeiten gewonnen wurden, durch die als Worst – Case - Flüssigkeiten zu bezeichnenden Referenzmedien bestätigt.

Temporäre oder permanente Durchfeuchtungen mit Aussinterungen sind allerdings nicht auszuschließen und betreffen in der Realität auch alle Trennrisse in vertikal orientierten Bauteilen (Wandbereiche). Die bei stichprobenartig begutachteten Behälter in landwirtschaftlichen Anlagen festgestellten Durchfeuchtungen und Aussinterungen traten vereinzelt auch bei optisch gemessenen Rissbreiten auf, die kleiner als 0,2 mm waren. Sie stellen im Sinne des Gewässerschutzes keine Gefährdung dar, haben allerdings Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit der Bauwerke.

Die Dauerhaftigkeit von landwirtschaftlich genutzten Stahlbetonkonstruktionen bestimmt sich im Wesentlichen über den Widerstand des Betons gegen die Einwirkung von Flüssigkeiten, die den Beton chemisch angreifen oder korrosionsfördernd auf den Bewehrungsstahl wirken.

Zur Bewertung der Betonkorrosion durch chemischen Angriff unter der Einwirkung realer Flüssigkeiten oder der entsprechenden Referenzmedien wurde in allen bisherigen Forschungsvorhaben die Veränderung der Alkalität des beaufschlagten Betons herangezogen. Die Untersuchungen erfolgten an Schlißproben oder direkt an frischen Prüfkörperbruchflächen unter Verwendung der pH-Wert Indikatoren Phenolphthalein oder Thymolphthalein. Damit lassen sich die Bereiche im Beton mit noch ausreichender Alkalität zum Schutz des Bewehrungsstahls und die Bereiche, in denen es bereits zu chemischen Umsetzungsprozessen gekommen ist, optisch voneinander trennen.

Die zwischen 2013 und 2018 bearbeiteten Forschungsthemen betrachteten unterschiedliche Aspekte der Lagerung landwirtschaftlicher Flüssigkeiten. Diesen Zwecken untergeordnet, unterschieden sich auf der Einwirkungsseite die Flüssigkeiten und, daran angepasst auf der Widerstandsseite die Betoneigenschaften wegen der Anforderungen aus den jeweils maßgebenden Expositionsklassen. Ein unmittelbarer Vergleich einzelner Werte der Umsetzungstiefe, die zwischen 0,1 mm und 11,03 mm liegen, ist deshalb nicht sinnvoll. In Abschnitt 6.2 wird gezeigt, dass die Umsetzungstiefe zusätzlich durch das Regime aus Luftlagerung und Flüssigkeitsbeanspruchung sowie durch den Stoffaustausch im Riss (Möglichkeit der Durchströmung) beeinflusst wird. Die Lösung bzw. Auswaschung von Reaktionsprodukten oder deren Ablagerung im Riss beeinflussen den Fortschritt der Umsetzung, und in der Folge, den Korrosionsangriff auf die Bewehrung.

In den aktuell durchgeführten experimentellen Untersuchungen sollten ergänzend die Auswirkungen ausgewählter Referenzflüssigkeiten, die Jauche und Gülle mit unterschiedlichen Anteilen an Silagesickersaft nachbilden, auf den Bewehrungsstahl untersucht werden. Dazu wurden Versuchskörper mit einem die Bewehrung kreuzenden Riss konzipiert. Aus versuchstechnischen Gründen wurde wegen der besseren Handhabung und Einstellbarkeit der Rissbreite die Erzeugung eines Biegerisses in den Prüfkörpern gewählt. Die Erzeugung von Trennrissen war wegen der jeweils erforderlichen Bewegung der Proben zur Reinigung und Messvorbereitung für die Potentialfeldmessungen versuchstechnisch kaum möglich.

Die Rissbreite in Höhe der Bewehrungslage betrug 0,3 mm. Über eine maximale Dauer von 180 Tagen wirkten die Flüssigkeiten auf den Riss und die beiderseits sich anschließende Betonoberfläche ein.

Bei den auf Grund der begrenzten Probenanzahl eingeschränkten Variationsmöglichkeiten der Randbedingungen nur als Tastversuche zu bezeichnenden Untersuchungen ließen sich naturgemäß nicht alle Einflussfaktoren auf die Bauteile erfassen und abbilden. Einige der festgestellten Effekte bedürfen einer längerfristigen Betrachtung, die über den Beaufschlagungszeitraum von maximal 180 Tagen deutlich hinausgeht. Die Feststellungen an den flüssigkeitsbeaufschlagten Prüfkörpern belegen, dass zum Abschluss der Beaufschlagung gerade das Ende der Einleitungsphase, siehe Abbildung 4 und die Depassivierung des Bewehrungsstahls erreicht waren. Die anschließend zu erwartenden Schäden konnten im Beobachtungszeitraum noch nicht nachgewiesen werden. Daraus ist jedoch nicht zu schließen, dass längerfristig keine Schäden auftreten.

Die unter Einwirkung der Prüfflüssigkeiten erfolgte Umsetzung des Betons und die damit verbundene Entstehung von Reaktionsprodukten haben zu lokalen Querschnittsreduzierungen der

Risse geführt. Durch die gewählten geometrischen und hydraulischen Verhältnisse war die Reaktion zwischen Beton und den in den Flüssigkeiten enthaltenen Säuren bzw. betonangreifenden Stoffen gegenüber einer Reaktion mit dem Bewehrungsstahl begünstigt. Damit ist keine Aussage zum Korrosionsverhalten von Bewehrungsstahl unter direktem Einfluss von säurehaltiger Flüssigkeit abzuleiten. Sofern davon auszugehen ist, dass es bei begrenzter Rissbreite auch bei Trennrissen nicht zum Durchströmen kommt, sondern nach kurzem Durchfluss eine Strömungspfadblockierung stattfindet, würden ähnliche Verhältnisse wie in den Prüfkörpern auch in realen Bauwerken zu erwarten sein. Dabei ist zu berücksichtigen, dass zyklische Befüllungs- und Leerungsvorgänge das Sauerstoffangebot im Riss verändern sowie Einfluss auf weitere Transport- und Lösungsvorgänge von Korrosionsprodukten in den Rissen haben können.

Aus den vorliegenden Untersuchungen lassen sich die nachfolgenden Thesen formulieren:

- Die unter der Einwirkung von betonangreifenden Flüssigkeiten in landwirtschaftlichen Lagerbehältern auf Beton und Bewehrungsstahl stattfindenden Prozesse sind äußerst komplex und werden neben den Flüssigkeiten u.a. auch von technologischen Randbedingungen (Befüllung, Entleerung etc.) beeinflusst.
- Lagerflüssigkeiten ohne betonschädigende Inhaltsstoffe (Säuren, Salze etc.) haben praktisch keinen negativen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit
- Betonschädigende Inhaltsstoffe der Lagerflüssigkeiten (Säuren, Salze etc.) greifen zunächst den Beton an. Die sich bildenden Reaktionsprodukte beeinflussen den Stoffaustausch im Riss und verzögern damit zunächst den Korrosionsangriff auf den Bewehrungsstahl durch Inhaltsstoffe der Lagerflüssigkeiten. Darüber hinaus gibt es Wechselwirkungen zwischen Durchfluss und Ablagerungen der Reaktionsprodukte im Trennriss.
- Häufige Befüll- und Entleerungsprozesse begünstigen den Stoffaustausch im Riss und damit den Korrosionsangriff auf den Bewehrungsstahl, auch bei Biegerissen; Durch die mit dem Füllen und Entleeren i.d.R. verbundenen Rissbreitenänderungen ergeben sich Auswirkungen auf die Durchströmung im Riss und auf die Ablagerungen von Reaktionsprodukten.
- Der in Gärsubstraten in Abhängigkeit von den Inhaltsstoffen (Wirtschaftsdünger, Silage, Getreide, Ganzpflanzensilage etc.) unterschiedlich hohe Schwefelgehalt kann entsprechend hohe Sulfatgehalte bedingen. Da aktuell keine belastbaren Informationen vorliegen, zu welchen Anteilen und zu welchem Zeitpunkt innerhalb der Lager- und Gärprozesse der total enthaltene Schwefel als Sulfat oder organisch gebunden vorliegt, ist eine abschließende Bewertung nicht möglich. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass Gärsubstrate Inhaltsstoffe aufweisen, aus deren Größenordnung sich bei Bewertung des Betonangriffs gemäß DIN 4030 [41] für den Beton die Notwendigkeit von Beton mit Eigenschaften entsprechend der Expositionsklasse XA 3 ergibt, um den Dauerhaftigkeitsanforderungen zu genügen. Selbst wenn nur ein Teil des in Gärsubstraten vorliegenden Schwefels als Sulfat verfügbar ist, was zur Zeit keiner Quantifizierung zugänglich ist, sollte zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit dieser Thematik zukünftig verstärkt Aufmerksamkeit geschenkt werden.
- Im Hinblick auf die ggf. weiter verfolgte Ansäuerung von Gülle mit Schwefelsäure, die z.Z. gemäß der Richtlinie 2010/75/EU als „beste verfügbare Technik“ zur Minderung von Ammoniakemissionen erprobt wird, kann es zu einer weiteren Erhöhung der Sulfatgehalte in den Lagermedien kommen. Die stichprobenartige Auswertung vorliegender Analysen von

Gärsubstraten, Gärresten und Wirtschaftsdünger hat ergeben, dass bereits in den nicht zusätzlich angesäuerten Flüssigkeiten zum Teil sehr hohe Sulfatgehalte vorliegen können. Daher sollte bei Einführung der aktiven Ansäuerung geprüft werden, ob ggf. zusätzliche Schutzmaßnahmen für den Beton in solchen Anlagen erforderlich sind.

Unter dem Gesichtspunkt der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonkonstruktionen unter Einwirkung landwirtschaftlicher Flüssigkeiten sind die Einwirkungen auf die Betonoberfläche und auf den Bewehrungsstahl zu betrachten. Einen Spezialfall der Einwirkung auf die Betonoberfläche stellt der chemische Angriff, insbesondere durch saure Bestandteile der landwirtschaftlichen Flüssigkeiten, auf den Beton der Rissflanken dar. Hier ist früher mit der Umsetzung der basischen Bestandteile des Zementsteins nahe der Bewehrung zu rechnen, als bei der Umsetzung des Zementsteins, die von der Betonoberfläche ausgeht. Die Gefahr der Depassivierung der Bewehrung ist naturgemäß im Bereich von Rissen am größten. Die Versuche haben gezeigt, dass sich bei nicht durchströmten Rissen Reaktionsprodukte im Riss ablagern und dadurch die weitere Umsetzung des Zementsteins verzögern. Es ist folglich nicht nur aus Gründen des Gewässerschutzes, sondern auch für die Dauerhaftigkeit der landwirtschaftlichen Bauwerke von großer Bedeutung, den Durchfluss durch Risse zumindest stark einzuschränken, besser noch, ihn zu verhindern.

Zur Geschwindigkeit der Schadensentwicklung lieferten die Versuche im Rahmen dieses Forschungsvorhabens keine ausreichenden Informationen, da sich im Beobachtungszeitraum noch keine messbaren Schäden eingestellt hatten.

Anhaltspunkte im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit ergeben sich jedoch aus dem Zustand der untersuchten realen Behälter. Wie im Abschnitt 4 beschrieben wurde, existieren Behälter, die älter als 30 Jahre sind und visuell keine Anzeichen für den Verlust der Nutzungseigenschaften und der Standsicherheit zeigten. Dagegen waren an älteren Bauwerken mit vergleichsweise breiten Rissen Anzeichen für Korrosion der Bewehrung erkennbar, jedoch noch ohne Hinweise auf ein bevorstehendes Versagen. Aus der Beobachtung der realen Bauwerke ist zu schließen, dass die in [43] und [44] zugrunde gelegte Nutzungsdauer von 15 bis 30 Jahren von Behältern, die nach aktuellen Vorschriften errichtet und angemessen gewartet wurden, erreicht wird. Zur Bewertung einzelner Einwirkungen sind experimentelle Untersuchungen mit längeren Einwirkungszeiten zu empfehlen.

9 Quellenverzeichnis

Literatur, Monographien

- [1] Hornig, U.; Zietmann, N.; Dehn, F. „Untersuchungen zum Selbstdichtungsverhalten von Trennrissen in landwirtschaftlich genutzten Stahlbetonkonstruktionen“ 2012
- [2] Hornig, U.; Schmidt, C; Dehn, F.: Dauerhaftigkeit von Stahlbetonkonstruktionen zur Lagerung von Gärresten und Gärsäuremischflüssigkeiten. Abschlussbericht Forschungsvorhaben Nr. 15001 – 014 R, Vorhaben Nr.: P52-3-19.75-1450/1:
- [3] Wickert, R.; A. König, A; Dehn, F.: Dauerhaftigkeit von Stahlbetonkonstruktionen zur Lagerung von Gärsubstrat- und Gärrest- Mischflüssigkeiten – Fortsetzung und Vertiefung des F/E-Berichtes Nr. 15001-014, Vorhaben Nr. P52-5-19.75.1-2007/17:
- [4] Götze, M.: „Dauerhaftigkeit von Stahlbetonkonstruktionen zur Lagerung von Gärsubstraten und –resten aus der Landwirtschaft, Einfluss landwirtschaftlicher Flüssigkeiten in Rissen auf die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton“ Masterarbeit, Februar 2020
- [5] Gerlach, Jesko (2017): Ein performancebasiertes Konzept zur Dauerhaftigkeitsbemessung chemisch beanspruchter Betonbauteile. Berichte aus dem Institut für Baustoffe, Heft 16. Universität Hannover
- [6] Raupach, M., Orlowsky, J.: Schutz und Instandsetzung von Betontragwerken, Verlag Bau + Technik 2008
- [7] Biczók, I.; Betonkorrosion und Betonschutz, Bauverlag Wiesbaden, Berlin, 1968
- [8] König, A.; Rasch, S.; Neumann, T.; Dehn, F.: Betone für biogenen Säureangriff im Landwirtschaftsbau. In: Beton- und Stahlbetonbau, 105 (11), 714-724,
- [9] Franke, L. (1996): Korrosion von Zementstein in sauren Wässern. In: Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen – Berichtsband zum 4. Internationalen Kolloquium an der Technischen Akademie Esslingen vom 17.-19.12.1996. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, S. 1385-1401.
- [10] Kiekbusch, Jana (2007): Säureangriff auf zementgebundene Materialien: Untersuchung und Modellierung des Zementstein-Säure-Systems und rechnerische Simulation der chemischen Reaktionen mittels Gibbs-Energie-Minimierung unter Berücksichtigung der Reaktionskinetik. Berichte aus dem Bauwesen. Shaker Verlag.
- [11] Lichti, Fabian u.a.: Bewertung von pH-Wert senkenden Systemen durch Ansäuerung zur Verringerung der Ammoniakemissionen in Stall und Feld, Projekt A/17/03, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Landtechnik und Tierhaltung, Laufzeit: 01.03.2017 -31.12.2019
- [12] Tuutti, K.: CORROSION OF STEEL IN CON-CRETE, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1982.
- [13] Keßler, Sylvia, Zur Verwertbarkeit von Potentialfeldmessungen für die Zustandserfassung und -prognose von Stahlbetonbauteilen – Validierung und Einsatz im Lebensdauermanagement, Dissertation München 2014
- [14] Meichsner, H.; Rohr – Suchalla, K.; Risse in Beton und Mauerwerk, Ursachen, Sanierung, Rechtsfragen; Fraunhofer IRB Verlag, 2. Auflage 2011

- [15] Dorst, Ulrich; Wagner, Thomas (2017): Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV) - Mit Einführung, Vorschriftentext, amtlicher Begründung und ergänzenden Erläuterungen. Richard Boorberg Verlag, Stuttgart.
- [16] Arashnia, P., Jahn, Th., Meichsner, H.: Notwendige und mögliche Genauigkeit der Rissbreitenmessung im Stahlbetonbau. Der Bausachverständige, Heft 2/2020, Fraunhofer IRB-Verlag
- [17] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Erläuterungen zu DIN 1045-1. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 525, Beuth – Verlag Berlin 2003
- [18] Meichsner, H.: Über die Selbstdichtung von Trennrissen in Beton. Beton- und Stahlbetonbau 87 (1992) 4, S. 95 bis 99
- [19] Meichsner, H.; Röhling, St.: Rechen- und Messwerte der Rissbreite im Stahlbetonbau Eine differenzierte Sicht auf die Messung und Definition der Rissbreite im Stahlbetonbau. Beton- und Stahlbetonbau 113 (2018) Heft 4, S. 307 - 317
- [20] Schießl, P.: Zur Frage der zulässigen Rissbreite und der erforderlichen Betondeckung im Stahlbetonbau unter besonderer Berücksichtigung der Karbonatisierung des Betons. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 255, Verlag W. Ernst & Sohn Berlin, München, Düsseldorf 1976
- [21] Schießl, Peter (1986): Einfluß von Rissen auf die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) Heft 370, Beuth Verlag, Berlin.
- [22] Deutscher Beton- und Bautechnik Verein E.V; Heft , Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen – Aktuelle Regelwerke und Hinweise zum Stand der Technik, Ausgabe 2012; Christoph Dauberschmidt, C.; Vestner, S. Bauwerksdiagnose bei chloridbelastetem Beton
- [23] Schweizer Ingenieur- und Architekten-Verein SIA (1993): Durchführung und Interpretation der Potentialfeldmessung an Stahlbetonbauteilen. Merkblatt SIA 2006.
- [24] Wendler-Kalsch, Elsbeth; Gräfen, Hubert (1998): Korrosionsschadenkunde. Springer-Verlag, Berlin.
- [25] DLR Merkblatt 397 Gärreste im Ackerbau effizient nutzen; 2. Auflage 10/2017
- [26] Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft; Inhaltsstoffe von Biogassubstraten und Gärresten (Datenblätter) www.tll.de/www/daten/publikationen/merkblaetter/bwx31012.pdf
- [27] Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Freistaat Sachsen, Tabelle 22 Umrechnungsfaktoren einzelner Nährstoffe nach Element oder Bindungsform. www.landwirtschaft.sachsen.de/download/Tab_22_Umrechnung_Naehrst_Element_Bindg_sform_2021_03_02.pdf
- [28] Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg, Außenstelle Forchheim, Ref. 11: Gärreste aus Biogasanlagen - Nähr- und Schadstoffe, Einsatzmöglichkeiten im Ackerbau, Stand 2007
- [29] Antwort der Landesregierung auf eine kleine Anfrage zur schriftlichen Beantwortung Abgeordnete Dorothea Frederking (BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN) Bestand und Größe von Biogasanlagen und Biomassenutzung in Sachsen- Anhalt, Kleine Anfrage - KA 6/8175

Normen, Richtlinien, Merkblätter, Gesetze

- [30] DIN 11622-2 2004-06; Gärfuttersilos und Güllebehälter – Teil 2: Bemessung, Ausführung, Beschaffenheit, Gärfuttersilos und Güllebehälter aus Stahlbeton, Stahlbetonfertigteilen, Betonformsteinen und Betonschalungssteinen,
- [31] DIN 11622-2:2015-09; Gärfuttersilos, Güllebehälter, Behälter in Biogasanlagen, Fahrsilos – Teil 2: Gärfuttersilos, Güllebehälter und Behälter in Biogasanlagen aus Beton
- [32] Gesetz zur Neuordnung des Wasserhaushaltes WHG
- [33] AwSV: Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen vom 18. April 2017
- [34] DüngG Düngegesetz vom 9. Januar 2009 (BGBl. I S. 54, 136), das zuletzt durch Artikel 277 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist
- [35] DüV (2017): Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen. Düngeverordnung vom 26. Mai 2017 (BGBl. I S. 1305)
- [36] DIBt; Medienlisten für Abdichtungsmittel und Dichtkonstruktionen in Anlagen zum Lagern, Abfüllen und Umschlagen wassergefährdender Stoffe, Stand: Juni 2018
- [37] DIN 1045-2 (Juli 2001): Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität.
- [38] DIN 1045-3 (März 2012): Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 3: Bauausführung – Anwendungsregeln zu DIN 13670.
- [39] DIN 1045-4 (Februar 2012): Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 4: Ergänzende Regeln für die Herstellung und die Konformität von Fertigteilen.
- [40] DIN EN 1062-7:2004-08 Beschichtungsstoffe - Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für mineralische Substrate und Beton im Außenbereich - Teil 7: Bestimmung der rissüberbrückenden Eigenschaften;
- [41] DIN 4030-1 (Juni 2008): Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase – Teil 1: Grundlagen und Grenzwerte.
- [42] DIN EN 206 (Januar 2017): Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität.
- [43] DIN EN 1990 (Dezember 2010): Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010
- [44] DIN EN 1990/NA (Dezember 2010): Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung
- [45] DIN EN 1992-1-1 (Januar 2011): Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.
- [46] DIN EN 1992-3 (Januar 2011): Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 3: Silos und Behälterbauwerke aus Beton.
- [47] DIN EN 13670 (März 2011): Ausführung von Tragwerken aus Beton.
- [48] DIN EN 1504-9 (November 2008) Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Definitionen, Anforderungen,

Qualitätsüberwachung und Beurteilung der Konformität – Teil 9: Allgemeine Grundsätze für die Anwendung von Produkten und Systemen;

- [49] Deutscher Beton- und Bautechnik Verein E.V. Merkblätter Betontechnik: Chemischer Angriff auf Beton Bewertung des Angriffsgrads und geeignete Schutzprinzipien, Fassung Juli 2014
- [50] Deutscher Beton- und Bautechnik Verein E.V. Merkblätter Betontechnik: Chemischer Angriff auf Beton, Fassung Mai 2017
- [51] Deutscher Beton- und Bautechnik Verein E.V. Merkblätter Bautechnik: Begrenzung der Rissbildung im Stahlbeton- und Spannbetonbau; Fassung Mai 2016
- [52] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. (DAfStb): DAfStb-Richtlinie – Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (BUmwS). Ausgabe März 2011.
- [53] Merkblatt für Elektrochemische Potentialmessungen zur Detektion von Bewehrungsstahlkorrosion, Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e.V. Ausgabe 2014
- [54] American Society for Testing and Materials: ASTM Standart C 876-91 (1997): Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steet in Concrete, Philadelphia, USA (1991).
- [55] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA): Arbeitsblatt DWA-A 779 - Technische Regel wassergefährdender Stoffe (TRwS) - Allgemeine Technische Regelungen. Ausgabe April 2006.
- [56] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA): Arbeitsblatt DWA-A 792 - Technische Regel wassergefährdender Stoffe (TRwS) - Jauche-, Gülle- und Silagesickersaftanlagen (JGS-Anlagen). Ausgabe August 2018.

10 Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

Tabelle 1	Klassifizierung der Nutzungsdauer nach DIN EN 1990 [43]	8
Tabelle 2	Klassifizierung des chemischen Angriffs auf Beton in Anlehnung an [5], [7].....	10
Tabelle 3	pKs – Werte ausgewählter Säuren [2]	11
Tabelle 4	Prinzipien der Rissbreitenmessung in Erweiterung von [14].....	22
Tabelle 5	Betonzusammensetzung der verwendeten Rissprüfkörper	24
Tabelle 6	Zusammensetzungen verwendeter Prüfflüssigkeiten [1] bis [3].....	26
Tabelle 7	Zusammenstellung Durchflussversuche	27
Tabelle 8	Ergebnisse von Durchflussversuchen an Trennrissen	29
Tabelle 9	Untersuchungsverfahren aus [3].....	32
Tabelle 10	Untersuchungen zum Verhalten von Beton.....	33
Tabelle 11	Umsetzungstiefe von XA 1 Betonen aus [2].....	36
Tabelle 12	Schädigungstiefe von XA 3 Betonen aus [3]	36
Tabelle 13	Hauptbestandteile von Gärsubstraten in Sachsen - Anhalt auf Basis von [29]	37
Tabelle 14	Auswertung Laboranalysen Gärsubstrate	37
Tabelle 15	Auswertung vorliegender Laboranalysen zu Gärresten.....	38
Tabelle 16	Laboranalysen zur Zusammensetzung von Silagesickersaft.....	40
Tabelle 17	Gegenüberstellung Grenzwerte chemischer Angriff.....	40
Tabelle 18	Rissbreiteneinstellung an der Bewehrung.....	45
Tabelle 19	Prüfkörpergestaltung	54
Tabelle 20	Betonmischung.....	55

Tabelle 21	Zusammensetzung der Prüfflüssigkeiten in Anlehnung an [36].....	56
Tabelle 22	pH-Werte verdünnte Stammlösung.....	57
Tabelle 23	pH Werte der Mischflüssigkeiten (Ansatz pro Mischung 100ml).....	58
Tabelle 24	Versuchsprogramm Laborprüfungen	59
Tabelle 25	Umsetzungstiefe an der Betonoberfläche nach 180 d Beaufschlagung.....	62
Tabelle 26	Umsetzungstiefe, von den Rissflanken ausgehend.....	63
Tabelle 27	Korrosionszustand der Bewehrung im Riss	72

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Einflussfaktoren auf die Dauerhaftigkeit in Anlehnung an [48].....	8
Abbildung 2:	Schematische Darstellung der korrodierten Randzone bei saurem Angriff [10] 12	
Abbildung 3	POURBAIX-DIAGRAMM Fe – H ₂ O (25°C) [24]	15
Abbildung 4	Akkumulation von Schädigungen am Stahlbeton, nach [51].....	17
Abbildung 5	Gegenüberstellung von Rechenwerten $w_{k,cal}$ und Messwerten $w_{k,vers}$ der Rissbreite nach [20]	19
Abbildung 6	modellhafte Darstellung von Spaltbreite und Rissuferverschiebung eines Risses, nach [19]	21
Abbildung 7	optische Rissmessung und Verschiebungsmessung mit Messuhr, schematisch	23
Abbildung 8	Schematische Darstellung des Rissquerschnittes	25
Abbildung 9	Detail Rissfläche Versuch Nr. 4 (2015) mit Ablagerungen [2]	35
Abbildung 10:	schematische Darstellung Rissplatten	44
Abbildung 11	Prüfkörper in Einspannvorrichtung mit Messuhren	45
Abbildung 12	Rissbreite Bewehrungslage PK 1, Schnittfläche 2.....	46
Abbildung 13	Rissbreite Bewehrungslage PK 2, Schnittfläche 2.....	46
Abbildung 14	Rissbreite Bewehrungslage PK 3, Schnittfläche 2.....	46
Abbildung 15	Prinzip der Potentialfeldmessung, entnommen aus [53].....	47
Abbildung 16	Potenzialbereiche und Korrosionsarten nach [53]	49
Abbildung 17	lokale Potenzialverschiebung (Potenzialtrichter), aus [53], Die Darstellungsweise in der Draufsicht wurde in diesem Bericht verwendet.	50
Abbildung 18	Bewehrungsplan Rissplatte und Kennzeichnung der Messlinien	51
Abbildung 19	Potentialfeldmessungen	51
Abbildung 20	Potentialverschiebung nach Beaufschlagung mit Kochsalzlösung.....	52
Abbildung 21	Rissprüfkörper mit Messpunkten und Flüssigkeitsreservoir	53
Abbildung 22	Stammlösung in verschiedenen Anteilen verdünnt	57
Abbildung 23	Abhängigkeit pH-Wert von der Konzentration Stammlösung in Wasser	57
Abbildung 24	pH-Wert Entwicklung bei Zugabe von MG 1 zur MG 2 gemäß [36]	58
Abbildung 25	Teilung der Prüfkörper nach Abschluss der Beaufschlagungsdauer.....	60
Abbildung 26	pH-Wert der Prüfflüssigkeiten.....	61
Abbildung 27	Betonoberfläche, links: nur Luftlagerung, rechts: 20 % Säure	64
Abbildung 28	Kristalle an der Betonoberfläche, Detail aus Abbildung 27 rechts.....	65
Abbildung 29	Riss mit Reaktionsprodukt, Prüfkörper Prüfkörper 8.....	66
Abbildung 30	Rissflanke mit Reaktionsprodukt, Prüfkörper Pk1.....	67
Abbildung 31	Einflussfaktoren auf die „Selbstdichtung“ von Rissen [1]	71
Abbildung 32	korrodierte Bewehrung, Prüfkörper P11, Luftlagerung.....	72
Abbildung 33	Rostansatz, Prüfkörper P1, Flüssigkeit PF1, Einwirkungsseite unten im Bild ...	73
Abbildung 34	Rostansatz, Prüfkörper P8, Flüssigkeit PF3, Einwirkungsseite unten im Bild ...	74



Anlage 1

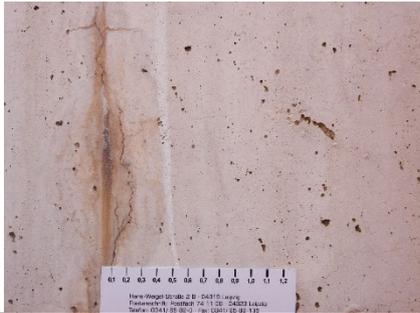
Erhebungsbögen zu ausgewählten
landwirtschaftlichen Anlagen in Sachsen

	Behälter Nr.1	Behälter Nr. 2
Nutzung	Nachgärer	Gärrestlager
Volumen	3.256 m ³	7.540 m ³
Abdeckung	Ja / gasdicht	Nein
Außendämmung	Nein	Nein
erdberührt	Nein	0,75 m Einbindetiefe
Baujahr	2007	2011 / 2012
Leckagesystem	Ja	Ja
Durchmesser	27 m	40 m
Wandhöhe	6 m	6 m
Wanddicke	22 cm	31 cm
Beton		
Festigkeitsklasse	C25/30	C25/30
Expositionsklasse	Nicht bekannt	XC4/XF1/XA1
Bes. Eigenschaften	hoher Wassereindringwiderstand	-
Sichtbare Schäden		
	Vom Sohlbereich beginnend etwa bis 1,5 m hoch umlaufend in regelmäßigen Abständen vertikale Trennrisse, feucht und mit Verfärbungen und Sinter Rissbreiten zw. 0,2 und 0,5 mm	Feine Trennrisse rel. regelmäßig, mit Rissbreiten kleiner 0,1mm
	Oberer Wandbereich mit vertikalen Trennrissen <0,2mm und Netzzissen; lokale Rostspuren im Bereich von Rissen	
	Fuge Wand-Boden verfärbt Risse setzen sich in vorstehender Bodenplatte fort	
		
		

	Behälter Nr. 3	Behälter Nr.4
Nutzung	Gärsubstratlager / Güllebehälter	Güllebehälter
Volumen	2281 m ³	2.200 – 2.300 m ³
Abdeckung	Ja, nicht gasdicht	nein
Außendämmung	nein	Nein
erdberührt	2m Einbindetiefe	1-2 m Einbindetiefe (Hanglage)
Baujahr	2002	1994 / 1995
Leckagesystem	Ja	Ja
Durchmesser	22 m	24 m
Wandhöhe	6 m	5 m
Wanddicke	Nicht bekannt	18 cm / 21 cm gemessen
Beton		
Festigkeitsklasse	B25/ 0-32/ 350 kg Zement	B25/ 350-400 kg Zement
Expositionsklasse	Nicht bekannt	Nicht bekannt
Bes. Eigenschaften	Wasserundurchlässiger Beton	-
Sichtbare Schäden		
	Vielzahl an vertikal orientierten u. netzartig verteilten Rissen w = 0,1 - 0,2 mm	Umlaufend vertikale Wandrisse mit Rissbreiten zwischen 0,1 bis 0,3 mm, überwiegend ohne Aussinterungen,
	Verfärbungen, Bewuchs unter Befestigungen und Anbauteilen	
	Geringe Aussinterungen	Leckageerkennungssystem lokal schadhaft
		
		

	Behälter Nr. 5	Behälter Nr.6
Nutzung	Güllebehälter	Gärrestlager
Volumen	2.200 – 2.300 m ³	5.132 m ³
Abdeckung	nein	Nein
Außendämmung	Nein	Nein
erdberührt	1-2 m Einbindetiefe (Hanglage)	Ca. 1 m Einbindetiefe
Baujahr	1994 / 1995	2013/2014
Leckagesystem	Ja	Ja
Durchmesser	24 m	33 m
Wandhöhe	5 m	6 m
Wanddicke	18 cm / 21 cm gemessen	25,5 cm
Beton		
Festigkeitsklasse	B25/ 350-400 kg Zement	Wand: C 35/45 Boden: C 25/30
Expositionsklasse	Nicht bekannt	Wand: XC4, XF3, XA 3
Bes. Eigenschaften	-	Boden: XC4, XF1. XA1
Sichtbare Schäden		
	Feine überwiegend vertikal orientierte aber auch netzartig verteilte Risse über die gesamte Wandfläche w = 0,1 - 0,2 mm	Feine überwiegend vertikal orientierte aber auch netzartig verteilte Risse über die gesamte Wandfläche w = 0,1 - 0,2 mm
	Vereinzelt mit Verfärbungen und Aussinterungen	Ganz vereinzelt mit Verfärbungen und Aussinterungen
	Leckageerkennungssystem lokal schadhaft	
		
		

	Behälter Nr. 7	Behälter Nr.8
Nutzung	Gärrestlager	Gärrestlager
Volumen	5.132 m ³	5.132 m ³
Abdeckung	nein	nein
Außendämmung	Nein	Nein
erdberührt	1,5 - 2 m Einbindetiefe	1,5 - 2 m Einbindetiefe
Baujahr	2013/2014	2013/2014
Leckagesystem	Ja	Ja
Durchmesser	33 m	33 m
Wandhöhe	6 m	6 m
Wanddicke	23 cm	24 cm
Beton		
Festigkeitsklasse	Wand: C 35/45 Boden: C 25/30	Wand: C 35/45 Boden: C 25/30
Expositionsklasse	Wand: XC4, XF3, XA 3 Boden: XC4, XF1, XA1	Wand: XC4, XF3, XA 3 Boden: XC4, XF1, XA1
Bes. Eigenschaften	-	-
Sichtbare Schäden		
	Geringe Anzahl an Rissen - Feine überwiegend vertikal orientierte aber auch netzartig verteilte Risse über die gesamte Wandfläche w = 0,1 - 0,2 mm	Geringe Anzahl an Rissen - Feine überwiegend vertikal orientierte aber auch netzartig verteilte Risse, vorwiegend über der vorderen Wandfläche w = 0,1 - 0,2 mm
	Keine Aussinterungen oder Durchfeuchtungen	Keine Aussinterungen oder Durchfeuchtungen
		
		

	Behälter Nr. 9	Behälter Nr.10
Nutzung	Gärrestlager	Güllebehälter
Volumen	2.251 m ³	
Abdeckung	Ja, gasdicht	nein
Außendämmung	Nein	nein
erdberührt	nein (sollte lt. Statik eingerdet sein)	
Baujahr	2009 / 2010	ca. 1970
Leckagesystem	Ja	
Durchmesser	21 m	
Wandhöhe	6,50 m	Ca. 3 m
Wanddicke	Keine Angabe Bodenplatte 25 cm dick	20 cm, gemessen
Beton		
Festigkeitsklasse	Keine Angaben	B 25
Expositionsklasse	Keine Angaben	
Bes. Eigenschaften	-	-
Sichtbare Schäden		
	Auffällig viele Risse, teilweise mit Durchfeuchtungen und Aussinterungen, über die gesamte Wandfläche w = 0,1 - 0,2 mm; vertikal orientiert aber auch netzartig , Spannstelle teilweise undicht	besitzt außen und innen einen Schwarzanstrich, der nur noch bereichsweise und in nicht geschlossener Form vorhanden ist, verdeckt dennoch noch Risse. Mehrfach vertikal und schräg orientierte Risse mit Breiten bis 0,3 mm
	Betonoberfläche porig, mit Lunkern, Verfärbungen	
		
		

	Behälter Nr. 11	Behälter Nr.12
Nutzung	Gärrestbehälter	Gärrestbehälter
Volumen	4.021 m ³	6.734 m ³
Abdeckung	nein	nein
Außendämmung	Nein	nein
erdberührt	Ja, ca. 2,60 m Einbindetiefe	ja
Baujahr	2008	2017
Leckagesystem	Ja	
Durchmesser	32 m	35 m
Wandhöhe	5 m	7 m
Wanddicke	10 cm nach Plan, IST: 25 cm	31,5 cm, gemessen
Beton		
Festigkeitsklasse	C 25/30	C 30/37
Expositionsklasse	XC4, XF3, XA 1	XC4, XF3, XA 1
Bes. Eigenschaften	-	-
Sichtbare Schäden		
	vereinzelte Risse, überwiegend vertikal orientiert, teils auch netzrissig, lokale Feuchtstellen auch an feinen nur 0,1 mm breiten Rissabschnitten	Sehr vereinzelt Risse, maximal Rissbreite 0,1 mm, keine Spuren von Durchfeuchtungen oder Sinter
	Betonoberfläche porig, mit Lunkern, Verfärbungen Deutliche Abbildung einer horizontalen Betonierfuge	Betonoberfläche porig, mit Lunkern, Verfärbungen
		
		



Anlage 2

Ergebnisdokumentation experimentelle Untersuchungen

Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen Prüfkörper Nr. 1

Prüfflüssigkeit:	Gülle (PF 1)
Prüfkörperherstellung	17.06.2019
Herstellung Biegeriss:	24.06.2019
Beaufschlagungsbeginn:	12.08.2019
Potentialfeld 0 - Messung:	07.08.2019
Potentialfeld 60 Tage Messung:	14.10.2019
Potentialfeld 90 Tage Messung:	18.11.2019
Potentialfeld 120 Tage Messung:	11.12.2019
Potentialfeld 150 Tage Messung:	15.01.2020
Potentialfeld 180 Tage Messung:	02.03.2020 mit anschließendem Spalten

Ergebnisse und Beobachtungen

Versuchszeitraum	t = 180d (203 d) Beaufschlagung / 268 d Lagerung NK
Rissbreite an Bewehrung	0,27 mm
visuelle Beurteilung nach Spalten des Prüfkörpers unmittelbar nach Spalten	Prüfkörperöffnung nach 180 Tagen Beaufschlagung: <ul style="list-style-type: none"> - Bewehrungsstäbe blank ohne Anzeichen von Korrosion - Betonoberfläche im Rissbereich leicht verfärbt
visuelle Beurteilung, nach weiterer Labor- klimalagerung	<ul style="list-style-type: none"> - Bewehrungsstäbe einseitig sehr gering angerostet - teilweise raue Oberfläche ohne Querschnittsschwächung - leichte Verfärbung an Betonoberfläche
Umsetzungstiefen visuell Betonoberfläche	1,85 / 2,61 / 1,92 / 2,94 / 5,78 / 2,10 / 2,49 / 1,80 [mm]
Umsetzungstiefe visuell Rissbereich	Umsetzungstiefe im Riss bis 20,2 mm von oben erkennbar Rissflanken: 3,82 ; 2,26 ; 2,97 ; 1,74 [mm]
Umsetzungstiefe Mikroskopie	Betonoberfläche 0,91 mm / 0,97 mm / 1,00 mm Rissflanken: 1,41 ; 0,44 ; 0,26 [mm]



Während Beaufschlagung



Nach Beaufschlagung



Nach Spaltung



Stahl Oberseite



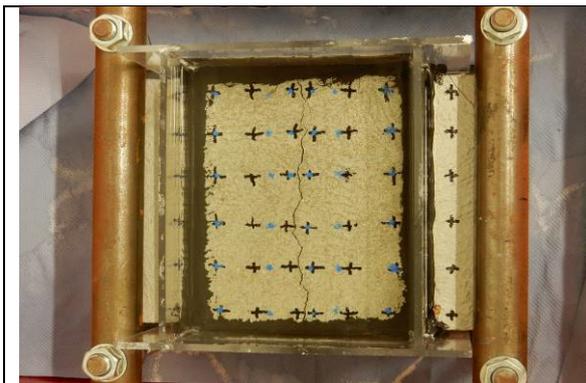
Stahl Unterseite

Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen Prüfkörper Nr. 2

Prüfflüssigkeit:	Jauche / Gülle (PF 1)
Prüfkörperherstellung	17.06.2019
Herstellung Biegeriss:	24.06.2019
Beaufschlagungsbeginn:	12.08.2019
Potentialfeld 0 - Messung:	06.08.2019
Potentialfeld 60 Tage Messung:	14.10.2019
Potentialfeld 90 Tage Messung:	18.11.2019
Potentialfeld 120 Tage Messung:	11.12.2019
Potentialfeld 150 Tage Messung:	15.01.2020
Potentialfeld 180 Tage Messung:	02.03.2020 mit anschließendem Spalten

Ergebnisse und Beobachtungen

Versuchszeitraum	t = 180d (203 d) Beaufschlagung / 268 d Lagerung NK
Rissbreite an Bewehrung	0,26 mm
visuelle Beurteilung nach Spalten des Prüfkörpers	<p>Prüfkörperöffnung nach 180 Tagen Beaufschlagung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bewehrungsstäbe blank ohne Anzeichen von Korrosion ▪ Betonoberfläche leichte Verfärbung
visuelle Beurteilung nach 2. Spalten des Prüfkörpers	<p>Bewehrungsstäbe kaum Spuren von Korrosion</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bewehrungsstäbe glatte Oberfläche ▪ Betonoberfläche leicht verfärbt 4mm
Umsetzungstiefe visuell Betonoberfläche	2,63 mm / 2,54 mm / 2,85 mm / 2,33 mm / 2,52 mm / 2,69 mm / 1,49 mm / 2,00 mm
Umsetzungstiefe visuell Rissbereich	Umsetzungstiefe messbar bis in 18,73 mm Tiefe Rissflanken: 3,45 ; 3,39 ; 2,52 ; 3,20 [mm]
Umsetzungstiefe Mikroskopie -	Betonoberfläche: 2,56 mm / 2,52 mm Rissbereich Rissflanken: 0,89 ; 0,76 ; 0,73 [mm]



Während Beaufschlagung



Nach Beaufschlagung



Nach Spaltung



Riss



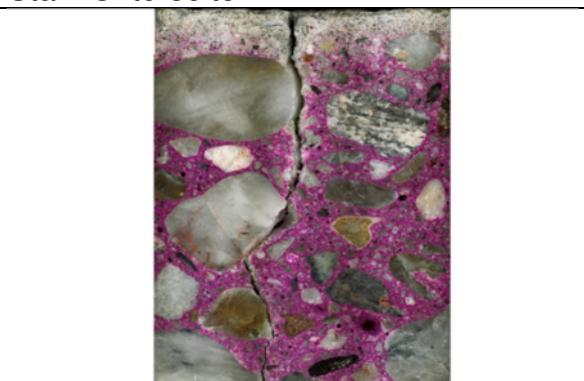
Schädigungstiefe



Stahl Unterseite



Stahl Oberseite



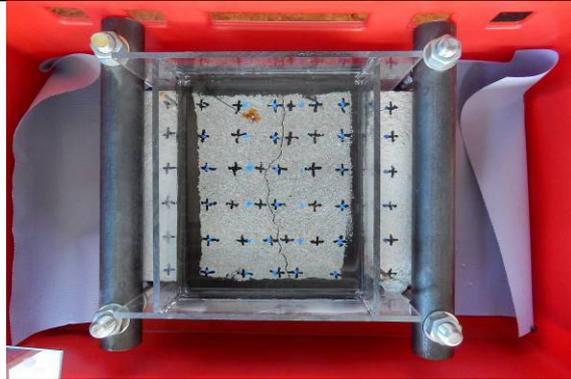
Mikroskopie

Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen Prüfkörper Nr. 3

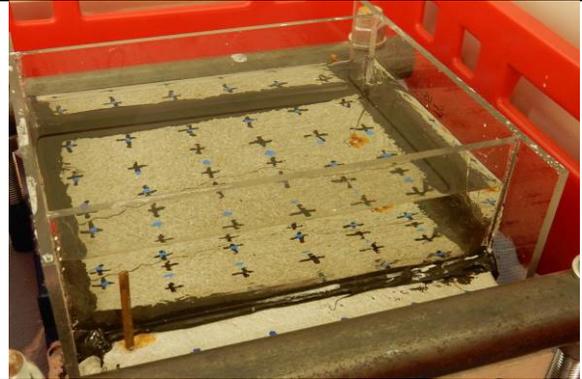
Prüfflüssigkeit:	Jauche / Gülle (PF 1)
Prüfkörperherstellung	17.06.2019
Herstellung Biegeriss:	24.06.2019
Beaufschlagungsbeginn:	12.08.2019
Potentialfeld 0 - Messung:	06.08.2019
Potentialfeld 60 Tage Messung:	14.10.2019
Potentialfeld 90 Tage Messung:	18.11.2019
Potentialfeld 120 Tage Messung:	11.12.2019 mit anschließendem Spalten
Potentialfeld 150 Tage Messung:	entfällt
Potentialfeld 180 Tage Messung:	entfällt

Ergebnisse und Beobachtungen

Versuchszeitraum	t = 120 Tage
Rissbreite an Bewehrung	0,28 mm
visuelle Beurteilung nach Spalten des Prüfkörper	Prüfkörperöffnung nach 120 Tagen Beaufschlagung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bewehrungsstäbe blank ohne Anzeichen von Korrosion ▪ Tiefes Eindringen der Flüssigkeit
Umsetzungstiefe visuell Betonoberfläche	2,0 mm / 2,1 mm / 2,55 mm
Umsetzungstiefe visuell Rissbereich	Umsetzungstiefe messbar bis in 31,45 mm Tiefe 2,9 mm / 4,03 mm / 2,85 mm
Umsetzungstiefe Mikroskopie -	Betonoberfläche: 2,00 mm / 2,55 mm Rissflanken: 4 mm; 1,28 mm; 1,6 mm



Vor Beaufschlagung



Während Beaufschlagung



Nach Beaufschlagung



Nach Spaltung



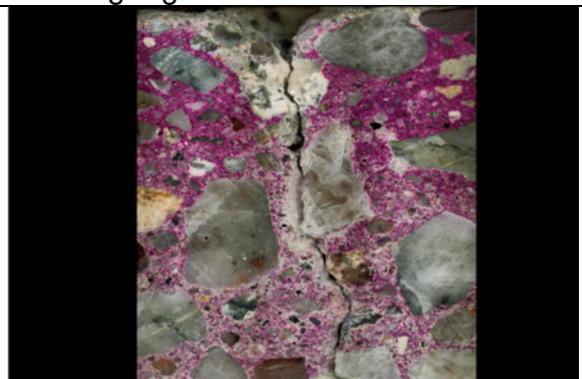
Riss



Schädigungstiefe



Stahl



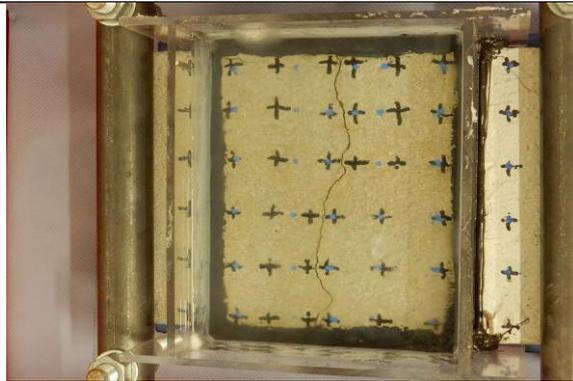
Mikroskopie

Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen Prüfkörper Nr. 4

Prüfbarkeit:	Jauche / Gülle +10% Silagesickersaft (PF2)
Prüfkörperherstellung	17.06.2019
Herstellung Biegeriss:	24.06.2019
Beaufschlagungsbeginn:	12.08.2019
Potentialfeld 0 - Messung:	07.08.2019
Potentialfeld 60 Tage Messung:	14.10.2019
Potentialfeld 90 Tage Messung:	18.11.2019
Potentialfeld 120 Tage Messung:	11.12.2019
Potentialfeld 150 Tage Messung:	16.01.2020
Potentialfeld 180 Tage Messung:	02.03.2020 mit anschließendem Spalten

Ergebnisse und Beobachtungen

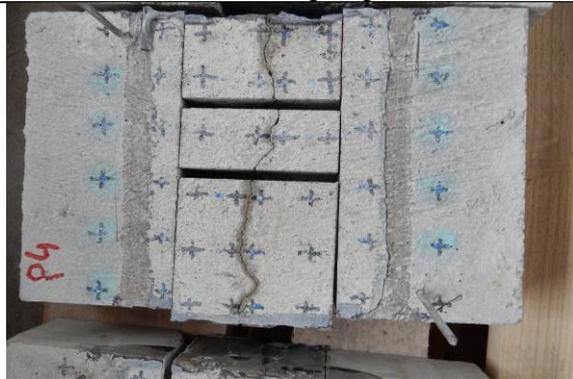
Versuchszeitraum	t = 180d (203 d) Beaufschlagung / 268 d Lagerung NK
Rissbreite an Bewehrung	0,29 mm
visuelle Beurteilung nach Spalten des Prüfkörper	<p>Prüfkörperöffnung nach 180 Tagen Beaufschlagung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bewehrungsstäbe leichte einseitige Spure von Korrosion ▪ Bewehrungsstäbe glatte Oberfläche ▪ Betonoberfläche leichte Verfärbung im Rissbereich (5mm)
visuelle Beurteilung nach weiterer Auslagerung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bewehrungsstäbe einseitig stark gerostet ▪ sehr raue Oberfläche → beeinflusst den Querschnitt ▪ starke Verfärbung am Beton im Rissbereich
Umsetzungstiefe visuell Betonoberfläche	2,57 mm / 2,26 mm / 4,02 mm / 16,36 mm / 1,78 mm / 2,20 mm / 2,49 mm / 2,31 mm
Umsetzungstiefe visuell Rissbereich	Umsetzungstiefe messbar bis in 28 mm Tiefe Rissflanken: 2,20 ; 1,87 ; 1,80 ; 2,81 [mm]
Umsetzungstiefe Mikroskopie -	Betonoberfläche 2,53 mm / 2,07 mm Rissflanken: 1,41 ; 0,99 [mm]



Während Beaufschlagung



Nach Beaufschlagung



Nach Spaltung



Riss



Schädigungstiefe



Stahl Unterseite



Stahl Oberseite



Mikroskopie

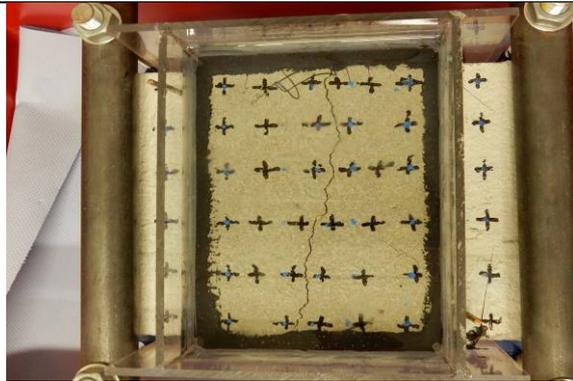
Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen Prüfkörper Nr. 5

Prüfflüssigkeit: Jauche/Gülle + 10% Silagesickersaft - PF2

Prüfkörperherstellung	17.06.2019
Herstellung Biegeriss:	24.06.2019
Beaufschlagungsbeginn:	12.08.2019
Potentialfeld 0 - Messung:	07.08.2019
Potentialfeld 60 Tage Messung:	14.10.2019
Potentialfeld 90 Tage Messung:	18.11.2019
Potentialfeld 120 Tage Messung:	11.12.2019
Potentialfeld 150 Tage Messung:	16.01.2020
Potentialfeld 180 Tage Messung:	02.03.2020 mit anschließendem Spalten

Ergebnisse und Beobachtungen

Versuchszeitraum	t = 180d (203 d) Beaufschlagung / 268 d Lagerung NK
Rissbreite an Bewehrung	0,34 mm
visuelle Beurteilung nach Spalten des Prüfkörpers	<p>Prüfkörperöffnung nach 180 Tagen Beaufschlagung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bewehrungsstäbe leichte Anzeichen von Korrosion ▪ Betonoberfläche verfärbt
visuelle Beurteilung nach weiter Lagerung in NK	Bewehrungsstäbe lokal angerostet sehr raue Oberfläche → beeinflusst den Querschnitt starke Verfärbung am Beton im Rissbereich
Umsetzungstiefe visuell Betonoberfläche	2,74 mm / 1,40 mm / 1,64 mm / 2,51 mm / 1,75 mm / 1,58 mm / 2,40 mm / 1,78 mm
Umsetzungstiefe visuell Rissbereich	Umsetzungstiefe messbar bis in 20,2 mm Tiefe Rissflanken: 2,59 ; 3,27 ; 2,13 ; 2,42 [mm]
Umsetzungstiefe Mikroskopie -	Betonoberfläche 2,08 mm / 1,56 mm Rissflanken: 3,18 ; 0,36 [mm]



Während Beaufschlagung



Nach Beaufschlagung



Nach Spaltung



Riss



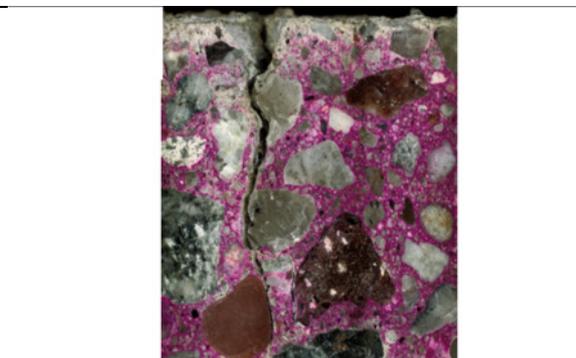
Schädigungstiefe



Stahl Unterseite



Stahl Oberseite



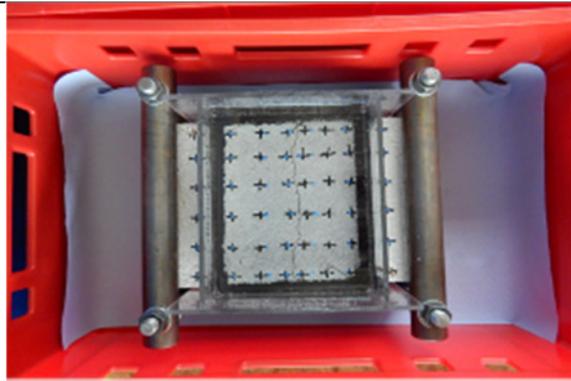
Mikroskopie

Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen Prüfkörper Nr. 6

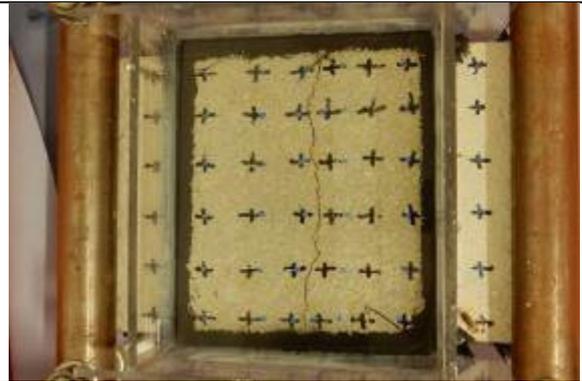
Prüfflüssigkeit:	Jauche/Gülle+10% Silagesickersaft -PF2
Prüfkörperherstellung	17.06.2019
Herstellung Biegeriss:	24.06.2019
Beaufschlagungsbeginn:	12.08.2019
Potentialfeld 0 - Messung:	06.08.2019
Potentialfeld 60 Tage Messung:	14.10.2019
Potentialfeld 90 Tage Messung:	18.11.2019
Potentialfeld 120 Tage Messung:	11.12.2019 mit anschließendem Spalten
Potentialfeld 150 Tage Messung:	entfällt
Potentialfeld 180 Tage Messung:	entfällt

Ergebnisse und Beobachtungen

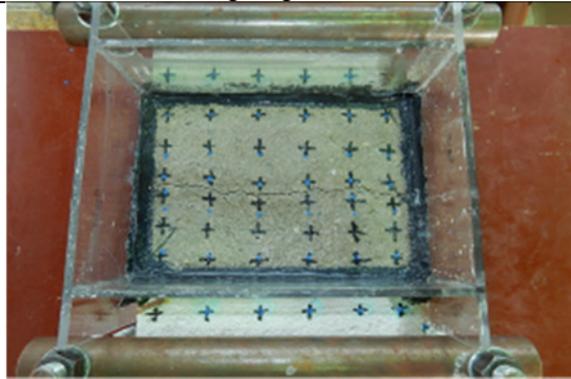
Versuchszeitraum	t = 120 Tage
Rissbreite an Bewehrung	0,28 mm
visuelle Beurteilung nach Spalten des Prüfkörpers	<p>Prüfkörperöffnung nach 120 Tagen Beaufschlagung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bewehrungsstäbe leichte Anzeichen von Korrosion ▪ Betonoberfläche verfärbt ▪ Tiefes Eindringen der Flüssigkeit
Umsetzungstiefe visuell Betonoberfläche	1,8 mm / 2,0 mm / 1,35 mm
Umsetzungstiefe visuell Rissbereich	Umsetzungstiefe messbar bis in >20mm Tiefe 2,4 mm / 2,23 mm
Umsetzungstiefe Mikroskopie	Betonoberfläche: 2,11 mm / 1,35 mm Rissflanken: 2,35 ; 2,42 [mm]



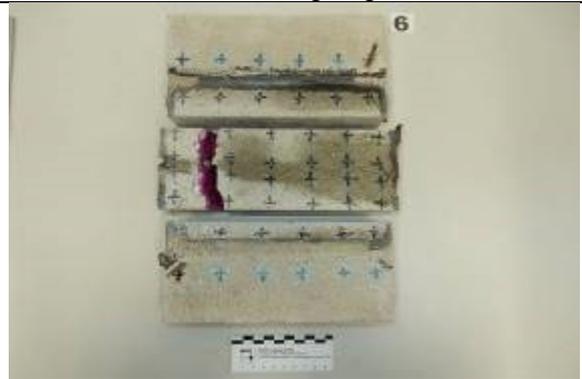
Vor Beaufschlagung



Während Beaufschlagung



Nach Beaufschlagung



Nach Spaltung



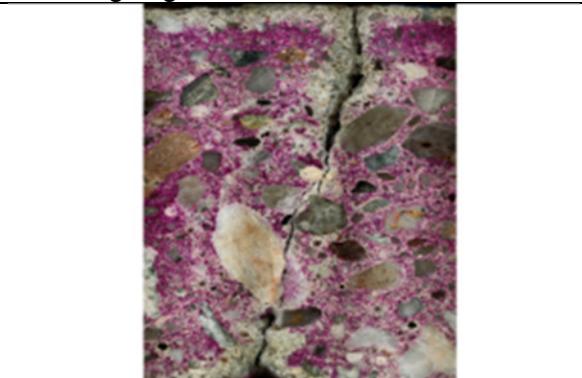
Riss



Schädigungstiefe



Stahl



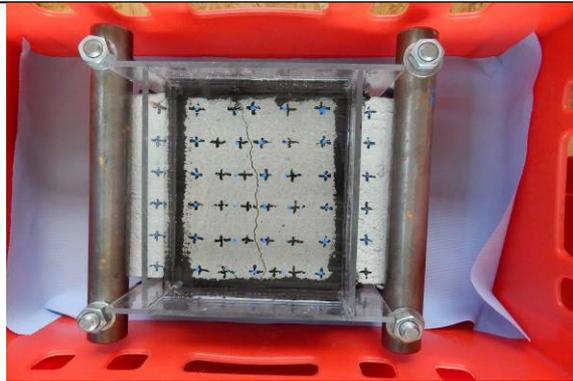
Mikroskopie

Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen Prüfkörper Nr. 7

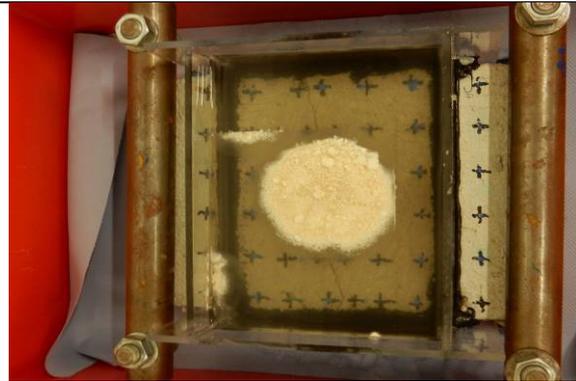
Prüfflüssigkeit:	Jauche/Gülle + 20% Silagesickersaft PF3
Prüfkörperherstellung	17.06.2019
Herstellung Biegeriss:	24.06.2019
Beaufschlagungsbeginn:	12.08.2019
Potentialfeld 0 - Messung:	06.08.2019
Potentialfeld 60 Tage Messung:	14.10.2019
Potentialfeld 90 Tage Messung:	18.11.2019
Potentialfeld 120 Tage Messung:	11.12.2019
Potentialfeld 150 Tage Messung:	17.01.2020
Potentialfeld 180 Tage Messung:	02.03.2020 mit anschließendem Spalten

Ergebnisse und Beobachtungen

Versuchszeitraum	t = 180d (203 d) Beaufschlagung / 268 d Lagerung NK
Rissbreite an Bewehrung	0,33 mm
visuelle Beurteilung nach Spalten des Prüfkörper	<p>Prüfkörperöffnung nach 180 Tagen Beaufschlagung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bewehrungsstäbe punktuell Spuren von Korrosion ▪ Bewehrungsstäbe glatte Oberfläche ▪ Betonoberfläche leicht verfärbt (2 mm)
visuelle Beurteilung nach weiterer Lagerung in NK	Leichte Zunahme der Bewehrungskorrosion im Rissbereich
Umsetzungstiefe visuell Betonoberfläche	2,02 mm / 2,19 mm / 2,61 mm / 11,81 mm Gesteinskörnung / 2,18 mm / 1,94 mm / 1,40 mm / 1,48 mm
Umsetzungstiefe visuell Rissbereich	Umsetzungstiefe messbar bis in 21 mm Tiefe Rissflanken: 2,58 ; 2,53 ; 1,55 [mm]
Umsetzungstiefe Mikroskopie -	Betonoberfläche: 2,13 mm / 2,89 mm / 2,59 mm Rissflanken: 1,94 ; 1,33 ; 1,29 [mm]



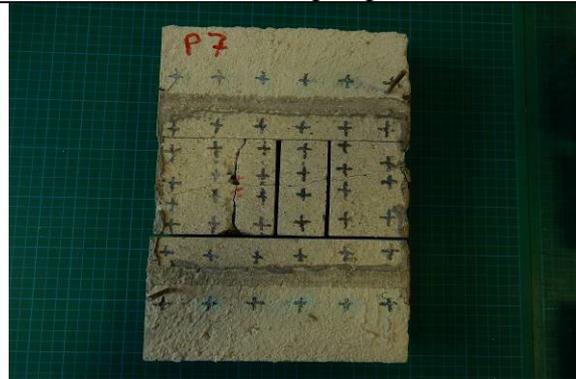
Vor Beaufschlagung



Während Beaufschlagung



Nach Beaufschlagung



Nach Spaltung



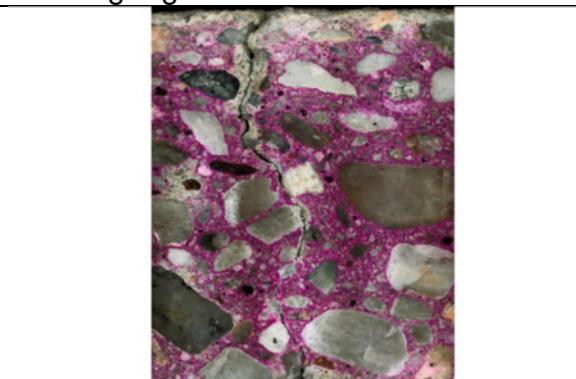
Riss



Schädigungstiefe



Stahl



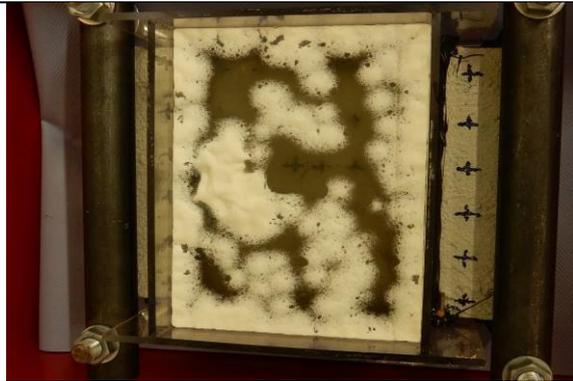
Mikroskopie

Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen Prüfkörper Nr. 8

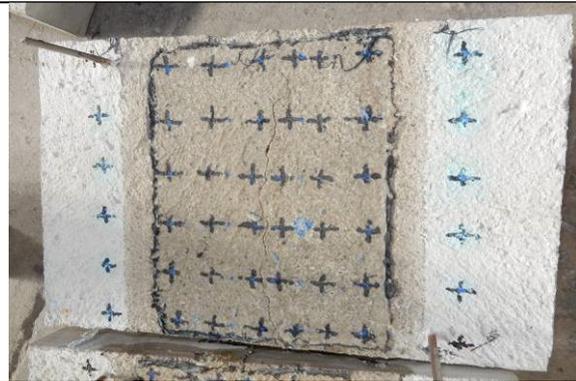
Prüfbarkeit:	Jauche/Gülle + 20% Silagesickersaft PF 3
Prüfkörperherstellung	17.06.2019
Herstellung Biegeriss:	24.06.2019
Beaufschlagungsbeginn:	12.08.2019
Potentialfeld 0 - Messung:	07.08.2019
Potentialfeld 60 Tage Messung:	14.10.2019
Potentialfeld 90 Tage Messung:	18.11.2019
Potentialfeld 120 Tage Messung:	11.12.2019
Potentialfeld 150 Tage Messung:	17.01.2020
Potentialfeld 180 Tage Messung:	02.03.2020 mit anschließendem Spalten

Ergebnisse und Beobachtungen

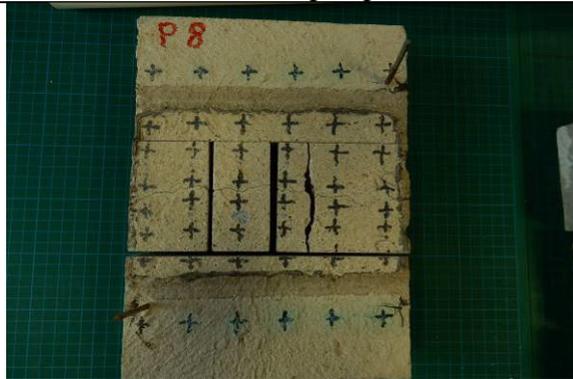
Versuchszeitraum	t = 180d (203 d) Beaufschlagung / 268 d Lagerung NK
Rissbreite an Bewehrung	0,21 mm
visuelle Beurteilung nach Spalten des Prüfkörpers	Prüfkörperöffnung nach 180 Tagen Beaufschlagung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bewehrungsstäbe Korrosionsspuren ▪ raue Oberfläche
visuelle Beurteilung nach 2. Spalten des Prüfkörpers	<ul style="list-style-type: none"> ▪ betonseitig stärkere Korrosionsspuren ▪ raue Oberfläche ▪ Betonoberfläche leichte Färbung im Rissbereich
Umsetzungstiefe visuell Betonoberfläche	2,49 mm / 2,47 mm / 2,40 mm / 3,64 mm / 2,61 mm / 2,54 mm / 2,73 mm / 2,26 mm
Umsetzungstiefe visuell Rissbereich	Umsetzungstiefe messbar bis in 23 mm Tiefe Rissflanken: 1,79 ; 2,06 ; 2,11 ; 2,16 [mm]
Umsetzungstiefe Mikroskopie	Betonoberfläche 2,60 mm / 2,78 mm Rissflanken: 1,72 ; 0,96 ; 0,81 ; 0,43 [mm]



Während Beaufschlagung



Nach Beaufschlagung



Nach Spaltung



Riss



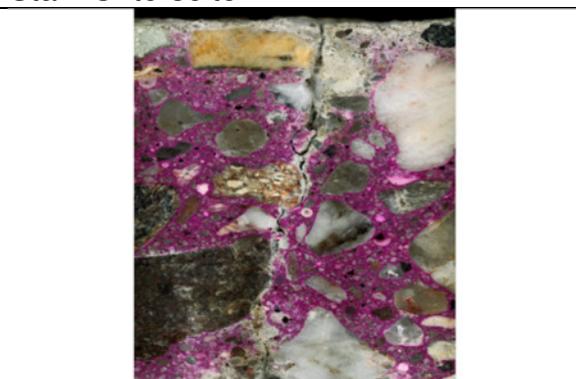
Schädigungstiefe



Stahl Unterseite



Stahl Oberseite



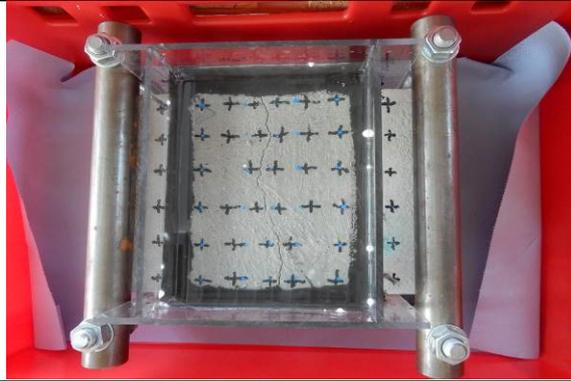
Mikroskopie

Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen Prüfkörper Nr. 9

Prüfflüssigkeit:	Jauche / Gülle +20 % Silagesickersaft PF 3
Prüfkörperherstellung	17.06.2019
Herstellung Biegeriss:	24.06.2019
Beaufschlagungsbeginn:	12.08.2019
Potentialfeld 0 - Messung:	06.08.2019
Potentialfeld 60 Tage Messung:	14.10.2019
Potentialfeld 90 Tage Messung:	18.11.2019
Potentialfeld 120 Tage Messung:	11.12.2019 mit anschließendem Spalten
Potentialfeld 150 Tage Messung:	entfällt
Potentialfeld 180 Tage Messung:	entfällt

Ergebnisse und Beobachtungen

Versuchszeitraum	t = 120
Rissbreite an Bewehrung	0,23 mm
visuelle Beurteilung nach Spalten des Prüfkörpers	<p>Prüfkörperöffnung nach 120 Tagen Beaufschlagung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bewehrungsstäbe ohne optische Anzeichen von Korrosion ▪ Betonoberfläche verfärbt ▪ Tiefes Eindringen der Flüssigkeit
Umsetzungstiefe visuell Betonoberfläche	2,02 mm / 1,96 mm / 2,11 mm
Umsetzungstiefe visuell Rissbereich	Umsetzungstiefe messbar bis in ca. 20 mm Tiefe 2,46 mm / 2,3 mm
Umsetzungstiefe Mikroskopie -	Betonoberfläche: 2,11 mm / 1,92 mm Rissflanken: 1,89 ; 2,72 ; 2,46 ; 2,31 [mm]



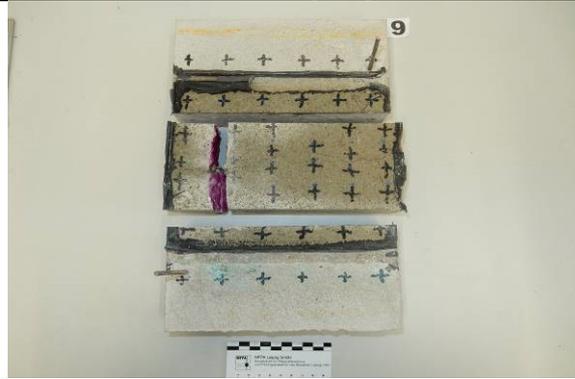
Vor Beaufschlagung



Während Beaufschlagung



Nach Beaufschlagung



Nach Spaltung



Riss



Schädigungstiefe



Stahl



Mikroskopie

Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen Prüfkörper Nr. 10

Prüfflüssigkeit:	Normalklima ohne Flüssigkeitsbeaufschlagung
Prüfkörperherstellung	17.06.2019
Herstellung Biegeriss:	24.06.2019
Beaufschlagungsbeginn:	12.08.2019
Potentialfeld 0 - Messung:	06.08.2019
Potentialfeld 60 Tage Messung:	14.10.2019
Potentialfeld 90 Tage Messung:	18.11.2019
Potentialfeld 120 Tage Messung:	11.12.2019
Potentialfeld 150 Tage Messung:	17.01.2020
Potentialfeld 180 Tage Messung:	02.03.2020 mit anschließendem Spalten

Ergebnisse und Beobachtungen

Versuchszeitraum	t = 180d (203 d) Beaufschlagung / 268 d Lagerung NK
Rissbreite an Bewehrung	0,29 mm
visuelle Beurteilung nach Spalten des Prüfkörper	<p>Prüfkörperöffnung nach 180 Tagen Beaufschlagung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bewehrungsstäbe deutliche Korrosionsspuren umlaufend im Rissbereich ▪ sehr raue Oberfläche ▪ Betonoberfläche mit Rostspuren im Rissbereich
visuelle Beurteilung nach nach weiterer Lagerung in NK	<ul style="list-style-type: none"> ▪ betonseitig etwas stärkere Korrosionsspuren ▪ raue Oberfläche ▪ Betonoberfläche leichte Färbung im Rissbereich
Umsetzungstiefe visuell Betonoberfläche	4,19 mm / 4,37 mm / 4,91 mm / 12,76 mm (Gesteinskörnung) / 4,39 mm / 4,46 mm / 4,10 mm
Umsetzungstiefe visuell Rissbereich	Umsetzungstiefe messbar bis in 24,02 mm Tiefe Rissflanken: 1,88 ; 5,08 ; 1,35 ; 5,89 [mm]
Umsetzungstiefe Mikroskopie	Betonoberfläche 5,35 mm Rissflanken: 3,91 ; 3,12 ; 1,69 ; 1,93 [mm]



Keine Beaufschlagung



Nach Spaltung



Riss



Schädigungstiefe



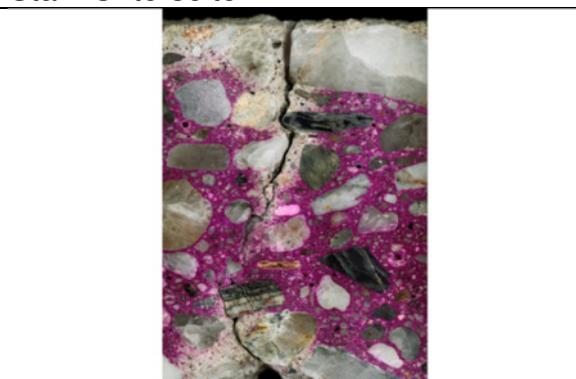
Stahl



Stahl Unterseite



Stahl Oberseite



Mikroskopie

Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen Prüfkörper Nr. 11

Prüfflüssigkeit:	Normalklima ohne Flüssigkeitsbeaufschlagung
Prüfkörperherstellung	17.06.2019
Herstellung Biegeriss:	24.06.2019
Beaufschlagungsbeginn:	12.08.2019
Potentialfeld 0 - Messung:	06.08.2019
Potentialfeld 60 Tage Messung:	14.10.2019
Potentialfeld 90 Tage Messung:	18.11.2019
Potentialfeld 120 Tage Messung:	11.12.2019
Potentialfeld 150 Tage Messung:	17.01.2020
Potentialfeld 180 Tage Messung:	02.03.2020 mit anschließendem Spalten

Ergebnisse und Beobachtungen

Versuchszeitraum	t = 180d (203 d) Beaufschlagung / 268 d Lagerung NK
Rissbreite an Bewehrung	0,34 mm
visuelle Beurteilung nach Spalten des Prüfkörper	<p>Prüfkörperöffnung nach 180 Tagen Beaufschlagung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bewehrungsstäbe deutliche Korrosionsspuren ▪ raue Stahloberfläche ▪ Betonoberfläche im Rissbereich stark verfärbt
visuelle Beurteilung nach weiterer Lagerung in NK	<ul style="list-style-type: none"> ▪ betonseitig etwas stärkere Korrosionsspuren
Umsetzungstiefe visuell Betonoberfläche	5,35 mm / 5,48 mm / 4,70 mm / 4,77 mm / 5,66 mm / 4,47 mm / 4,28 mm
Umsetzungstiefe visuell Rissbereich	Umsetzungstiefe messbar bis in 26,37 mm Tiefe Rissflanken: 2,62 ; 5,22 ; 4,25 [mm]
Umsetzungstiefe Mikroskopie -	Betonoberfläche 5,66 mm / 4,70 mm Rissflanken: 4,26 ; 3,30 ; 2,41 ; 1,27 ; 1,53 [mm]



Keine Beaufschlagung



Nach Spaltung



Riss



Schädigungstiefe



Stahl



Stahl Unterseite



Stahl Oberseite



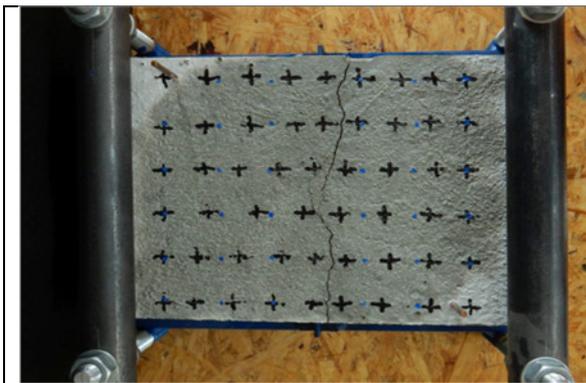
Mikroskopie

Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen Prüfkörper Nr. 12

Prüfflüssigkeit:	Normalklima ohne Flüssigkeitsbeaufschlagung
Prüfkörperherstellung	17.06.2019
Herstellung Biegeriss:	24.06.2019
Beaufschlagungsbeginn:	12.08.2019
Potentialfeld 0 - Messung:	06.08.2019
Potentialfeld 60 Tage Messung:	14.10.2019
Potentialfeld 90 Tage Messung:	18.11.2019
Potentialfeld 120 Tage Messung:	11.12.2019 mit anschließendem Spalten
Potentialfeld 150 Tage Messung:	entfällt
Potentialfeld 180 Tage Messung:	entfällt

Ergebnisse und Beobachtungen

Versuchszeitraum	t = 120
Rissbreite an Bewehrung	0,29 mm
visuelle Beurteilung nach Spalten des Prüfkörper	Prüfkörperöffnung nach 120 Tagen Beaufschlagung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bewehrungsstäbe deutliche Anzeichen von Korrosion
Umsetzungstiefe visuell Betonoberfläche	4,3 mm / 4,25 mm / 4,4 mm
Umsetzungstiefe visuell Rissbereich	Umsetzungstiefe messbar bis in 24,94 mm Tiefe 3,12 mm / 4,91 mm / 3,6 mm
Umsetzungstiefe Mikroskopie -	Betonoberfläche: 4,67 mm / 4,00 mm Rissflanken: 3,02 ; 2,84 [mm]



Keine Beaufschlagung



Nach Spaltung



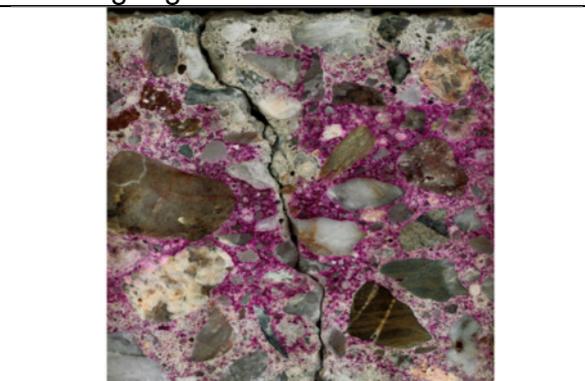
Riss



Schädigungstiefe



Stahl



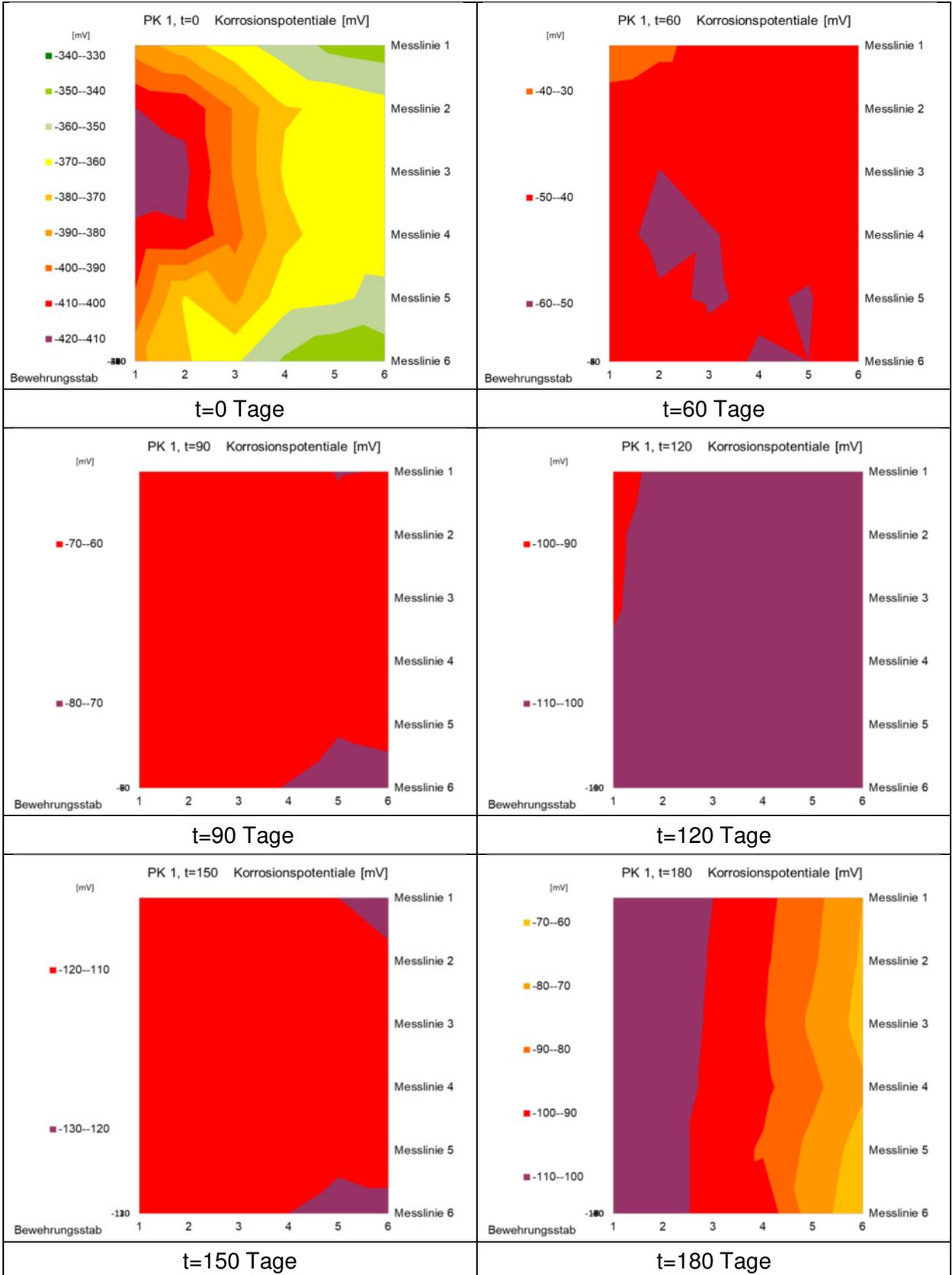
Mikroskopie



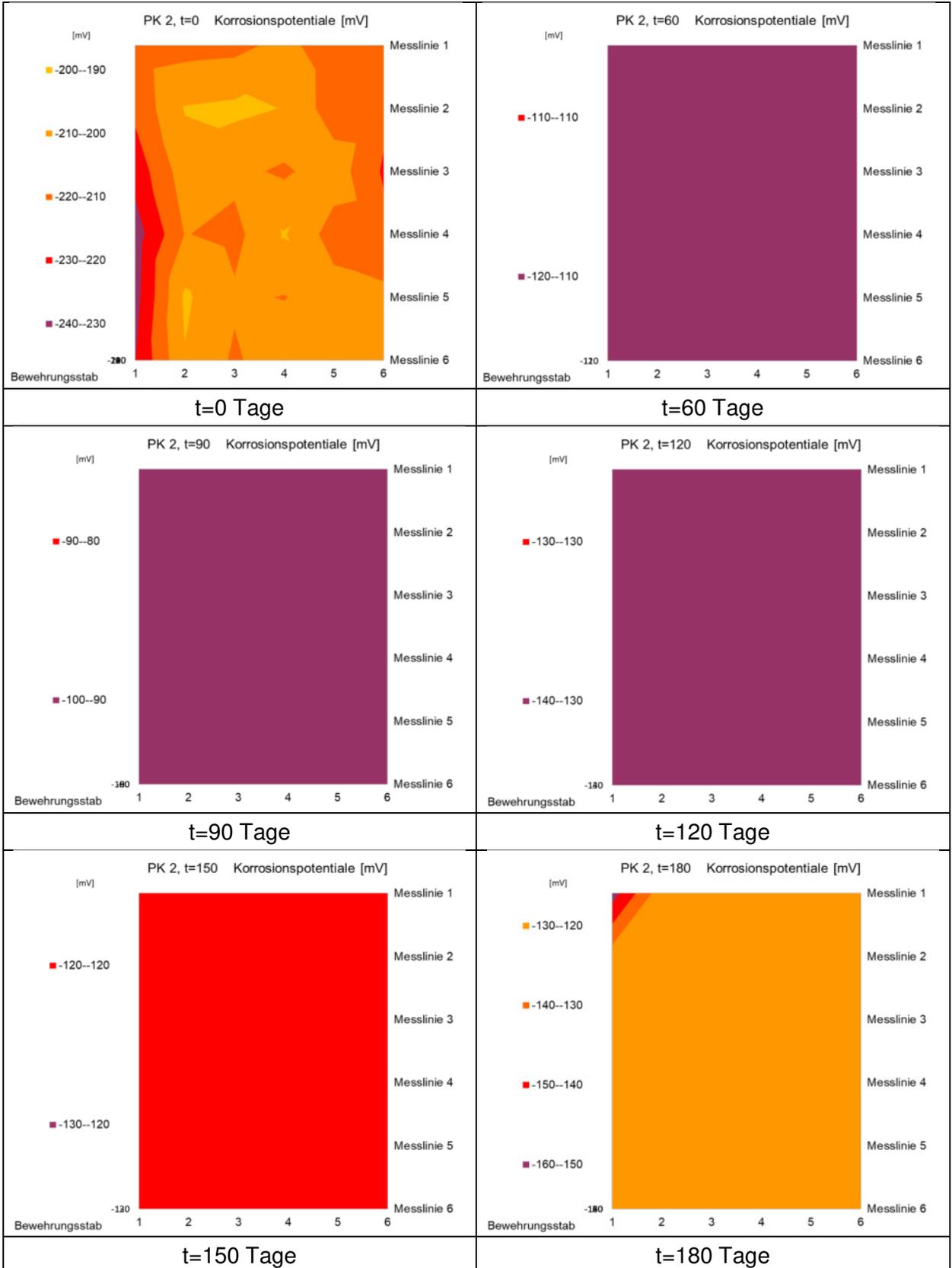
Anlage 3

Grafische Darstellung der Ergebnisse der
Potentialfeldmessungen

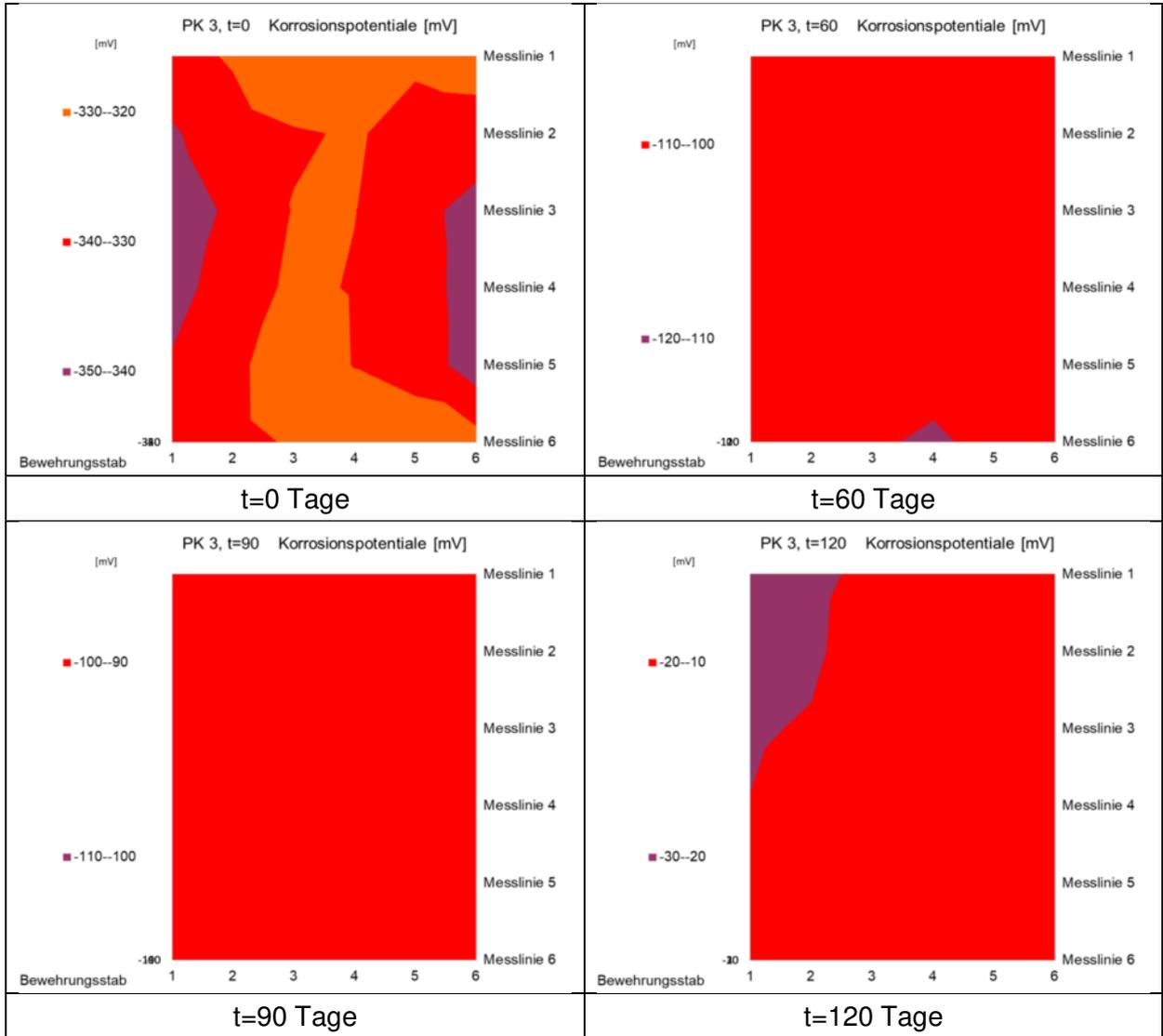
Zeitabhängige Potentialfeldmessungen - Auswertung Prüfkörper 1 – PF 1



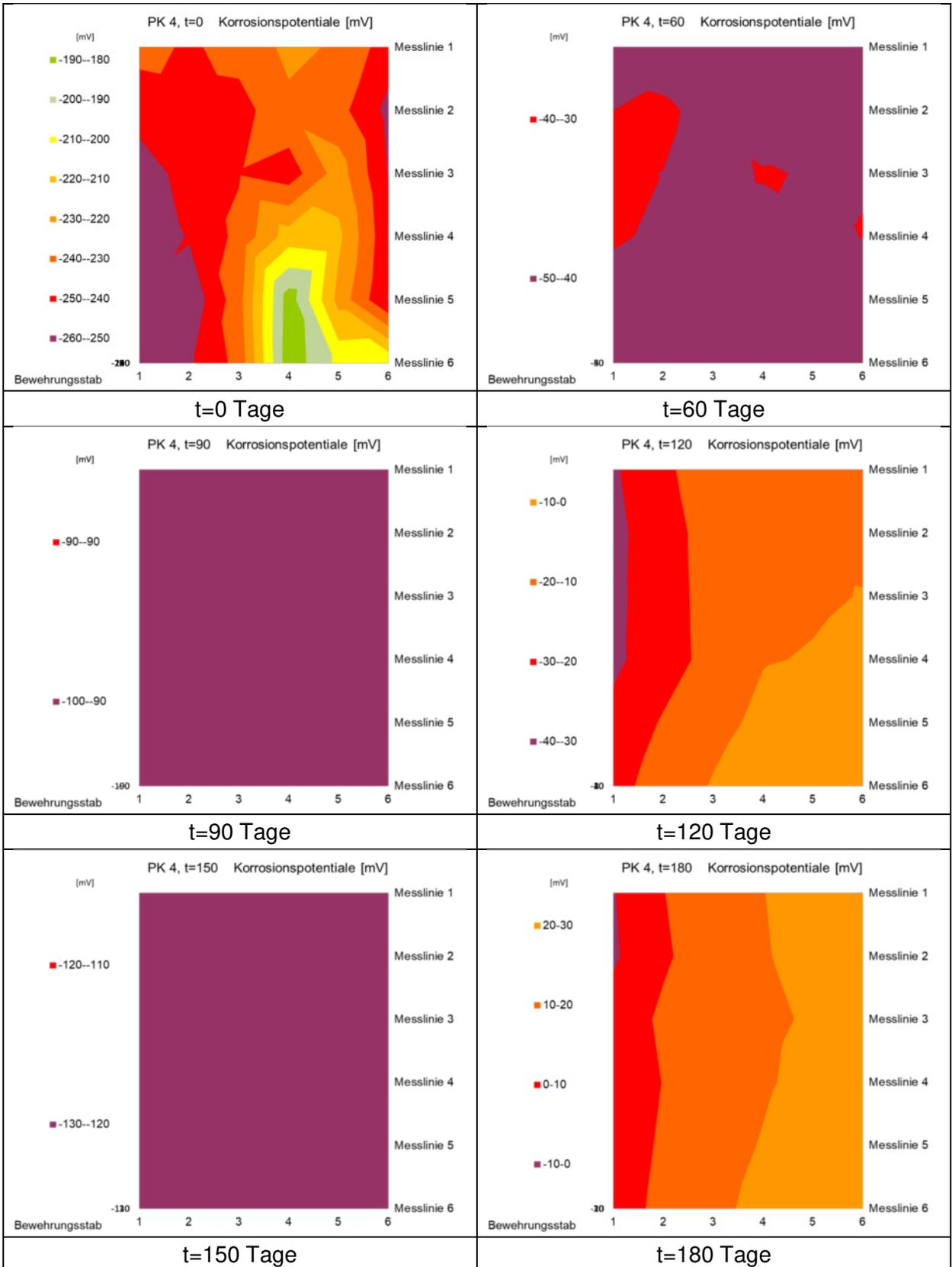
Zeitabhängige Potentialfeldmessungen – Auswertung Prüfkörper 2 – PF 1



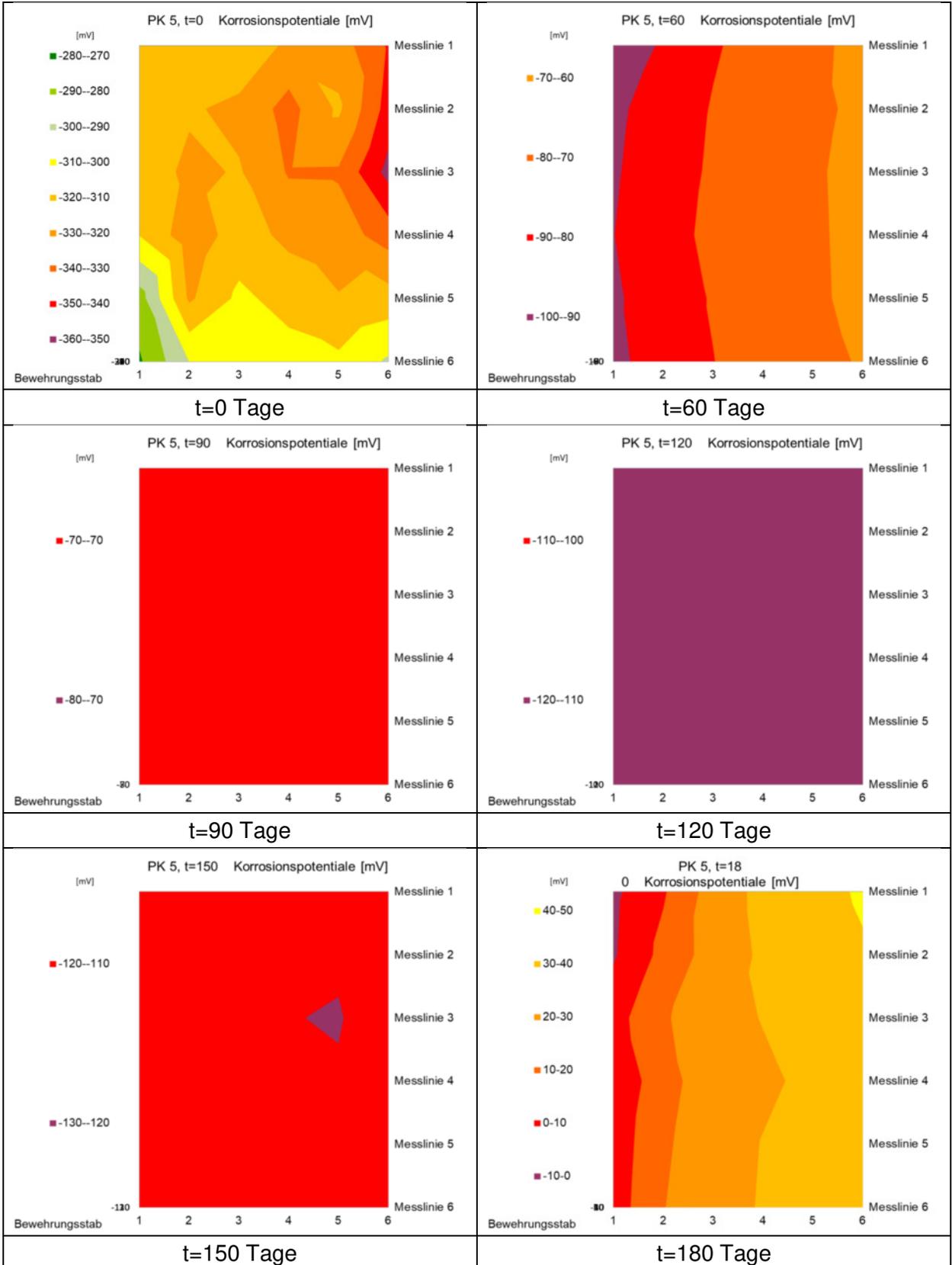
Zeitabhängige Potentialfeldmessungen – Auswertung Prüfkörper 3 – PF 1



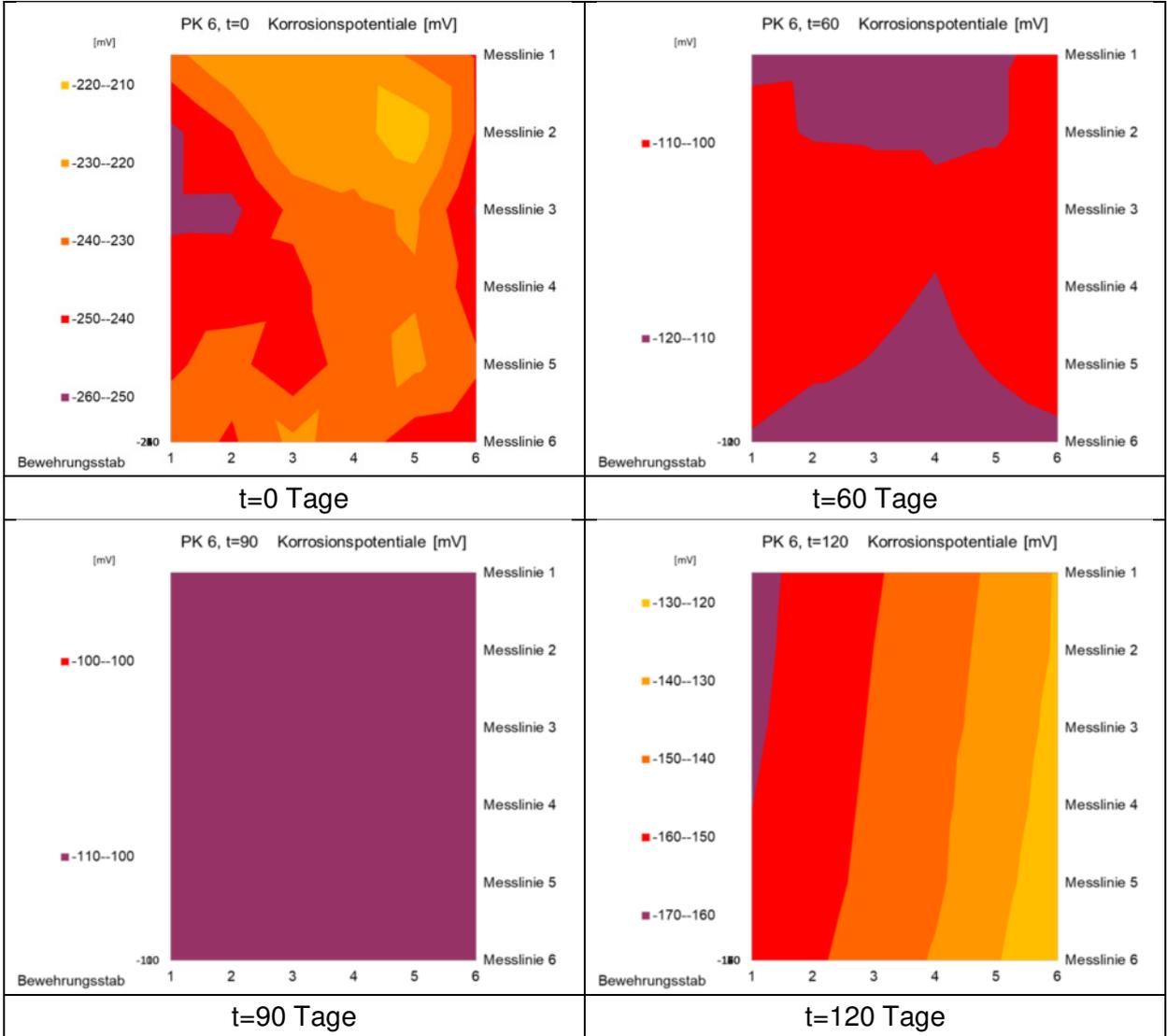
Zeitabhängige Potentialfeldmessungen – Auswertung Prüfkörper 4 – PF 2



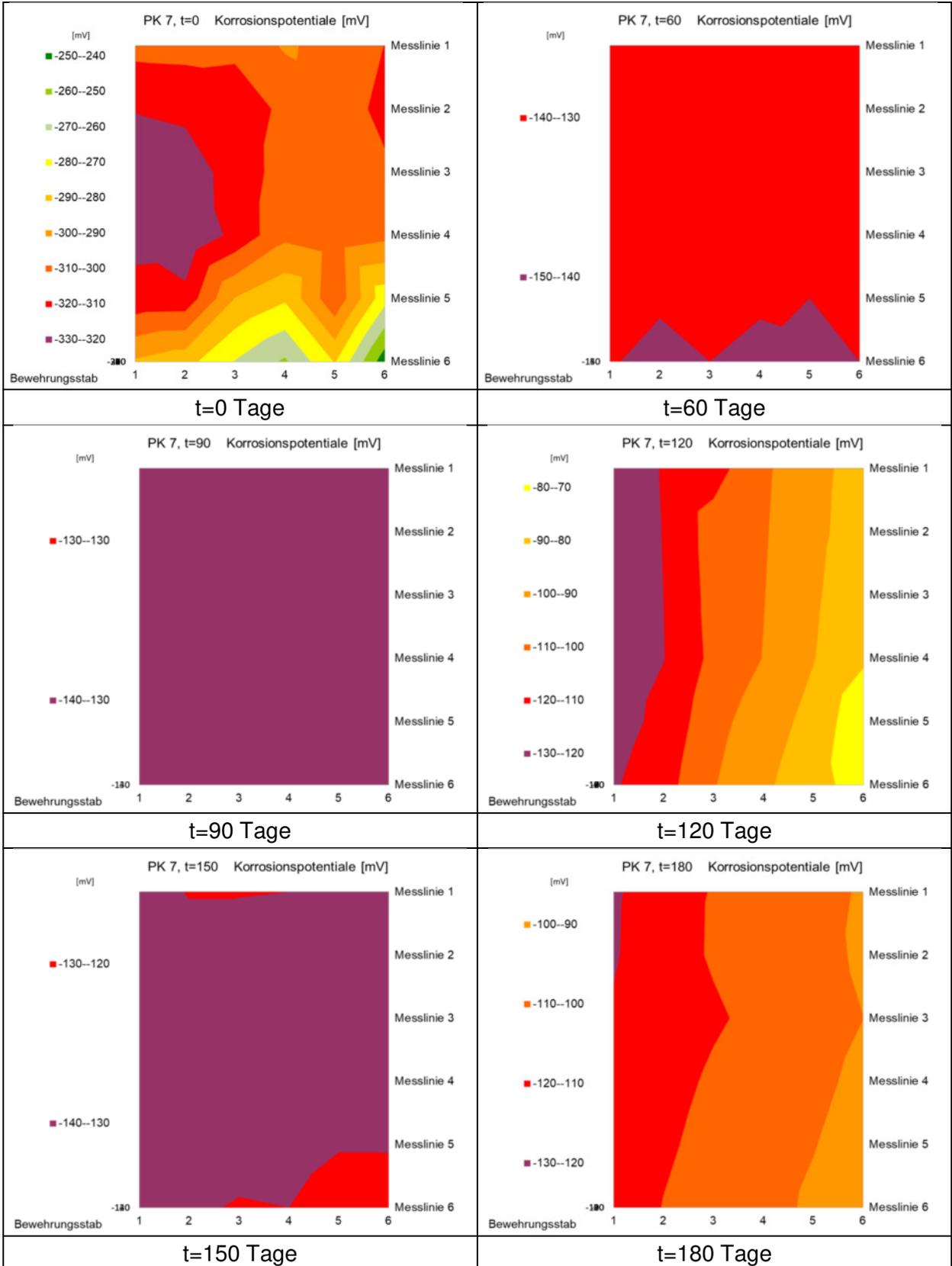
Zeitabhängige Potentialfeldmessungen – Auswertung Prüfkörper 5 – PF 2



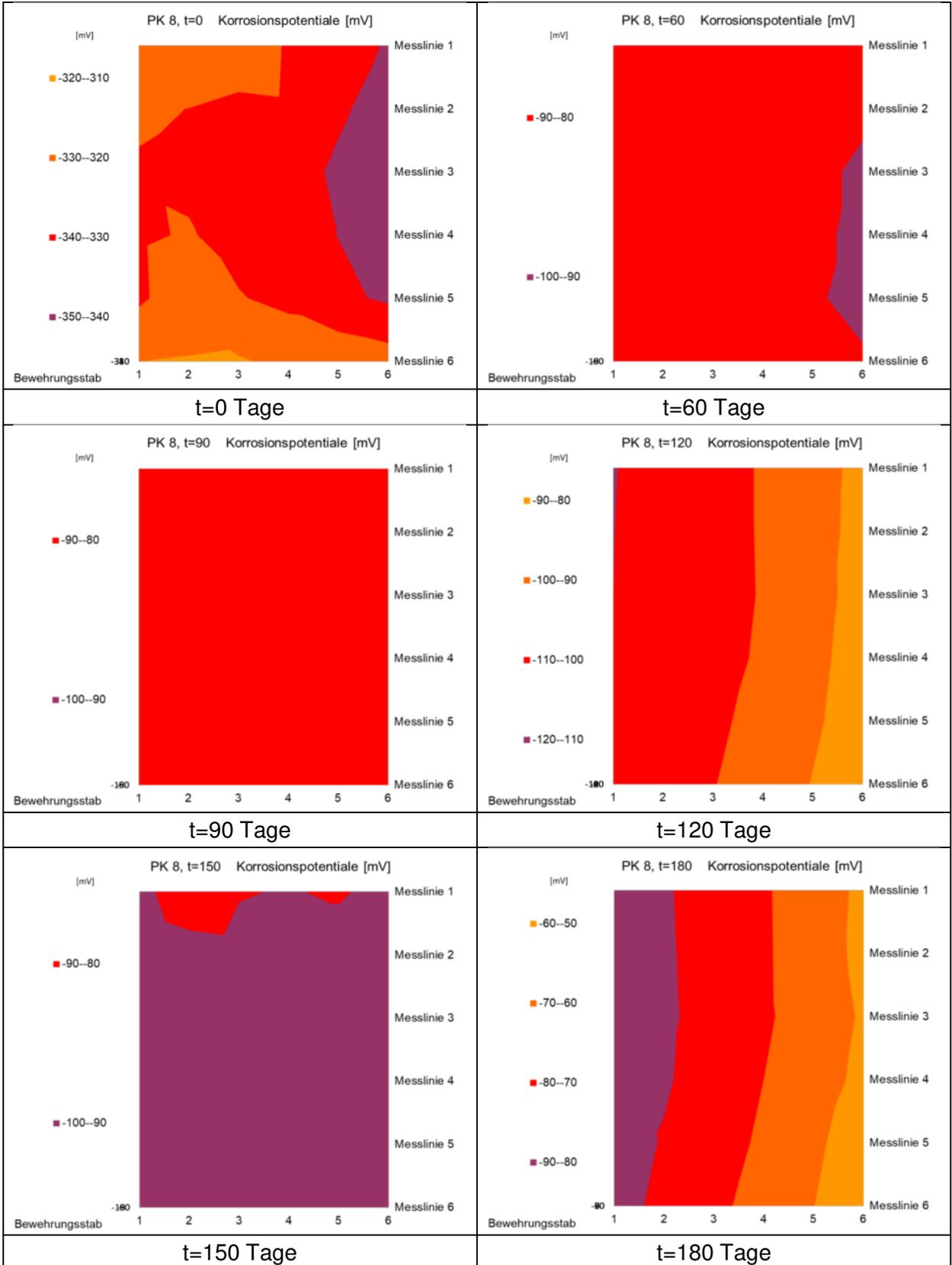
Zeitabhängige Potentialfeldmessungen – Auswertung Prüfkörper 6 – PF 2



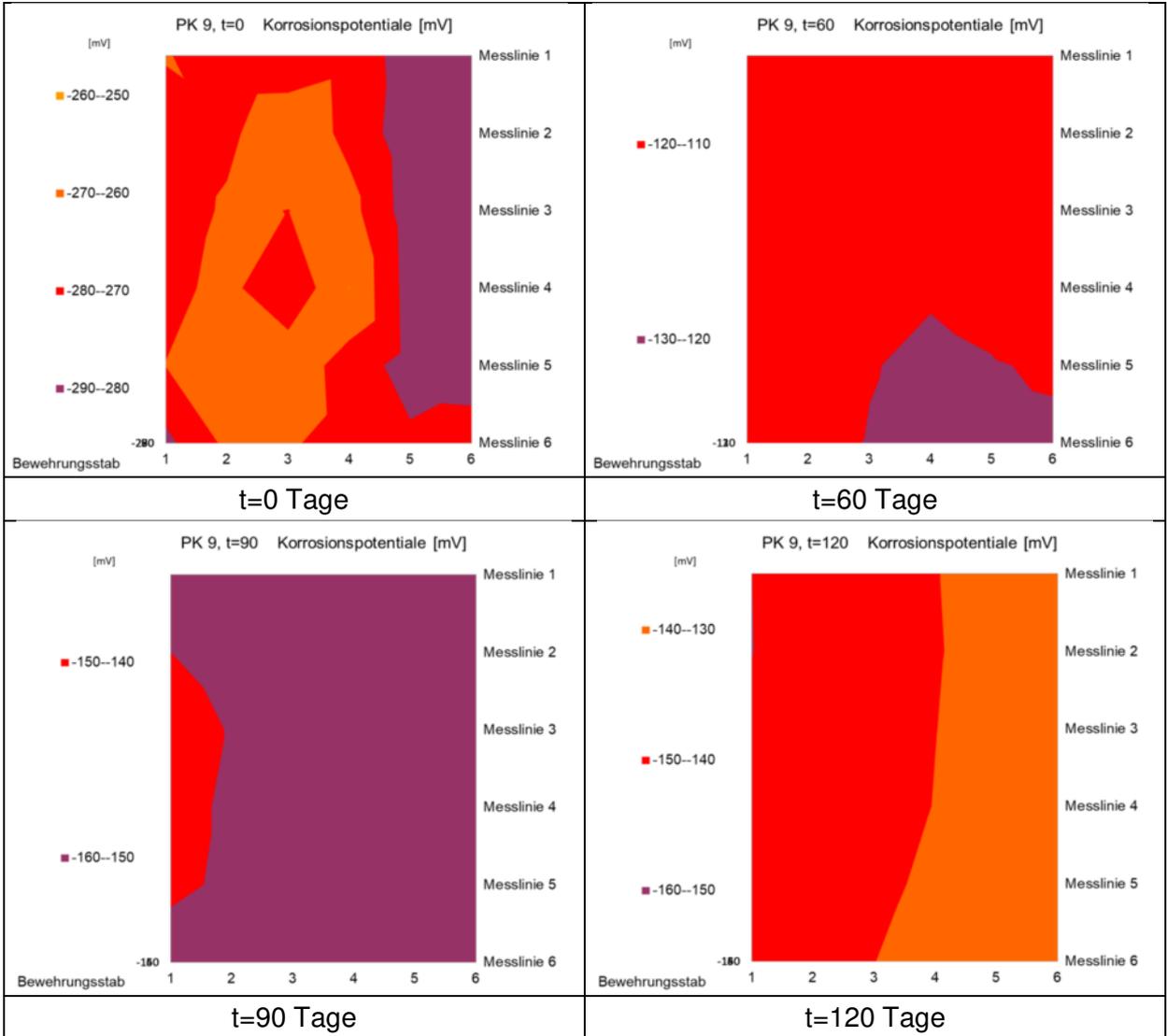
Zeitabhängige Potentialfeldmessungen – Auswertung Prüfkörper 7 – PF 3



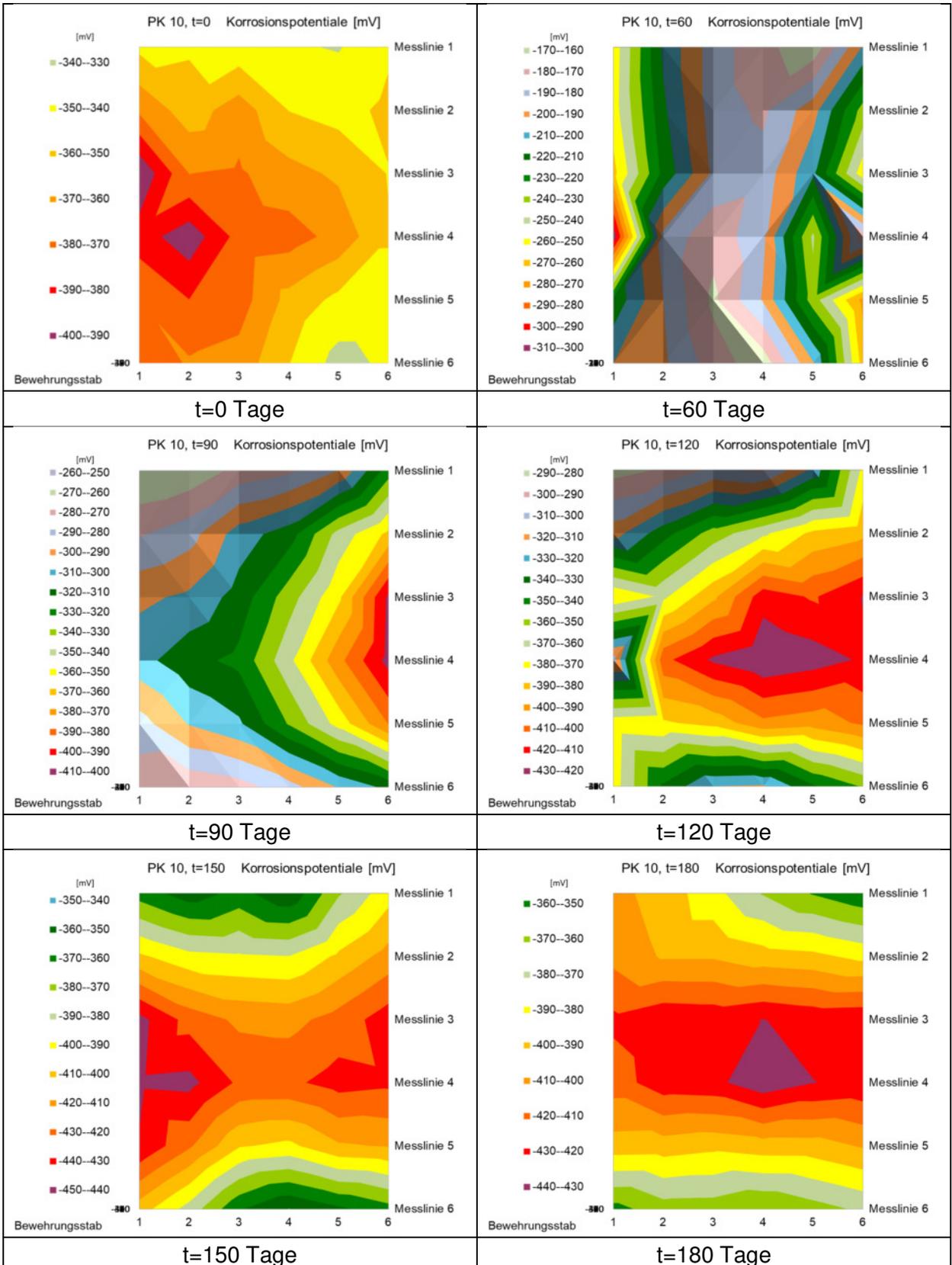
Zeitabhängige Potentialfeldmessungen – Auswertung Prüfkörper 8 – PF 3



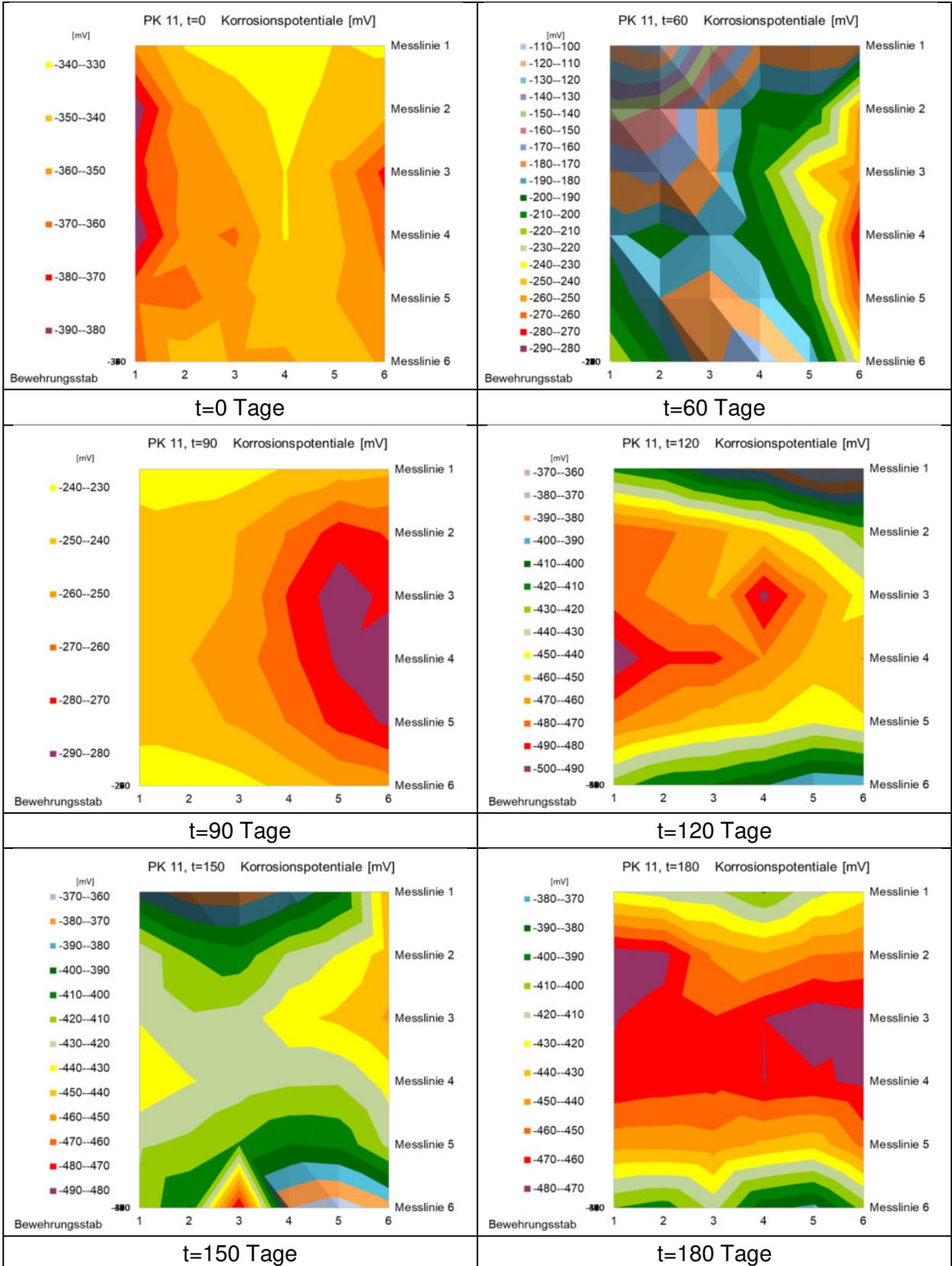
Zeitabhängige Potentialfeldmessungen – Auswertung Prüfkörper 9 – PF 3



Zeitabhängige Potentialfeldmessungen – Auswertung Prüfkörper 10 Normalklima



Zeitabhängige Potentialfeldmessungen – Auswertung Prüfkörper 11 Normalklima



Zeitabhängige Potentialfeldmessungen – Auswertung Prüfkörper 12 Normalklima

