

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
LEHRSTUHL FÜR WERKSTOFFE UND WERKSTOFFPRÜFUNG IM BAUWESEN

**Zur Verwertbarkeit von Potentialfeldmessungen für die
Zustandserfassung und -prognose von Stahlbetonbauteilen –
Validierung und Einsatz im Lebensdauermanagement**

Sylvia Keßler

Vollständiger Abdruck der von der
Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt der Technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Große
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Raupach,
RWTH Aachen

Die Dissertation wurde am 12.11.2014 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Ingenieur fakultät für Bau Geo Umwelt am 31.01.2015 angenommen.

*„Hat die Rostkrankheit einmal das Eisengerippe erfaßt,
so setzt sie im Innern des Bauwerks rastlos und unbemerkt ihre Zerstörungsarbeit weiter fort.“*

*vom Regierungs- und Baurat Perkuhn in Kattowitz,
Zeitschrift für Bauwesen, Verlag von Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin, 1916*

Vorwort

Diese Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung der TU München.

Meinem Doktorvater Herrn *Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen* danke ich für die Möglichkeit zur Durchführung dieses Forschungsvorhabens und das in mich gesetzte Vertrauen. Mit der Teilnahme an nationalen und internationalen Konferenzen ermöglichte er mir den intensiven Austausch mit weiteren Wissenschaftlern. Besonders herausheben möchte ich die Diskussionen mit *Dr.-Ing. Klaus Menzel*, MPA Stuttgart und *Daniel Kanzler M. Eng.*, BAM, die mir wertvolle Hilfestellung gegeben haben.

Persönlich gefreut hat mich die Übernahme des Zweitgutachtens durch Herrn *Prof. Dr.-Ing. Michael Raupach* und die Übernahme des Prüfungsvorsitzes durch *Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Große*. An dieser Stelle möchte ich mich für das Interesse an meiner Dissertation bedanken.

Den Lektoren dieser Arbeit *Dr.-Ing. Maximilian Huber*, *Dr.-Ing. Till Mayer* und *Max Nagel* danke ich für ihre investierte Freizeit und ihre hilfreichen Anregungen.

Besondere Unterstützung habe ich vom *Ingenieurbüro Schießl Gehlen Sodeikat GmbH* erhalten, das mir bereitwillig Inspektionsergebnisse zur Auswertung bereitgestellt hat und mir die Teilnahme an interessanten Bauwerksinspektionen ermöglichte.

Großen Dank spreche ich meinen Kolleginnen und Kollegen der Arbeitsgruppe „Stahl und Korrosion“ und meinen studentischen und wissenschaftlichen Hilfskräften aus, die mich bei der Durchführung der Labor- und Bauteilversuche unterstützt haben. Weiterhin bedanke ich mich bei allen anderen hier namentlich nicht genannten Mitarbeitern des Centrums für Baustoffe und Materialprüfung der TU München, die für die angenehme und konstruktive Arbeitsatmosphäre im Institut sorgen.

Charles Annis, P.E. Statistical Engineering danke ich für die Bereitstellung der Software zur POD-Analyse.

Abschließend bedanke ich mich bei allen Freunden und Verwandten für ihr Verständnis und ihre Unterstützung während der Entstehungsphase dieser Arbeit.

München im Februar 2015

Sylvia Keßler

Kurzfassung

Die chloridinduzierte Bewehrungskorrosion ist in der Regel der lebensdauerbestimmende Faktor in der Geschichte eines Stahlbetonbauwerkes. Zur Erhaltung der Leistungsfähigkeit der Infrastruktur ist die Kenntnis über den Zustand der Bewehrung entscheidend, ob und in welchen Bereichen Korrosionsprozesse ablaufen, um den Umfang von Instandsetzungsmaßnahmen zielgerichtet, nachhaltig und ökonomisch planen zu können. Die zerstörungsfreie Potentialfeldmethode ist das Werkzeug zur Identifikation korrodierender Bereiche in Stahlbetonbauwerken. Für die Zustandsbewertung und –prognose von Stahlbetonbauwerken ist neben den reinen Messdaten auch die Kenntnis über die Prüfqualität der Potentialfeldmessung maßgebend. Die Prüfqualität der Potentialfeldmessung wird auf Basis eines numerisch generierten Datensatzes ermittelt. Durch die Integration der Potentialfelddaten in die probabilistische Lebensdauerbetrachtung kann der Bauwerkszustand präziser vorhergesagt werden.

Abstract

For realistic and accurate description of the corrosion progress in reinforced concrete structures, the inspection results from detection of on-going corrosion are of vital importance, in particular for the probabilistic service life prediction. The crucial factor of the combination of inspection data and probabilistic service life prediction is the knowledge about the accuracy of the measurement method itself. The Probability of Detection is a main descriptor of the accuracy of qualitative inspection methods. In this research, an approach based on numerical models is pursued to obtain the Probability of Detection of potential mapping. Through the integration of the potential mapping data the condition of the structure and correspondingly the service life time can be predicted more accurately.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Motivation	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung und Vorgehensweise	2
2	Grundlagen zur Analyse der Prüfqualität von qualitativen Messverfahren	4
2.1	Einleitung	4
2.2	Die Ermittlung einer Probability of Detection-Kurve	4
2.2.1	Das Hit-Miss Modell	7
2.2.2	Das a versus \hat{a} Modell	8
2.3	Methodik zur Bewertung und Optimierung von Analyse-Strategien	10
2.4	Vorüberlegungen zur Analyse der Prüfqualität der Potentialfeldmessung	11
3	Die Potentialfeldmessung: Theoretische Grundlagen	13
3.1	Die Korrosion von Stahl in Beton	13
3.1.1	Die Passivierung - Depassivierung	13
3.1.2	Der Korrosionsprozess	14
3.2	Das Prinzip der Potentialfeldmessung	14
3.3	Die Einflussfaktoren auf die Potentialfeldmessung	16
3.3.1	Gruppe A: Die Ausbreitung des Potentialfeldes in einem Elektrolyten	17
3.3.2	Gruppe B: Die elektrokinetischen Effekte	19
3.3.3	Gruppe C: Das elektrochemische Potential der Elektroden	21
3.3.4	Gruppe D: Die Messdurchführung und Messdatenauswertung	25
3.3.5	Literaturauswertung zu den Einflussfaktoren der Potentialfeldmessung	27
3.3.6	Zusammenfassung der Literaturrecherche	31
4	Die numerische Simulation von Korrosionsprozessen	32
4.1	Die Boundary Elements Method (BEM)	32
4.2	Mathematische Grundlagen zur Boundary Elements Method (BEM)	32
4.3	Modellgenerierung	33
4.3.1	Eingabeparameter: Stromdichte-Potential-Kurven	34
4.3.2	Eingabeparameter: Spezifischer Elektrolytwiderstand des Betons	38
4.4	Literaturauswertung zur numerischen Simulation von Potentialverteilungen	38
4.5	Validierung der Boundary Elements Methods Software BEASY	40
4.5.1	Der elektrolytische Trog	41
4.5.2	Modellparameter des elektrolytischen Trogs	42
4.5.3	Auswertung der Messergebnisse vom elektrolytischen Trog	43
4.5.4	Vergleich der Simulations- und Messergebnisse vom elektrolytischen Trog	44
4.5.5	Das Modell Platte BAM	47
4.5.6	Zusammenfassung der Validierung	49

4.6	Grenzen der Numerik	50
5	Numerische Parameterstudie zur Ermittlung der dominanten Einflussfaktoren auf die Potentialfeldmessung	51
5.1	Numerische Modellbildung	51
5.2	Eingabeparameter der Numerik	52
5.2.1	Anodenfläche	52
5.2.2	Betondeckung	52
5.2.3	Elektrolytwiderstand	53
5.2.4	Ruhepotentiale	53
5.2.5	Treibspannung	55
5.2.6	Anodischer Polarisationswiderstand	55
5.2.7	Kathodische Tafelsteigung und Austauschstromdichte	55
5.3	Verarbeitung der Simulationsergebnisse	56
5.4	Auswertung der Simulationsergebnisse	57
5.5	Zusammenfassung der dominanten Einflussparameter auf die Potentialfeldmessung	60
6	Potentialfeldmessung an realen Bauteilen	62
6.1	Randbalken vom Olympiastadion München	62
6.2	Durchführung der Potentialfeldmessung	63
6.3	Kennwerte der Randbalken	64
6.4	Exposition der Randbalkensegmente	66
6.5	Präzision der Potentialfeldmessung	68
6.6	Einfluss des Messrasters	69
6.7	Einfluss der Oberflächenvorbehandlung	72
6.8	Einfluss der Witterungsbedingungen Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Niederschlag	74
6.9	Zusammenfassung der Messungen an den realen Bauteilen	79
7	Auswertung der Prüfqualität der Potentialfeldmessung mittels numerischer Methoden	80
7.1	Konzept	80
7.2	Grenzkriterium für die POD der Potentialfeldmessung	81
7.3	Diskussion der Modellauswahl zur Probability of Detection	82
7.3.1	Die POD in Abhängigkeit des Elektrolytwiderstands	85
7.3.2	Die POD in Abhängigkeit des Messrasters	86
7.3.3	Die POD in Abhängigkeit der Betondeckung	88
7.4	Zusammenfassung der numerisch bestimmten Prüfqualität der Potentialfeldmessung	90
8	Integration der POD der Potentialfeldmessung für die Zustandserfassung und -prognose von Stahlbetonbauteilen	92
8.1	Einleitung	92
8.2	Beispielbauwerk: Stützwand	93

8.2.1	Berechnung der a-priori-Wahrscheinlichkeit der Stützwand	93
8.2.2	Inspektionsdaten der Stützwand	95
8.3	Das Updaten der Lebensdauerprognose	97
8.3.1	Updaten mittels Betondeckungsmessung	97
8.3.2	Updaten mittels Potentialfelddaten	100
8.3.3	Vergleich der upgedateten Zustandsbewertung mit dem realen Bauwerkszustand	104
8.4	Zusammenfassung zur Integration der Potentialfeldmessung in die Zustandsbewertung	105
9	Zusammenfassung und Ausblick	106
	Literaturverzeichnis	108
Anhang A:	Ergebnisse zu den Randbalken aus dem Olympiastadion	
Anhang B:	Zusammenstellung der numerischen Studie	
Anhang C:	POD-Kurven	

1 Einleitung und Motivation

1.1 Problemstellung

Stahlbetonbauwerke sind ein wesentlicher Teil unserer Infrastruktur. Viele Stahlbetonbauwerke weisen während der geplanten Lebensdauer Bewehrungskorrosion auf, deren Folgeschäden, wie Risse und Abplatzungen des Betons, sich über die Nutzungszeit akkumulieren und zum lebensdauerbestimmenden Faktor eines Stahlbetonbauwerkes werden. Für das Risikomanagement alternder Bauwerke und für die Instandhaltungsplanung sind Bauwerksinspektionen notwendig, auf deren Datenbasis Zustandsbewertungen durchgeführt werden und der Korrosionszustand ermittelt wird.

Eine der Kernaufgaben des verantwortlichen Ingenieurs während einer Inspektion ist die zerstörungsfreie Detektion von korrosionsgefährdeten Bereichen in Stahlbetonbauwerken. Das meist angewandte zerstörungsfreie Prüfverfahren ist die visuelle Inspektion. Die visuelle Inspektion ist zwar in der Lage, die Folgeschäden der Bewehrungskorrosion wie Risse und Abplatzungen des Betons zu lokalisieren und zu bewerten, jedoch ist zu diesem Zeitpunkt der Schädigungsprozess weit fortgeschritten und kostenintensive Instandhaltungsmaßnahmen sind notwendig. Für ein präventives Instandhaltungsmanagement ist es essentiell, Korrosionsaktivitäten frühzeitig, d. h. bevor Risse auftreten, identifizieren zu können (Bild 1-1). Für diese Aufgabe bietet sich die Potentialfeldmessung als zerstörungsfreies Prüfverfahren an. Neben weiteren Untersuchungsmethoden spielt die Potentialfeldmessung die entscheidende Rolle bei der Zustandsbewertung und Instandsetzungsplanung von Bauwerken unter Korrosionsbeanspruchung. Die Potentialfeldmessung ermöglicht die Unterteilung eines Stahlbetonbauwerkes in korrosionsgefährdete (kritische) und unkritische Bereiche. Jedoch kann dieses Messverfahren nicht in allen Lebensphasen eines Bauwerkes sinnvoll eingesetzt werden.

Bild 1-1 zeigt ein Schädigungs-Zeit-Diagramm (Tuutti-Diagramm) mit den optimalen Applikationszeiträumen der Potentialfeldmessung an Stahlbetonbauwerken.

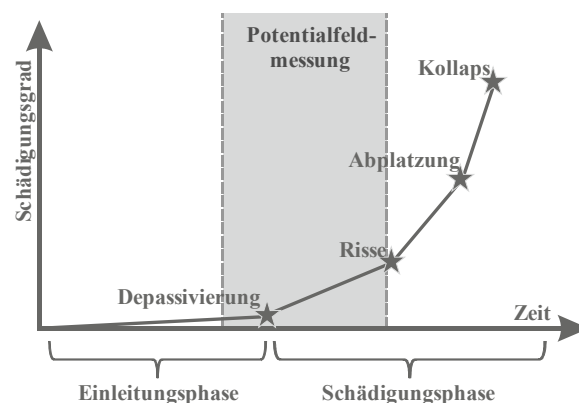


Bild 1-1: Schädigungs-Zeit-Diagramm mit optimalem Applikationszeitraum der Potentialfeldmessung.

An jungen, kaum mit Chloriden beaufschlagten Stahlbetonbauwerken ist die Messung von Potentialfeldern nicht sinnvoll, da die Korrosionsinitiierung ein zeitabhängiger Prozess ist. Zunächst muss der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt die Bewehrung erreicht haben. Dies wiederum

hängt von der Einwirkung, der anstehenden Chloridkonzentrationen und dem Materialwiderstand (Chloridmigrationskoeffizienten, Betondeckung) des Betons ab. Sind hingegen schon korrosionsinduzierte Risse auf der Betonoberfläche sichtbar, ist es für eine kostenoptimale und präventive Instandhaltungsstrategie zu spät [FIB11]. In diesem Fall ist die Potentialfeldmessung nur noch zweckmäßig, um den Umfang der Korrosionsaktivität zu bestimmen.

Neben der reinen Zustandsbewertung liefert die Potentialfeldmessung wichtige Informationen für die probabilistische Lebensdauerprognose von Stahlbetonbauwerken. Mit Hilfe der Potentialdaten kann unterschieden werden, ob bzw. in welchen Bereichen sich ein Bauteil noch in der Einleitungs- oder schon in der Schädigungsphase der Korrosion befindet und somit das Einleitungs- [Ge00] oder das Schädigungsmodell [Os13] Gültigkeit besitzt.

Kein zerstörungsfreies Prüfverfahren ist perfekt – auch nicht die Potentialfeldmessung. Jedoch fehlt eine fundierte, quantitative Beschreibung der Prüfqualität der Potentialfeldmessung. Mangelnde Informationen zur Prüfqualität der Potentialfeldmessung können zu fehlgeleiteten Entscheidungen in der Instandhaltungsplanung – d. h. zu unnötigen Instandsetzungen oder übersehenen Schäden - führen.

Generell gibt es in der Literatur kaum Beschreibungen zur Prüfqualität gängiger Zustandserfassungsmethoden von Stahlbetonbauwerken. Erste Ansätze auf dem Gebiet der quantitativen Messmethoden, z. B. Betondeckungsmessung, wurden von Taffe [Ta08] und der qualitativen Messmethoden von Feistkorn [Fe12] am Beispiel des Impulsradarverfahrens erarbeitet. Elektrochemische Methoden, wie die Potentialfeldmessung, standen bisher nicht im Fokus.

Neben dem mangelndem Wissen über die Leistungsfähigkeit der Potentialfeldmessung bleibt auch das bedeutende Instrument des Updatens der probabilistischen Lebensdauerprognose nach Bayes mittels Potentialdaten ungenutzt. Beispielsweise kann für chloridinduzierte Bewehrungskorrosion die Dauer der Einleitungsphase in Form einer Depassivierungswahrscheinlichkeit probabilistisch vorhergesagt werden. Zusätzliche Informationen zum Korrosionszustand aus der Potentialfeldmessung können bisher nicht in die probabilistische Lebensdauerprognose integriert werden, da die Kenntnis über die Qualität der Potentialfeldmessung fehlt

Erste grobe Ansätze zur Nutzung der Potentialfelddaten zum Updaten der Lebensdauerprognose wurden zwar schon veröffentlicht [FaGe02, FaSo02, GeGr10, KeFi14], bisher fehlt aber die probabilistische Beschreibung der Prüfqualität der Potentialfeldmessung, die für das Updaten mittels des Bayes'schen Ansatz essentiell ist.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel dieser Arbeit ist die quantitative Beschreibung der Prüfqualität der Potentialfeldmessung. Die Kenntnis der Prüfqualität ermöglicht neben der Bestimmung der Zuverlässigkeit jeder einzelnen Messung auch die Durchführung von probabilistischen Zustandsbewertungen und –prognosen von Stahlbetonbauwerken mit Hilfe der Potentialdaten.

Müller et al. [Mü03] definiert die Zuverlässigkeit von zerstörungsfreien Prüfverfahren folgendermaßen: “Non-destructive estimation (NDE) reliability is the degree that a non-destructive

testing system is capable of achieving its purpose regarding detection, characterization and false calls, where the NDE system consists of the procedures, equipment and personnel that are used in performing NDE inspection”.

Um dieser in der Literatur anerkannten Definition gerecht zu werden, bietet sich die Probability of Detection-Kurve (POD) zur Beschreibung der Prüfqualität von qualitativen Messverfahren an. Die Probability of Detection-Kurve drückt die Wahrscheinlichkeit der Detektion eines Defektes in Abhängigkeit der Defektgröße aus. Neben der Defektgröße sind POD-Kurven zusätzlich von allen Einflussfaktoren abhängig, die das zu untersuchende zerstörungsfreie Prüfverfahren – hier die Potentialfeldmessung – beeinflussen.

In der Literatur stehen verschiedene Modelle zur Auswertung von POD-Kurven zur Verfügung. Ein wesentlicher Schritt ist die Auswahl des für die Potentialfeldmessung geeigneten POD-Modells.

Der erste wichtige Schritt zur Erreichung des Forschungszieles (Bild 1-2) ist die Identifikation der dominanten Einflussfaktoren auf die Potentialfeldmessung. Neben einer Literaturrecherche und Modellmessungen an einem „Elektrolytischen Trog“ erfolgt dieser Schritt mit Hilfe von numerischen Parameterstudien. Abschließend werden die identifizierten Einflussfaktoren durch Messungen an realen Bauteilen verifiziert.

Anschließend werden Probability of Detection-Kurven an einer Bauteilgeometrie numerisch aufgestellt und diskutiert. Final wird das Konzept zum Updaten der Lebensdauerprognose mittels Potentialfelddaten vorgestellt und an einer Beispielrechnung demonstriert.

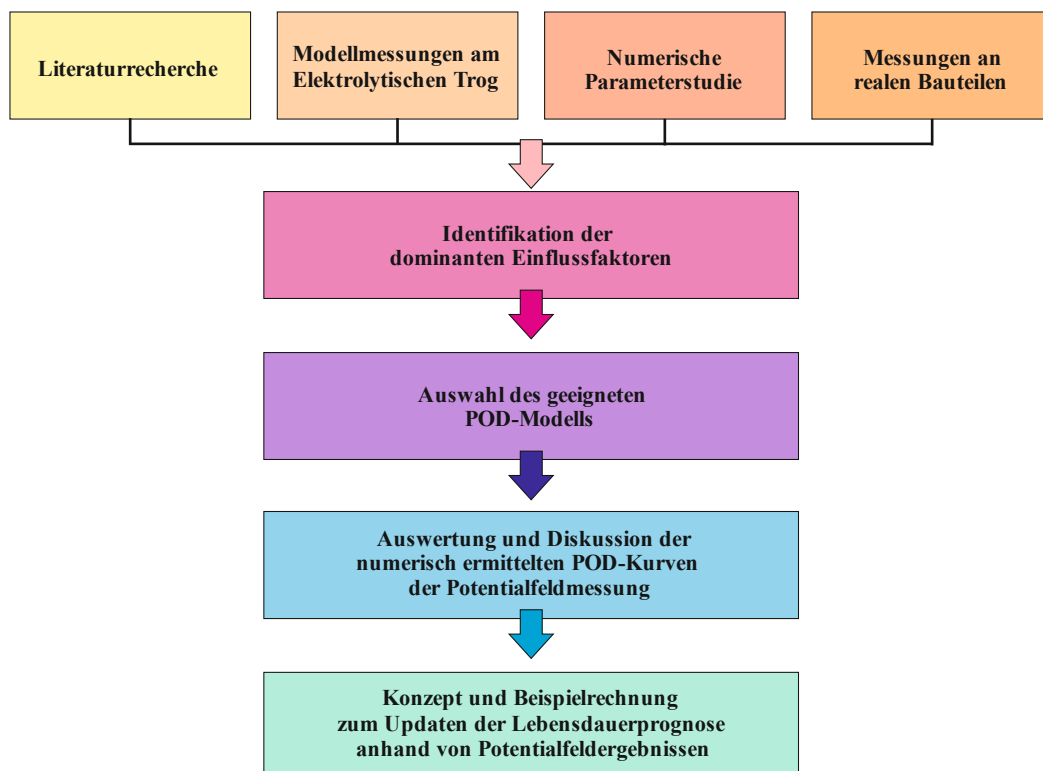


Bild 1-2: Vorgehensweise zur Erreichung des Forschungszieles.

2 Grundlagen zur Analyse der Prüfqualität von qualitativen Messverfahren

2.1 Einleitung

Die Potentialfeldmessung ist, obwohl sie quantitative Potentialwerte liefert, ein rein qualitatives Messverfahren. Die resultierende Prüfaussage der Potentialfeldmessung lautet: entweder „Korrosion“ oder „keine Korrosion“.

Die Zuverlässigkeit von zerstörungsfreien, qualitativen Messverfahren kann definiert werden als die Wahrscheinlichkeit, einen Defekt zu identifizieren [Ge06]; hierbei sind die Messdurchführung und Inspektionsbedingungen vordefiniert. Die Probability of Detection beschreibt dies mittels statistischer Methoden. Die Probability of Detection wird meist in Abhängigkeit der Defektgröße in Form von Probability of Detection-Kurven ausgedrückt.

POD-Kurven hängen neben der Defektgröße von vielen weiteren Parametern ab. Müller et al. [Mü09] setzen die Zuverlässigkeit bei jeder Anwendung von zerstörungsfreien Prüfsystemen aus den Faktoren Intrinsic Capability, Application Factor und dem Human Factor zusammen. Die intrinsische Fähigkeit steht für das hinterlegte physikalische Messprinzip inklusive technischer Realisierung und der Anwendungsfaktor beschreibt beispielsweise die Ankopplung oder das Rauschen. Der menschliche Faktor berücksichtigt den Einfluss des Prüfpersonals und der Prüfbedingungen.

Probability of Detection–Kurven ermöglichen das Updaten probabilistischer Modelle mittels des Bayes'schen Ansatzes [Ho97, KeFi14].

Sind neben der Probability of Detection (POD) noch zusätzliche Informationen zur Probability of False Alarm (PFA) bekannt, können auch Receiver Operating Characteristic (ROC) zur Beschreibung der Prüfqualität herangezogen werden. In den folgenden Abschnitten wird auf die Herleitung dieser Parameter zur Beschreibung der Zuverlässigkeit von qualitativen Messsystemen eingegangen.

2.2 Die Ermittlung einer Probability of Detection-Kurve

Probability of Detection-Kurven (POD-Kurven) beschreiben die Wahrscheinlichkeit der Detektion eines Defektes in Abhängigkeit der Defektgröße. Die Beschreibung der POD in Abhängigkeit der Defektgröße wurde festgelegt, da die Defektgröße für die meisten Messverfahren der dominante Einflussfaktor ist. Die für die Potentialfeldmessung entsprechende Defektgröße ist die Anodenfläche. Allgemeine Verläufe von POD-Kurven sind beispielhaft in Bild 2-1 dargestellt.

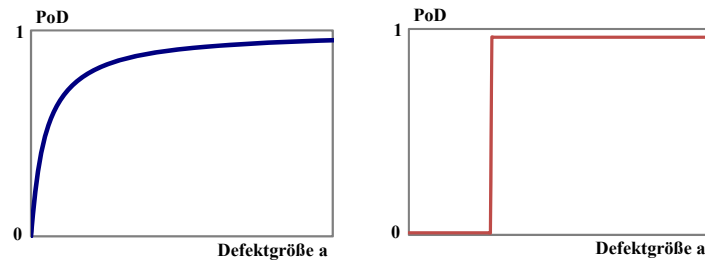
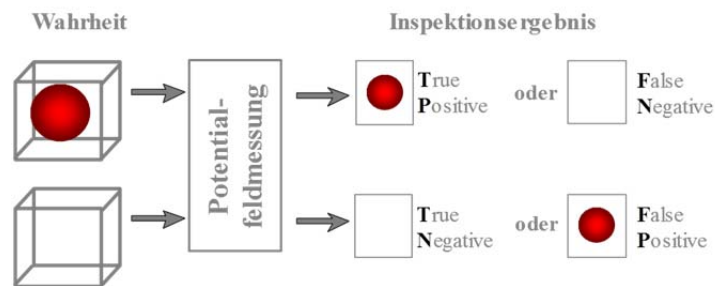


Bild 2-1: Qualitativer Verlauf einer imperfekten (links) und einer perfekten POD(a)-Kurve (rechts).

Mit steigender Defektgröße a erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, diesen Defekt aufzufinden. Eine POD(a)-Kurve liegt immer im Wertebereich von $POD = 0\%$ und $POD = 100\%$. Ein Wert von $POD = 0\%$ bedeutet, dass kein Defekt detektiert werden kann bzw. bezeichnet die kleinste Defektgröße, die gerade nicht mehr gefunden werden kann. Dahingegen können bei einem Wert von $POD = 100\%$ alle Defekte identifiziert werden. Ein perfektes Messsystem bzw. eine ideale POD(a)-Kurve zeigt eine Sprungfunktion, Bild 2-1 rechts. Jeder Defekt ab einer kritischen Defektgröße a_{krit} kann mit einer Detektionswahrscheinlichkeit von $POD = 100\%$ identifiziert werden. Normalerweise ergibt sich eine POD(a)-Kurve, wie sie in Bild 2-1 links abgebildet ist, da POD(a)-Kurven in der Realität durch weitere Einflussfaktoren beeinflusst werden.

Für die Analyse von POD-Kurven ist ein Vergleich der gemessenen Daten (hier: Potentialwerte) mit dem wahren Bauwerkszustand (hier: Korrosionszustand der Bewehrung) notwendig. Der wahre Zustand der Bewehrung kann nur durch Zerstörung der Betondeckung visuell untersucht werden. Aus dem Vergleich des wahren Zustandes mit dem Messergebnis können grundsätzlich vier Situationen abgeleitet werden, siehe Bild 2-2.



- TP: „true positive“ $P(I|C)$ vorhandene Korrosionsstelle richtig angezeigt (Treffer)
- FN: „false negative“ $P(\bar{I}|C)$ vorhandene Korrosionsstelle nicht angezeigt (Vermisst)
- TN: „true negative“ $P(\bar{I}|\bar{C})$ nicht vorhandene Korrosionsstelle richtig angezeigt
- FP: „false positive“ $P(I|\bar{C})$ nicht vorhandene Korrosionsstelle angezeigt (Falschanzeige)

Bild 2-2: Mögliche Situationen nach dem Vergleich: wahrer Zustand – Messergebnis.

Ein mögliches Ergebnis ist TP, die Bewehrung korrodiert und Korrosion wird detektiert. TP kann auch über die Wahrscheinlichkeit $P(I|C)$ ausgedrückt werden, dass Korrosion identifiziert wird, wenn Korrosion vorliegt. Für eine nicht angezeigte vorhandene Korrosionsstelle $P(\bar{I}|C)$, FN, gilt die Wahrscheinlichkeit, dass Korrosion nicht angezeigt wird, wenn Korrosion vorliegt. TN oder auch $P(\bar{I}|\bar{C})$ beschreibt den Fall, dass keine Korrosion gefunden wird, wenn keine Korrosion vorliegt. Wird

eine nicht vorhandene Korrosionsstelle fälschlicherweise angezeigt, FP, so ergibt sich die Wahrscheinlichkeit $P(I|\bar{C})$.

Die historisch erste und einfachste Methode zur Berechnung der Probability of Detection (POD), ergibt sich nach folgender Gleichung 2-1.

$$POD = \frac{TP}{TP+FN} = \frac{\text{Anzahl gefundener Defekte } n}{\text{Gesamtanzahl der Defekte } N} \quad (2-1)$$

Jedoch sind größere Defekte besser zu detektieren als kleinere Defekte. Dieser Effekt wird bei dieser Art der Auswertung vernachlässigt. Daraufhin wurden die Defekte in verschiedene Defektgrößenbereiche a_i eingeteilt, Bild 2-3. Im Anschluss wurde die $POD(a_i)$ für jeden Bereich separat aus dem Verhältnis n/N berechnet.

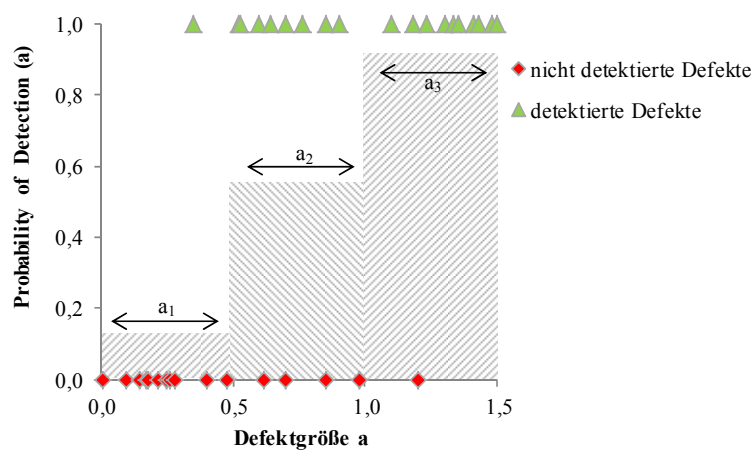


Bild 2-3: Ermittlung der Probability of Detection nach Defektgrößenbereiche a_i , in Anlehnung an [MIL09].

Mit diesem Vorgehen werden Informationen für unterschiedliche Defektgrößenbereiche untersucht, aber gleichzeitig stehen nun weniger Informationen für eine globale, den Gesamtbereich umfassende, $POD(a)$ -Analyse zur Verfügung. Für jeden Defektgrößenbereich wird eine große Anzahl an Daten gefordert. Für eine statistisch ausreichende Anzahl an Werten können die Defektgrößenbereiche erweitert werden, jedoch wird dann die Aussagekraft einer definierten Defektgröße verschlechtert. Wiederholmessungen unter identischen Randbedingungen zur Vergrößerung der Datensätze sind ebenfalls keine Lösung, da durch dieses Vorgehen lediglich die inhärente Variabilität des Systems erfasst wird [Br00]. Hingegen ist eine genauere statistische Untersuchung der resultierenden binären Datensätze zweckmäßig. Hierbei wird der binäre Datensatz, ob ein Defekt vorliegt oder nicht, analysiert, welcher sich aus der mathematischen Beziehung zwischen POD und Defektgröße ergeben. Aus diesen Datensätzen kann mittels einer binären Regression eine $POD(a)$ -Kurve ermittelt werden. Auf diesem Prinzip beruht das Hit-Miss Modell.

2.2.1 Das Hit-Miss Modell

Das Hit-Miss Modell leitet sich von den Prüfaussagen ab, ob ein Defekt detektiert werden kann („1“ bzw. Hit) oder nicht („0“ bzw. Miss). Zur Analyse dieses binären Datensatzes bieten sich verschiedene Verteilungen an. Die log-logistic Verteilung, Gleichung 2-2, ist eine mögliche Verteilungen für die Aufstellung des Hit-Miss Modells.

$$POD(a) = \frac{\frac{\pi}{e^{\sqrt{3}} \left(\frac{\ln a - \mu}{\sigma} \right)}}{1 + \frac{\pi}{e^{\sqrt{3}} \left(\frac{\ln a - \mu}{\sigma} \right)}} \quad (2-2)$$

mit a: Defektgröße
 μ : Mittelwerte der Hit-Miss-Verteilung
 σ : Standardabweichung der Hit-Miss-Verteilung

Die Ergebnisse der entsprechenden POD-Analyse können anschließend als POD-Kurve dargestellt werden, Bild 2-4.

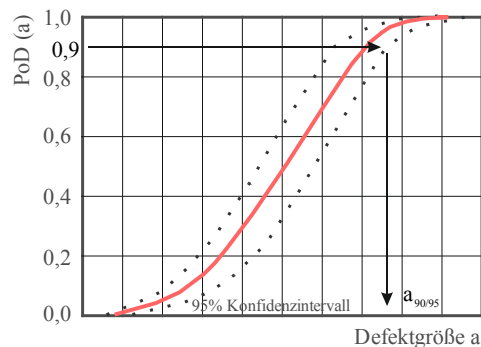


Bild 2-4: Probability of Detection Kurve nach dem Hit-Miss-Modell, in Anlehnung an [MIL09, Br89].

Aus einer solchen $POD(a)$ -Kurve kann der Kennwert $a_{90/95}$ entnommen werden. Dieser Kennwert gibt die Defektgröße an, die mit einer Wahrscheinlichkeit von 90% innerhalb eines Konfidenzintervalls von 95 % detektiert wird. Somit kann er als Gütekriterium eines ZfP-Systems aufgefasst werden [MIL09, Fe12].

Innerhalb eines Hit-Miss Modells tragen POD-Werte von $POD = 0\%$ oder $POD = 100\%$, die außerhalb des Unsicherheitsbereiches liegen, nur geringe Informationen zur Zuverlässigkeit des Messsystems bei. Dies bedeutet, dass der „effektive“ Probenumfang nicht zwangsläufig der Gesamtanzahl an Defekten in einem Experiment entspricht [Br00]. Beispielsweise wird durch die Hinzunahme von vielen großen Defekten nicht die Präzision einer $POD(a)$ -Funktion verbessert. Idealerweise liegen 80 % der Defektgrößen im Bereich von $0,1 < POD < 0,9$ und die Defektgrößen sollen einheitlich variieren [Br00]. [MIL09] empfiehlt für eine zuverlässige POD-Analyse ein Minimum von 60 Defektgrößen innerhalb des oben genannten Bereiches.

Im vorliegenden Hit-Miss POD-Modell findet der gewählte Grenzwert, der bei der Auswertung der Messdaten festlegt, ob nun ein Defekt vorliegt oder nicht, keine Berücksichtigung. Daher wurde das sogenannte $a_{vs. \hat{a}}$ Modell entwickelt, das bei der Auswertung der POD den gewählten Grenzwert beinhaltet.

2.2.2 Das a versus \hat{a} Modell

Das a vs. \hat{a} Modell zur Auswertung einer $POD(a)$ -Kurve beruht auf einem physikalischen oder elektrochemischen Zusammenhang der charakteristischen Größe a (Anodenfläche) und der Prüfsystemantwort \hat{a} (gemessene Potentialwerte). Nach der Festlegung eines Grenzwertes \hat{a}_{dec} (Grenzpotential) wird der Kennwert $a_{90/95}$ berechnet. Bild 2-5 zeigt die aus dem a vs. \hat{a} Modell berechneten $POD(a)$ -Kurven. Die $POD(a)$ -Kurven stellen die prozentualen Flächenanteile der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der gemessenen Prüfsystemantwort \hat{a} der jeweiligen Defektgrößen dar, die oberhalb des Grenzwertes \hat{a}_{dec} liegen.

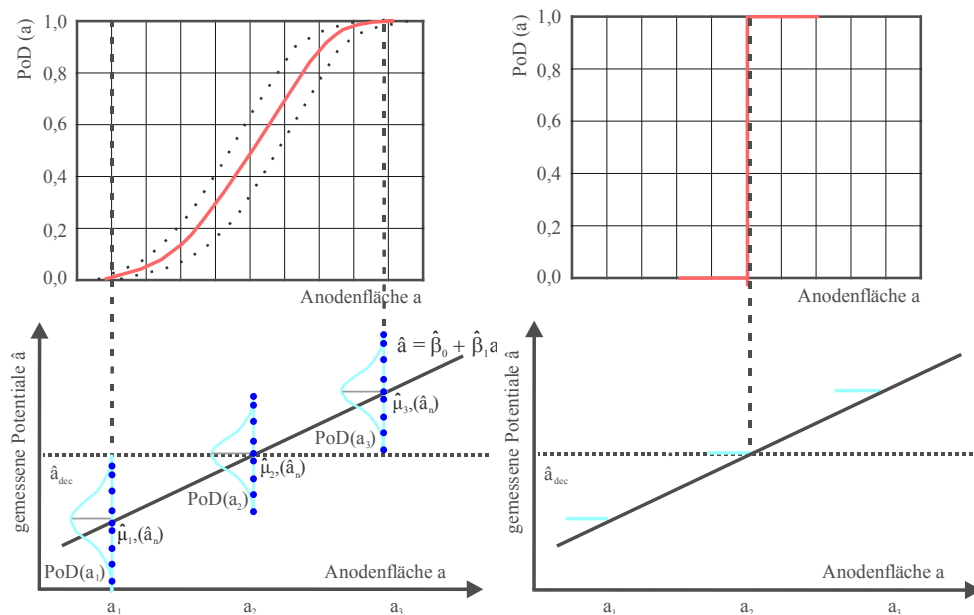


Bild 2-5: Qualitativer Zusammenhang zwischen der $POD(a)$ -Kurve und dem a vs. \hat{a} Modell bei nicht streuenden (links) und streuenden (rechts) Messdaten \hat{a} .

Die Streuung der Signalamplituden resultiert aus dem Prüfsystemrauschen sowie dem Materialrauschen. Das Rauschen bezeichnet hierbei die Menge aller zufällig verteilten Störsignale. Bei der Potentialfeldmessung ist das stärkste Störsignal die elektrochemische Potentialverteilung der kathodisch wirkenden Bewehrung.

Das a vs. \hat{a} Modell setzt eine lineare bzw. linearisierbare Beziehung zwischen der Defektgröße a und der Prüfsystemantwort \hat{a} voraus, Gleichung 2-3.

$$\hat{a} = \beta_0 + \beta_1 \cdot a + \epsilon \quad (2-3)$$

Die Parameter β_0 und β_1 sind Regressionsparameter, die mit Hilfe der Maximum Likelihood Methode ermittelt werden. Der additive Fehlerterm ϵ wird mit einer Normalverteilung beschrieben, da die POD -Analysen ebenfalls auf normalverteilten Verteilungs- und Dichtefunktionen beruhen.

Basierend auf der Definition, dass die Probability of Detection der Fläche über der Entscheidungsschwelle (Grenzpotential \hat{a}_{dec}) unter der Kurve der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung entspricht, ergeben sich folgende Gleichungen zur Berechnung der POD .

$$POD(a) = \int_{\hat{a}_{dec}}^{\infty} N(\hat{a}|\mu, \sigma) d\hat{a} \quad (2-4)$$

$$N(\hat{a}|\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\hat{a}-\mu}{\sigma}\right)^2\right) \quad (2-5)$$

mit:

$$\mu_{\hat{a}} = f(a) = \beta_0 + \beta_1 \cdot a \quad (2-6)$$

$$\sigma_{\hat{a}} = \text{const.} \quad (2-7)$$

Folgende Bedingungen, die sich aus dem zugrunde liegenden statistischen Modell ergeben, muss das a vs. \hat{a} Modell erfüllen [MIL09]:

- i. linearer bzw. linearisierbarer Zusammenhang zwischen der Defektgröße a und der Prüfsystemantwort \hat{a} (Gleichung 2-3)
- ii. homogene Varianzen der Prüfsystemantworten \hat{a} (Gleichung 2-7)
- iii. unkorrelierte Prüfsystemantworten \hat{a} (unabhängige Experimente)
- iv. normalverteilte Prüfsystemantworten \hat{a} (Gleichung 2-5)

Die a vs. \hat{a} Analyse bietet mehr Informationen als eine einfache Hit-Miss Analyse und lässt auch innerhalb eines akzeptablen Bereich eine Extrapolation zu [Br00]. Aufgrund dessen sind die Wahl und der Bereich der Defektgrößen für eine POD-Analyse weniger kritischer als bei der Hit-Miss Analyse. In der a vs. \hat{a} Analyse liefern alle aufgenommenen Signale \hat{a} volle Informationen zum Verhältnis Messwert und Defektgröße. Daher ist die empfohlene Mindestanzahl an Defekten mit 30 kleiner als bei der Hit-Miss Analyse. Jedoch steigt die Genauigkeit einer POD(a)-Funktion auf Basis einer a vs. \hat{a} Analyse mit steigendem Probenumfang [Ge06].

Die Festlegung eines Entscheidungsschwellwertes \hat{a}_{dec} ist in Bild 2-6 dargestellt. Der Entscheidungsschwellwert \hat{a}_{dec} , der dem Grenzpotential entspricht, ist in Bild 2-5 dargestellt. Das Grenzpotential definiert die Signalthöhe (Potentialwert), ab der ein Potentialwert als Signal für Korrosion gewertet wird. Dieses Verfahren beruht auf der Trennung der Wahrscheinlichkeitsdichten der aktiven und passiven Potentialwerte.

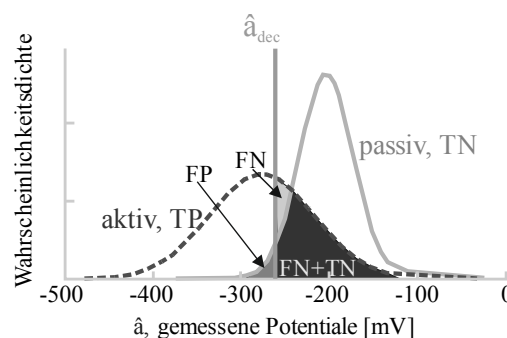


Bild 2-6: Festlegung eines möglichen Grenzpotentials \hat{a}_{dec} mit möglichen Konsequenzen.

Ist das gemessene Potential positiver als das Grenzpotential \hat{a}_{dec} der Anodenfläche a, wird die Amplitude \hat{a} als Rauschen (Störsignal) gewertet. Ist das Potential hingegen negativer, so wird es als Signal (Nutzsignal) interpretiert. Mit positiveren Grenzpotential \hat{a}_{dec} steigt die Empfindlichkeit der

Potentialfeldmessung, die Detektionswahrscheinlichkeit wächst. Jedoch erhöht sich ebenso die Wahrscheinlichkeit für Fehlalarme.

Die Flächenanteile der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Prüfsystemantwort (gemessene Potentiale) \hat{a} , die oberhalb des Grenzwertes \hat{a}_{dec} liegen, entsprechen der Wahrscheinlichkeit, dass die Anodenfläche a detektiert wird, siehe Bild 2-5. Somit ist die POD(a)-Kurve eine kumulierte Darstellung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Normalverteilung. Eine Detektionswahrscheinlichkeit von 100 % wird dann erreicht, wenn alle Signalamplituden oberhalb von \hat{a}_{dec} liegen. Im entgegengesetzten Fall, dass alle Signalamplituden unterhalb von \hat{a}_{dec} liegen, beläuft sich die Detektionswahrscheinlichkeit auf 0 %.

Zur Auswertung des idealen Grenzwerts, d. h. dem idealen Verhältnis zwischen Detektionswahrscheinlichkeit und Fehlalarmwahrscheinlichkeit, können Receiver Operating Characteristic-Kurven herangezogen werden.

2.3 Methodik zur Bewertung und Optimierung von Analyse-Strategien

Die Aufstellung von Receiver Operating Characteristic-Kurven (ROC-Kurven) ist eine Methode zur Bewertung und Optimierung von Analyse-Strategien. Mit Hilfe der Größen POD und PFA, Probability of False Alarm, kann die Zuverlässigkeit einer Untersuchungsmethode anhand der Datenauswertung beschrieben werden. Die PFA beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Schaden erkannt wird, obwohl kein Schaden vorliegt, d. h. unnötigerweise Instandsetzungsmaßnahmen angeordnet werden.

Zur Gewährleistung einer guten Detektionsleistung sollte die Probability of Detection immer größer sein als die Probability of False Alarm. Bei der Interpretation von ROC-Kurven ist zu beachten, dass die Probability of False Alarm vom Rauschen und dem Grenzwert abhängt. Die Probability of False Alarm wird nur von der Defektgröße beeinflusst, wenn auch das Rauschen davon bestimmt wird [RoScho03]. Die Probability of Detection ist hingegen eine Funktion des Grenzwertes, der Defektgröße und des Rauschens. Für einen gegebenen Grenzwert ist die Probability of False Alarm eine Konstante und die Probability of Detection eine steigende Funktion über die Defektgröße [RoScho03]. Für jeden möglichen Grenzwert werden die resultierenden ROC-Kurven ermittelt. Anschließend können die ROC-Kurven zur Grenzwertoptimierung genutzt werden.

Für den Aufbau einer ROC-Kurve werden in einem Diagramm mit der Ordinate der Wahrscheinlichkeit von TP (POD) und der Abszisse mit der Wahrscheinlichkeit von FP (PFA) die entsprechenden Wertepaare eingetragen. Für die meisten realen Messmethoden ergibt sich eine gekrümmte, parabelartige Kurve (Bild 2-7 links).

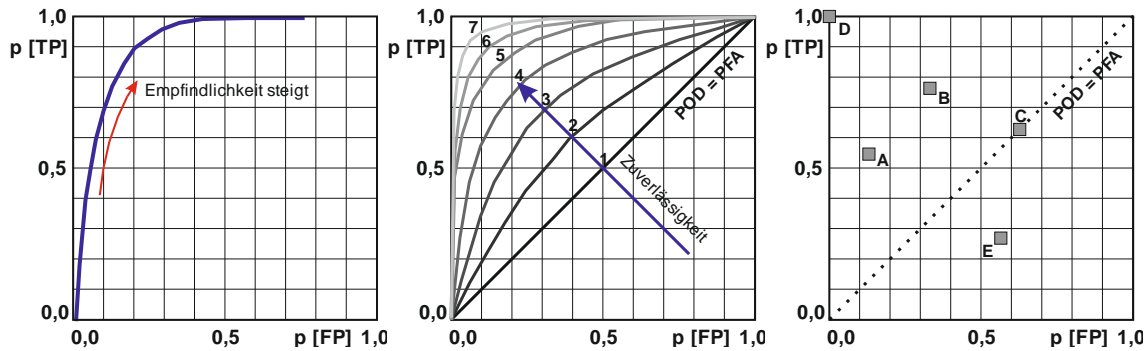


Bild 2-7: Receiver Operating Characteristic (ROC) Kurven (links), Vergleich unterschiedlicher Systeme mit ROC-Kurven (Mitte [Mü03]) und fünf diskreten Klassifikatoren (rechts [Fa06]).

Im Diagramm (Bild 2-7, Mitte) werden unterschiedliche Systeme mit ROC-Kurven verglichen. Das System 1 erzielt stets mit gleicher Wahrscheinlichkeit richtige und falsche Prüfergebnisse, ob ein Prüfabschnitt defekt ist oder nicht. Dies gilt ebenfalls für Punkt C, der auf der Geraden zwischen den Punkten PFA, $POD = [0,0]$ und PFA, $POD = [1,1]$ liegt. Die Zuverlässigkeit der Prüfaussage steigt von System 1 bis zu System 7 an. Bei einer perfekten Messung reduziert sich die ROC-Kurve zu einem einzigen Punkt (Punkt D) mit den Koordinaten PFA, $POD = [0,1]$. Klassifikatoren (z. B. Punkt A) auf der linken Seite der ROC-Kurve nahe der x-Achse unterliegen meist einer „konservativen“ Entscheidung. Es wird zwar eine sehr geringe Wahrscheinlichkeit von Fehlalarmen (PFA) erreicht, jedoch nur in Verbindung mit einer geringen Detektionswahrscheinlichkeit (POD). Beispielsweise ist in Bild 2-7 (rechts) Punkt A konservativer einzuschätzen als Punkt B. Die Aussagekraft von Klassifikatoren, die unter der $POD = PFA$ -Geraden liegen, ist sehr schlecht, siehe Punkt E. Dieser Bereich ist daher in den meisten ROC-Kurven leer. Jeder Punkt auf einer ROC-Kurve besitzt die gleiche Auftretenswahrscheinlichkeit.

Weiterhin kann aus dem Diagramm (Bild 2-7, Mitte) entnommen werden, dass die Größe der Fläche unter der ROC-Kurve ein gutes Maß für die globale Prüfqualität darstellt: Von der Kurve 1 bis zum Punkt der optimalen Messung wächst sie von 0,5 bis 1,0 [Mü03]. Das Ziel ist, die Auswertemethode immer mit der größtmöglichen Zuverlässigkeit an eine perfekte Messung anzupassen.

Wenn die Defektgröße einen signifikanten Einfluss auf die Probability of Detection besitzt, was bei allen Inspektionsmethoden zu erwarten ist, so ist für jede Defektgröße eine eigene ROC-Kurve zu erstellen. Dies ist ein großer Nachteil der ROC-Kurven neben der Vernachlässigung der Defektanzahl in einer Population. Aus diesen Gründen ist die Interpretation von ROC-Kurven nur mit Einschränkungen möglich.

2.4 Vorüberlegungen zur Analyse der Prüfqualität der Potentialfeldmessung

In der Literatur sind Auswertungen, wie z. B. POD und ROC, mit Blick auf die Prüfqualität von qualitativen Messverfahren und -konzepten zur Detektion von korrosionsgefährdeten Bereichen in Stahlbetonbauwerken nahezu unbekannt. Erste Ansätze sind in [Le01] enthalten, ein umfassend ausgearbeitetes und in der Praxis anwendbares POD-Modell bzw. ROC-Modell zur Bewertung der Prüfqualität von Potentialfeldmessdaten fehlt.

Zur Aufstellung von Parametern zur Beschreibung der Prüfqualität der Potentialfeldmessung ist es notwendig, den wahren Zustand der Bewehrung mit den Potentialfeldmessdaten zu vergleichen. Um den wahren Zustand der Bewehrung aber untersuchen zu können, ist ein kosten- und zeitintensiver Abtrag der Betondeckung durchzuführen. Jedoch wird in der Praxis kein Bauherr bzw. Bauwerksbetreiber diesem massiven Eingriff in die Struktur zustimmen, um die Zuverlässigkeit einer Messmethode zu evaluieren.

Kleinformatige Stahlbetonbauteile können auch im Labor hergestellt werden, aber die gezielte Initiierung von Bewehrungskorrosion ist ebenfalls zeitintensiv. Die POD einer Inspektionsmethode hängt nicht ausschließlich von der zu detektierenden Messgröße ab, sondern auch von den Einflussfaktoren auf die Messgröße. Auf die Einflussfaktoren der Potentialfeldmessung wird im folgenden Kapitel eingegangen. Die Einflussfaktoren sind bei der Auswertung der Prüfqualität zu berücksichtigen. Dies bedeutet, dass alle möglichen Variationen der Einflussfaktoren in den Bauteilen Berücksichtigung finden müssen, was in einer großen Anzahl unterschiedlicher Prüfkörper mündet.

Die zweite Möglichkeit zur Untersuchung der Prüfqualität der Potentialfeldmessung mit kleinformatigen Stahlbetonprobekörpern ist zwar mit einem großen Aufwand durchführbar, jedoch beinhalten beide Möglichkeiten, Labor und Praxis, ein großes Problem: In beiden Fällen ist die exakte Bestimmung der Anodenfläche sehr schwierig. Es gibt kein Messverfahren zur Quantifizierung der Anodenfläche. Die Anodenfläche kann lediglich nach dem Ausbau aufgrund von Rauigkeitsunterschieden ausgewertet werden. Die Messgenauigkeit dieses Verfahrens ist ebenfalls nicht bekannt. Die Anodenfläche ist aber der maßgebende Parameter zur Beschreibung der Probability of Detection und der Receiver Operating Characteristics. In der Praxis ergibt sich zusätzlich das Problem, dass durchaus Anodenflächen nach der Freilegung der Bewehrung identifiziert werden können, jedoch stellt kein Messverfahren sicher, ob diese Anodenflächen zum Zeitpunkt der Messung auch aktiv waren, also korrodierten. Aktive Anodenflächen können beispielsweise durch mangelnden Ionentransport aufgrund von Deckschichtbildung wieder passivieren.

Zur Lösung der oben genannten Probleme zur Bestimmung der Defektgröße ‚Anodenfläche‘ und der umfangreichen Parametervariation der Einflussfaktoren wird in dieser Arbeit ein numerischer Ansatz zur Analyse der Zuverlässigkeit der Potentialfeldmessung verfolgt. Ein großer Vorteil der Numerik ist, dass die Anodenfläche immer exakt bekannt ist, da sie einen Eingabeparameter der Simulation darstellt. Auch weitere Einflussfaktoren auf die Potentialfeldmessung, bspw. der Elektrolytwiderstand des Betons oder die Betondeckung, können einfach und schnell variiert werden. Im nächsten Kapitel werden das Messprinzip der Potentialfeldmessung und ihre Einflussfaktoren beschrieben. Anschließend werden die Grundlagen zur numerischen Simulation von Korrosionsprozessen kurz zusammengefasst. Anhand von zwei Beispielen wird die Anwendbarkeit der numerischen Simulation zur Abbildung von Potentialfeldern aufgezeigt.

3 Die Potentialfeldmessung: Theoretische Grundlagen

3.1 Die Korrosion von Stahl in Beton

Korrosion ist ein natürlicher Vorgang. Nahezu alle in der Technik verwendeten Metalle liegen in der Natur als Oxide oder in anderen Verbindungen vor. Nur durch Zuführung von Energie lassen sich daraus reine Metalle herstellen. Sie werden künstlich auf ein höheres und damit instabiles Energieniveau gehoben. Generell ist ein System nur dann stabil, wenn es sich in einem energetisch günstigen Zustand, also auf dem niedrigsten Energieniveau, befindet. Metalle korrodieren, um wieder ihren stabilen Ausgangszustand zu erlangen.

In dieser Arbeit wird unter Korrosion immer die elektrolytische bzw. elektrochemische Korrosion von Stahl in einem Elektrolyten (Beton) verstanden. Andere Korrosionstypen haben für die Untersuchungen in dieser Arbeit keine Relevanz.

Im folgenden Abschnitt werden kurz die Grundlagen des Korrosionsprozesses zusammengefasst und anschließend das Messprinzip der Potentialfeldmessung vorgestellt.

3.1.1 Die Passivierung - Depassivierung

Bei der anodischen Auflösung von Metallen besteht unmittelbar vor der Elektrodenoberfläche eine hohe Metallionenkonzentration. Dies kann bei einer bestimmten Auflösungsgeschwindigkeit zum Überschreiten des Löslichkeitsproduktes des Metallhydroxids oder -oxids an der Phasengrenze führen. Bilden die ausfallenden festen Produkte auf der Elektrode geschlossene Schichten von der Dicke einiger Monoschichten bis zu einigen 100 nm, so sinkt die anodische Stromdichte steil ab. Es bildet sich eine Passivschicht, die das Metall vor weiterer Korrosion schützt. Die Ausbildung passivierender Schichten hängt außer von der Art des Metalls stark von Art und Konzentration des Elektrolyten ab [HaVi98]. Liegt Stahl im alkalischen Milieu des Betons bildet sich eine Passivschicht aus $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ und Fe_3O_4 [Kaes03].

Die Passivität des Eisens beruht somit auf einem submikroskopisch dünnen Metalloxidfilm auf der Metalloberfläche. Äußere Einwirkungen können diesen Schutz, die Passivschicht, zerstören und den Korrosionsprozess in Gang setzen. Dies geschieht bei Stahl in Beton auf zwei Arten: Entweder durch den Eintrag von Chloriden oder infolge der Absenkung des pH-Wertes durch Karbonatisierung. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der chloridinduzierten Korrosion, da die Durchführung einer Potentialfeldmessung nur für chloridinduzierte Korrosion geeignet ist, da sich in diesem Fall Makrokorrosionselemente ausbilden, bei denen die Anoden- und Kathodenflächen örtlich getrennt auftreten. Im Fall karbonatisierungsinduzierter Korrosion kommt es zur Bildung von Mikrokorrosionselementen. Anodische und kathodische Teilbereiche liegen abwechselnd kleinformig direkt nebeneinander. Es bildet sich ein Mischpotential aus, wodurch Potentialdifferenzen auf der Betonoberfläche nicht messbar sind.

Der Prozess der chloridinduzierten Korrosion wird nach Streblow [Stre84] wahrscheinlich durch einige wenige grundlegende Prozesse kontrolliert. Die besondere Bedeutung der Halogenide, wie z. B. Chloriden, für die Lochkorrosion liegt in ihren Fähigkeiten, stabile Komplexverbindungen mit den

Eisenionen der Passivschicht zu bilden. Ihre Wirkung ist auf diese Teilkomplexierung eines Eisenions innerhalb der O^{2-} -Matrix der Passivschicht zurückzuführen. Hierbei werden die positiven Ladungen der Eisenionen teilkompensiert, ihre Bindung zur Oxid-Matrix wird geschwächt und der Abtransport des komplexierten Ions in den Elektrolyten erleichtert. Dies führt zu einer Dünnung der Passivschicht und letztlich zu ihrem Zusammenbruch, da sich die Passivschicht schneller auflöst, als sie nachgebildet wird.

3.1.2 Der Korrosionsprozess

Hat eine Depassivierung der Bewehrung im Elektrolyten des Betons stattgefunden, so lässt sich die Korrosion von Stahl in Beton durch die folgenden Gleichungen (3-1 bis 3-4) beschreiben. Die kathodische Teilreaktion führt zur Reduktion von Sauerstoff, daher werden die folgenden Reaktionen auch der Sauerstoffkorrosion zugeordnet.

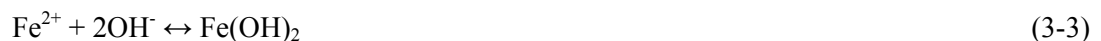
Anodische Teilreaktion:



Kathodische Teilreaktion:



Durch die Reaktion der gebildeten Eisen(II)-Ionen mit Hydroxidionen, entsteht schwerlösliches Eisen(II)-hydroxid. Je nach Potential und Sauerstoffangebot oxidiert das Eisen(II)-hydroxid weiter zu rotbraunem Eisen(III)-oxid-hydroxid.



Die Eisenauflösung als anodische Teilreaktion und die kathodische Teilreaktion müssen aus Gründen der Elektronenneutralität gleichzeitig und mit gleicher Geschwindigkeit auf der Metalloberfläche ablaufen. Anode und Kathode bilden zusammen ein kurzgeschlossenes galvanisches Element. Dazu ist sowohl eine elektrisch leitende Verbindung über den Bewehrungsstahl als auch eine elektrolytische Leitfähigkeit durch den Beton erforderlich. Die anodischen und die kathodischen Teilbereiche bilden eigenständige Elektroden aus, die sich sowohl im Potential als auch in ihrer Polarisierbarkeit unterscheiden. Auf diesen Unterschieden im Potential und Polarisierbarkeit basiert die Detektierbarkeit anodischer Bereiche in Stahlbetonbauwerken mit Hilfe der Potentialfeldmessung.

3.2 Das Prinzip der Potentialfeldmessung

Die Potentialfeldmessung (Bild 3-1) ist eine zerstörungsfreie Inspektionsmethode zur Detektion von depassivierter, anodischer Bewehrung in Stahlbetonbauwerken. Auf Grundlage der Potentialfelddaten kann unter bestimmten Voraussetzungen passive, kathodische von aktiver, anodischer Bewehrung unterschieden werden, da Anoden und Kathoden unterschiedliche Elektroden mit unterschiedlichem Ruhepotential und unterschiedlicher Polarisierung darstellen. Das Korrosionspotential eines

korrodierenden, in chloridhaltigem Beton liegenden Stahles unterscheidet sich von jenem eines nicht korrodierenden Stahles im alkalischen, chloridfreien Beton um mehrere 100 mV.

Mit der Potentialfeldmessung werden Potentialdifferenzen zwischen der Bewehrung und einer auf der Betonoberfläche aufgesetzten, externen Referenzelektrode nach beliebigem Messraster aufgenommen [MePr89, RITC03, DMB314, ASTM C876, SIAM13]. Als Referenzelektrode wird meist eine Kupfer/Kupfersulfat-Elektrode eingesetzt, die mit einem befeuchteten Schwamm auf den Beton aufgesetzt wird, um einen guten elektrolytischen Kontakt zu erhalten [RITC03]. Häufig wird die zu messende Oberfläche vorgenässt [DMB314, ASTM C876], um neben der Beseitigung von hohen Oberflächenwiderständen auch Feuchteunterschiede auszugleichen [DMB314]. Dabei ist zu beachten, dass bei exzessiven Vornässen sich die natürlich eingestellten Oberflächenbedingungen deutlich verändern [RITC03].

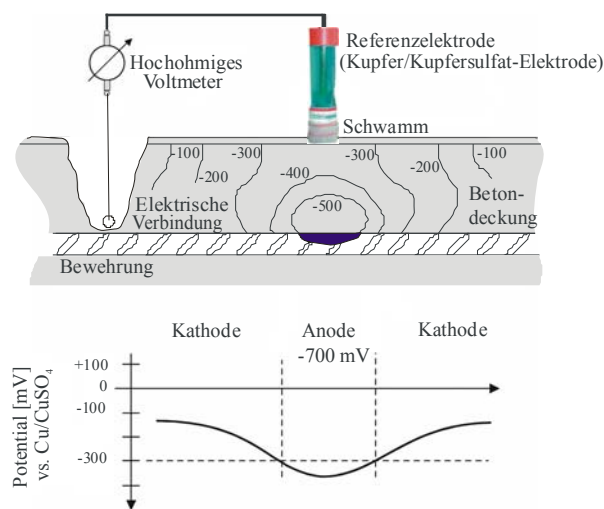


Bild 3-1: Prinzipskizze des Potentialfeldmessverfahrens.

Aus den Potentialmesswerten können weder Aussagen über die vergangene noch über die zukünftige Korrosionsentwicklung abgeleitet werden. Sie liefern nur Ergebnisse über das aktuelle Korrosionsgeschehen. Nach der Auswertung der gemessenen Potentiale lautet das Ergebnis: „Korrosion“ oder „keine Korrosion“. Informationen über die Korrosionsrate sind nicht ableitbar.

Bereits 1973 konnte Stratfull [St73] nachweisen, dass die Potentialfeldmessung ein valider Indikator für Korrosionsaktivität ist.

Neben der Detektion von aktiv korrodieren Bereichen in Stahlbetonbauwerken hat Elsener [El01] gezeigt, dass sich die Potentialfeldmessung ebenso für die Qualitätssicherung bei der Anwendung von elektrochemischer Chloridextraktion eignet.

Grundsätzlich ist die Potentialfeldmessung auch mit der sogenannten Differenzenmethode möglich, bei der zwei oder mehrere Referenzelektroden auf dem Betonoberfläche aufgesetzt werden. Potentialänderungen können damit ebenfalls detektiert werden. Diese Methode ist nicht Bestandteil dieser Arbeit. Die Zuverlässigkeit dieser Messmethode kann aber mit dem in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren ermittelt werden.

3.3 Die Einflussfaktoren auf die Potentialfeldmessung

Das an der Betonoberfläche mit Hilfe einer Referenzelektrode gemessene Potential entspricht nicht dem reinen Korrosionspotential der Elektroden. Das gemessene Potential ist das Korrosionspotential, das von verschiedenen Faktoren beeinflusst wird, die bei der Auswertung und Interpretation der Potentialfeldmessung berücksichtigt werden müssen. Diese Einflussfaktoren werden in vier Gruppen von A bis D unterteilt [KeEb11].

- Gruppe A: Ausbreitung des Potentialfeldes
- Gruppe B: Elektrokinetische Effekte
- Gruppe C: Niveau des Elektrodenpotentials
- Gruppe D: Messdurchführung und Messauswertung

Bild 3-2 gibt einen Überblick, wo die unterschiedlichen Einflussgruppen bei der Potentialfeldmessung wirken. In Tabelle 3-1 werden die Einflussgruppen in Einflussfaktoren unterteilt.

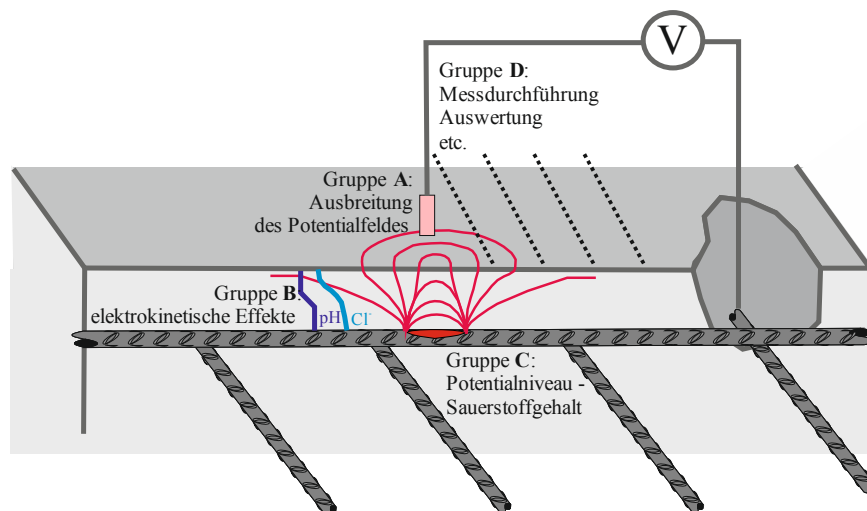


Bild 3-2: Übersichtsbild zu den Einflussfaktoren auf die Potentialfeldmessung.

Tabelle 3-1: Übersichtstabelle über die Einflussfaktoren der Potentialfeldmessung.

Gruppe A	Gruppe B	Gruppe C	Gruppe D
Elektrolytwiderstand	Diffusionspotentiale	Sauerstoffgehalt	Messraster
Betondeckung		Stahlfasern	Oberflächen- vorbehandlung
Bauteilgeometrie			Auswertung der Messergebnisse
Anoden/ Kathodenverhältnis			
Teilinstandsetzungen			
Risse/Fugen			
Bauteilbeschichtungen			
karbonatisierte Randschichten			

In den nachfolgenden Abschnitten wird auf jede Einflussgruppe gesondert eingegangen.

3.3.1 Gruppe A: Die Ausbreitung des Potentialfeldes in einem Elektrolyten

Die Einflussgruppe A beinhaltet die Faktoren, die die Ausbreitung des Potentialfeldes in einem Elektrolyten bestimmen.

Elektrolytwiderstand des Betons:

Der dominante Parameter in dieser Einflussgruppe ist der Elektrolytwiderstand des Betons. Neben stark unterschiedlichen Leitfähigkeiten aufgrund von Feuchteunterschieden [MePr89, Nü91, RITC03] oder schlecht leitenden Oberflächenschichten [MePr89, BöEI91] wie Oberflächenschutzsystemen oder Asphaltsschichten [BöEI91, RITC03, DMB314, SIAM13] sind auch karbonatisierte Randschichten zu nennen, die wie polymermodifizierte Instandsetzungssysteme einen höheren Elektrolytwiderstand [EI01, Wo97, DMB314] aufweisen. Der Elektrolytwiderstand im Beton kann auch durch Inhomogenitäten, wie z. B. Risse, unterbrochen werden und somit die Potentialfeldmessung beeinflussen [Gr86, Nü91, BöEI91, Gr86, ASTM C876, DMB314].

In Bild 3-3 ist beispielhaft die Ausbildung eines Potentialfeldes mit einem niedrigen und einem hohen Elektrolytwiderstand qualitativ dargestellt.

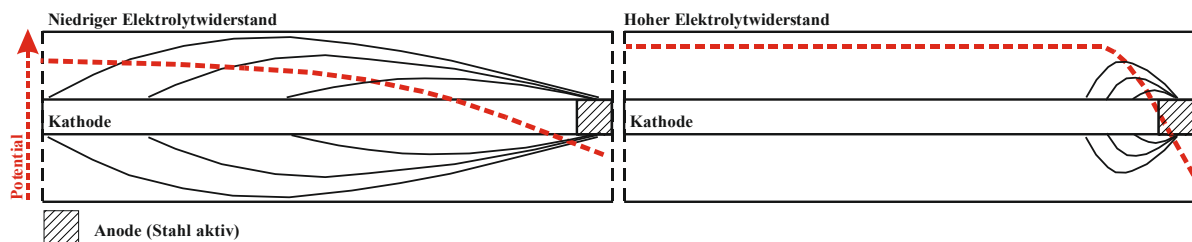


Bild 3-3: Qualitativer Einfluss des Elektrolytwiderstandes auf die Ausbildung eines Potentialfeldes: niedriger Elektrolytwiderstand (links), hoher Elektrolytwiderstand (rechts).

Liegen niedrige Elektrolytwiderstände im Beton vor, bilden sich im Fall von Korrosion flache Potentialgradienten aus, da verhältnismäßig viel Kathodenfläche aktiviert werden kann und die Stromlinien sehr flach verlaufen. Bei hingegen hohen Elektrolytwiderständen ist die aktivierbare Kathodenfläche sehr klein, was zu steilen Stromlinien und Potentialgradienten führt. In sehr trockenem Beton mit entsprechend sehr hohen Elektrolytwiderständen können korrodierende Bereiche nur schwer detektiert werden [RITC03], da die Potentialgradienten sehr steil verlaufen und die Ausbreitung des resultierenden Potentialtrichters gering ist.

Schon Naish et al. [Na90] und Poursaee und Hanssons [PoHa09] haben den starken Einfluss von oberflächennahen Randschichten mit einem hohen Elektrolytwiderstand auf die gemessenen Potentiale nachgewiesen. Ebenso hat der entgegengesetzte Fall, das Vornässen der Betonoberfläche, einen Einfluss auf die Potentialverteilung. Durch das Vornässen, also die Absenkung des Elektrolytwiderstandes in den randnahen Bereichen, kommt es zu einer Verschiebung der gemessenen Potentiale in negative Richtung.

Neben dem Vornässen hat bei exponierten Stahlbetonbauteilen auch die Witterungsgeschichte Einfluss auf den Elektrolytwiderstand und somit auf die Potentialverteilung. Dieser Einfluss wird lediglich exemplarisch an drei Messungen zu verschiedenen Zeitpunkten und Witterungsbedingungen in [PoHa09] aufgezeigt.

Betondeckung:

Die Betondeckung ist ein weiterer Einflussfaktor der Gruppe A. Mit zunehmender Betondeckung nimmt die Detektierbarkeit von anodischen Bereichen ab [Nü91, BöE191, Wo97, Schi07, RITC03, ASTM C876]. Die an der Oberfläche messbaren Potentialwerte der korrodierenden Bereiche liegen umso positiver, desto höher die Betondeckung ist [Nü91]. Das Merkblatt B3 der DGZfP [DMB314] empfiehlt daher, maximal bis zu einer Betondeckung von 75 mm zu messen.

Geometrie:

Neben dem Elektrolytwiderstand und der Betondeckung ist die Geometrie der Makrokorrosionszelle [Me94] und die damit verbundene Anodenfläche [Schi07] für die Gruppe A zu diskutieren. Nach Schiegg [Schi08] sind Anodengrößen kleiner als 2 cm unmöglich zu detektieren. Bei ausreichend großen Anodenflächen von >10 cm ist der Einfluss der Betondeckung vernachlässigbar, dagegen nicht bei kleinen Anoden von 2 cm [Nü91, SIAM13].

In Bild 3-4 wird qualitativ der Einfluss der Anoden/Kathoden Geometrie auf die Ausbildung des Potentialfeldes skizziert.

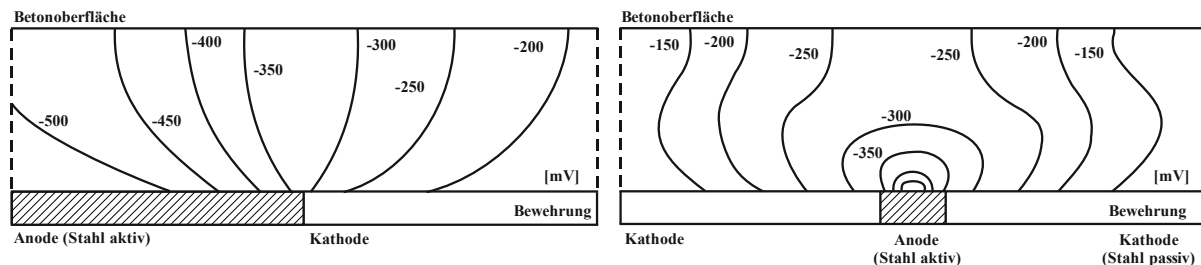


Bild 3-4: Isopotentiallinien im Übergangsbereich Anode/ Kathode (links) und um eine kleine Anode (rechts), in Anlehnung an [MePr89].

Die Anode beeinflusst das Potential der Kathode auch auf große Entfernung [Nü91]. In unendlicher Entfernung von der Kontaktstelle Anode/Kathode nimmt jede Elektrode ihr Ruhepotential an, die Isopotentiallinien liegen hier komplanar mit der Oberfläche. Alle Isopotentiallinien müssen die Oberfläche des Betons als Phasengrenze zwischen Elektrolyt und einem Nichtleiter in einem rechten Winkel erreichen, da durch die Betonoberfläche kein Strom durchtreten darf [MePr89].

Für den Fall einer kleinen Anode inmitten eines großen kathodischen Bereiches gilt, dass die Reichweite des Elements geringer wird, je kleiner die Fläche der Anode ist [MePr89].

Durch eine Anode werden die nahen passiven Bereiche in kathodische Richtung polarisiert. Diese kathodische Polarisierung ist bei geringen Elektrolytwiderständen ausgeprägter als bei einem hohen Elektrolytwiderstand, wodurch kleine Korrosionsstellen mit einem vergleichsweise großen Messraster detektiert werden können [EIBö87].

Als weiterer Einflussfaktor auf die Ausbreitung des Potentialfeldes ist neben der Anodengeometrie die gesamte Makrozellgeometrie zu nennen. Warkus [Wa12] konnte den Einfluss des Zellfaktors, der die Geometrie der Makrokorrosionszelle beschreibt, auf die Korrosionsaktivität nachweisen. Daraus kann abgeleitet werden, dass die Makrozellgeometrie ebenfalls Einfluss auf die Ausbildung des Potentialfeldes ausübt.

3.3.2 Gruppe B: Die elektrokinetischen Effekte

Zur Einflussgruppe B zählen die elektrokinetischen Effekte wie beispielsweise die Diffusionspotentiale. Diffusionspotentiale resultieren aus Ionenkonzentrationsunterschieden in einem Elektrolyten. Sie werden zusätzlich zum eigentlichen Korrosionspotential erfasst und verfälschen das gemessene Korrosionspotential. Dass Diffusionspotentiale bei der Potentialfeldmessung zu berücksichtigen sind, wurde bereits durch [MePr89] und [BöEl91] nachgewiesen.

Die Detektion von Bewehrungskorrosion mittels Potentialfeldmessung beruht auf dem für aktiven und passiven Stahl deutlich unterschiedlichem Potential am Übergang Stahl/Porenelektrolyt. Da dieses Potential jedoch nicht direkt, sondern mittels einer Referenzelektrode auf der Betonoberfläche gemessen werden muss, ergeben sich Einflüsse auf das Ergebnis, die aus dem „Zwischenelektrolyten“ Beton resultieren. Dieser ist in der Regel nicht homogen. Gradienten in der Zusammensetzung der Porenlösung, die in die offene Zellspannung des Elementes Stahl/ Beton/ Zwischenelektrolyt/ Referenzelektrode eingehen, sind insbesondere bezüglich des pH-Wertes (karbonatisierte Oberflächenschicht), der Kationen- und Anionenkonzentrationen (Wassergehalt der jeweiligen Schicht) und des Chloridgehaltes anzunehmen. Diese Effekte werden als kinetische und Diffusionseffekte zusammengefasst. Ihr Einfluss auf das gemessene Potential geht additiv als Störfaktor mit ein. Beispielsweise ergeben sich um bis über 100 mV niedrigere Potentiale [MePr89], bei [Schi07] um bis 150 mV verschobene Potentiale nach Entfernung der karbonatisierten Randschicht. Der zum Ankoppeln der Bezugselektrode verwendete Elektrolyt und Feuchteunterschiede im Beton können ebenso Diffusionspotentiale hervorrufen [Schi08].

Büchler [BüSc07] hat in Experimenten nachgewiesen, dass Elektrolytbewegungen im Porensystem des Betons (kapillare Transportvorgänge) Potentialunterschiede bis 150 mV bewirken können.

Diffusionspotentiale beruhen auf Ladungstrennungen, die zum Aufbau eines elektrischen Feldes führen, dessen Potentialunterschied additiv in das Messergebnis eingeht. Sie entstehen aufgrund unterschiedlicher Beweglichkeit von Anionen und Kationen im Grenzbereich von Elektrolyten unterschiedlicher Zusammensetzung. Beton ist ein solcher Elektrolyt mit unterschiedlicher Zusammensetzung aufgrund von pH-Wert-Unterschieden, die aus der Karbonatisierung der Porenlösung resultieren und tiefenabhängigen Chloridionenkonzentrationen, die durch die Beaufschlagung mit Taumitteln oder durch Meerwasserexposition in den Beton eingetragen werden. Diese Ionen streben einen Ausgleich der Ionenkonzentration durch Diffusion an. Weisen alle beteiligten Ionenarten gleiche Beweglichkeiten auf, so entsteht kein Diffusionspotential. Dieser Fall stellt aber die Ausnahme dar und ist für die Porenlösung in Beton nicht gültig. Beispielsweise diffundieren die sehr beweglichen OH⁻-Ionen schneller, während die langsamer diffundierenden

positiven Ca^{2+} -Ionen eine Ladungstrennung verursachen. Der sich aufbauende Potentialunterschied bremst die vorauseilenden Ionen und die weitere Ladungstrennung wird behindert.

Diffusionspotentiale ΔE_{diff} können unter vereinfachten Annahmen (lineare Konzentrationsgradienten, Gleichsetzung von Konzentration und Aktivität, Konzentrationsunabhängigkeit der Ionenbeweglichkeit) mit der Henderson-Gleichung abgeschätzt werden.

$$\Delta E_{\text{diff}} = -\frac{RT}{F} \frac{\sum_i \frac{[c_I(i) - c_{II}(i)] \cdot u(i) \cdot |z(i)|}{z(i)}}{\sum_i [c_I(i) - c_{II}(i)] \cdot u(i) \cdot |z(i)|} \cdot \ln \frac{\sum_i c_I(i) \cdot u(i) \cdot |z(i)|}{\sum_i c_{II}(i) \cdot u(i) \cdot |z(i)|} \quad (3-5)$$

mit:

- c: Konzentration der Ionenart i
- u: Beweglichkeit der Ionen
- z: Ladungszahl
- I / II die in Berührung stehenden Lösungen.

Eine ausführliche Betrachtung zum Einfluss von Diffusionspotentialen und Ergebnisse von Messungen zwischen in Beton eingebetteten und mit unterschiedlichen Koppelflüssigkeiten aufgesetzten Bezugs Elektroden wurden von Myrdal [My96] und Böhler und Schiegg [BüSc07] veröffentlicht. Danach ergibt sich aus der Henderson-Abschätzung zwischen Leitungswasser und dem inneren Porenelektrolyten des Betons rechnerisch ein Betrag des Diffusionspotentials von 170 mV, gemessen werden 150 mV. Gefundene Einflüsse aus Chloridzugaben, die Potentialänderungen um 80 mV bewirken und die auch von Arup [ArSö92] berichtet werden, sind mit der Henderson-Abschätzung allerdings nicht erklärbar. Ångst und Vennesland [An09], [AnVe09] berechnen Diffusionspotentiale zwischen Hydroxidlösungen unterschiedlichen pH-Wertes mit folgendem Ergebnis (Bild 3-5).

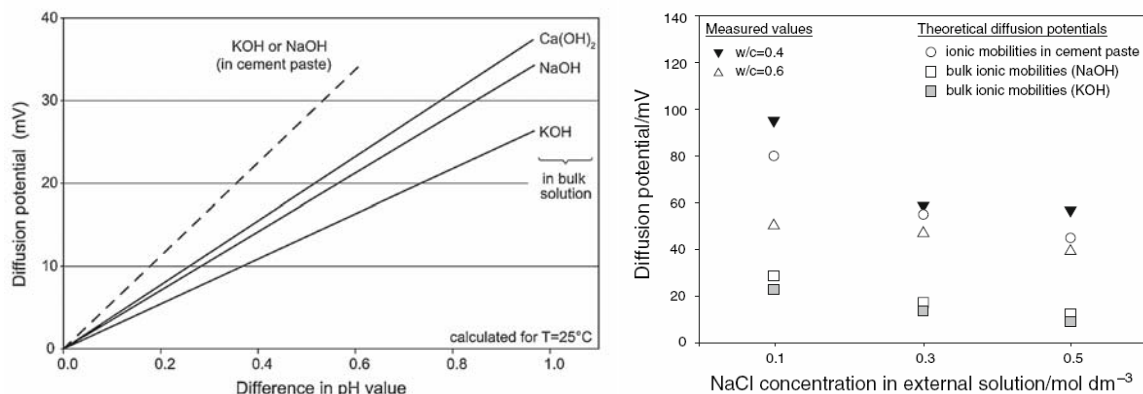


Bild 3-5: Berechnete Diffusionspotentiale aufgrund unterschiedlicher Laugenkonzentration ohne die Anwesenheit von Chloriden (links) [AnVe09]; gemessene und berechnete Diffusionspotentiale an karbonatisierter Lösung in Abh. von Chloridkonzentration (rechts) [An10].

Unterschiede im pH-Wert von lediglich 0,5 führen demnach zu Potentialabweichungen von 30 mV. Chloridbedingte Diffusionspotentiale überlagern sich mit der Potentialabsenkung über anodischen Bereichen mit gleichem Vorzeichen und verstärken in diesem Sinne die Detektion von Korrosionsstellen [BüSc07].

Für die Potentialfeldmessung bedeutet dies, dass stets Diffusionspotentiale in die Messung mit eingehen, da Ionenkonzentrationsunterschiede zwischen unterschiedlichen Elektrolyten im Fall einer chloridinduzierten Korrosion im Beton auftreten. Die Reihenfolge der auftretenden Diffusionspotentiale läuft von der Bezugsselektrode bis zur Bewehrung:

- Elektrolyt in der Fritte der Bezugsselektrode/Zwischenelektrolyt der Bezugsselektrode
- karbonatisierte Oberflächenschicht/ Koppelelektrolyt
- Alkalischer Beton / karbonatisierte Oberflächenschicht
- Alkalischer Beton niedriger Chloridkonzentration/hoher Chloridkonzentration
- Anodenelektrolyt (pH 2, Chlorid hoch angereichert)/Porenelektrolyt des Betons (alkalisch, pH 12,6-13,8)

Im Bild 3-6 sind etwaige bei der Potentialfeldmessung auftretende Grenzschichten dargestellt, an denen Diffusionspotentiale auftreten können.

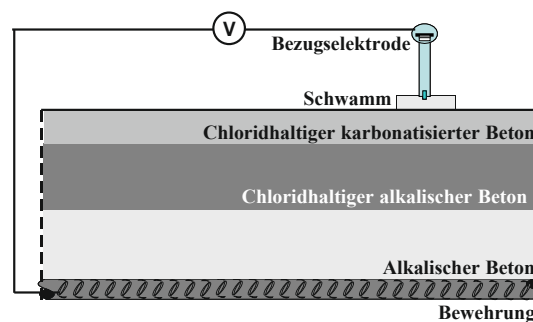


Bild 3-6: Auftreten möglicher Diffusionspotentiale bei der Potentialfeldmessung.

Einflüsse aus pH-Unterschieden treten vor allem im Vorhandensein einer karbonatisierten Oberflächenschicht auf, die bei älteren Bauwerken stets angenommen werden kann. Wird eine Kupfer/Kupfer-Sulfat-Elektrode verwendet, wie es normalerweise bei der Potentialfeldmessung üblich ist, so sind am Übergang Bezugsselektrode/Beton Diffusionspotentiale kleiner 10 mV zu erwarten. Ist die Betonoberfläche bereits karbonatisiert, so könnte das Diffusionspotential Werte größer als 30 mV annehmen [An09].

Da der Fehler additiv und mit konstantem Wert in das Messergebnis eingeht, wird die Prüfqualität der Potentialfeldmessung, wenn sie nicht allein auf der Grundlage von Absolutwerten, sondern im Wesentlichen nach der Häufigkeitsverteilung der Messwerte ausgewertet wird, davon kaum betroffen. In dieser Arbeit werden die Potentialfelddaten nach Häufigkeitsverteilungen ausgewertet, daher werden die elektrokinetischen Effekten für die Auswertung der Zuverlässigkeit der Potentialfeldmessung nicht weiter berücksichtigt.

3.3.3 Gruppe C: Das elektrochemische Potential der Elektroden

Entsteht ein Kontakt eines Metalls mit einem Elektrolyten, stellt sich in der Grenzschicht Metall/Elektrolyt ein Gleichgewichtszustand zwischen Metallionen an der Metalloberfläche und Elektronen im Metall ein. An der Metalloberfläche gehen ständig positiv geladene Ionen in Lösung,

während im Metall die Elektronen zurückbleiben. Das Metall lädt sich negativ auf. Durch die Ionenbildung entsteht an der Grenze Metall/Elektrolyt ein elektrisches Feld, welches die Bildung weiterer Ionen behindert. Umgekehrt besteht die Tendenz, dass Metallkationen durch das elektrische Feld wieder zum Metall zurückgeführt werden und dort Elektronen aufnehmen. Es bildet sich schließlich ein für jedes Metall/Elektrolyt-System charakteristisches dynamisches Gleichgewicht aus, das zur Bildung einer „Doppelschicht“ (Bild 3-7) aus Ionen und Elektronen führt. Infolge der Temperaturbewegung ist die Doppelschicht nicht völlig starr, sondern diffus. Zur Aufrechterhaltung dieses Gleichgewichtszustandes ist ein elektrischer Spannungsunterschied zwischen Elektrolyt und Metall in der Grenzfläche erforderlich, der als elektrochemisches Potential des Metalls bezeichnet wird und der mit Hilfe von Bezugselektroden im Elektrolyten gemessen werden kann.

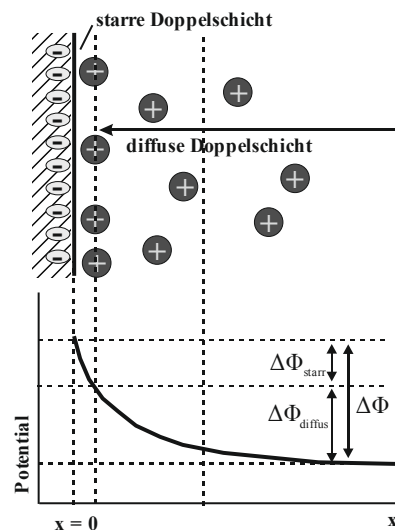


Bild 3-7: Potentialverlauf durch eine elektrische Doppelschicht, in Anlehnung an [HaVi98].

Stehen nun zwei Elektroden in Kontakt mit einem Elektrolyten, lässt sich zwischen ihnen eine elektrische Spannung messen; das Elektrodenpotential bzw. Korrosionspotential. Zur Bestimmung des Potentials einer stromdurchflossenen Elektrode kann deren Potential nicht gegen die ebenfalls stromdurchflossene Gegenelektrode gemessen werden. Es kann zur Ausbildung einer Überspannung kommen und die Elektrode wird als Potentialbezugspunkt unbrauchbar. Eine zusätzliche Elektrode, die Bezugselektrode, wird benötigt. Sie unterliegt keiner Strombelastung [HaVi98]. Bezugselektroden sind Elektroden mit einem zeitlich konstanten und reproduzierbaren Potential [DIN02], das heißt, sie befinden sich in einem bekannten elektrochemischen Zustand.

Bei der Korrosion der Bewehrung in Beton stehen auch zwei Elektroden, Anode und Kathode, in Kontakt mit dem Elektrolyten Beton, zwischen den Elektroden und einer Bezugselektrode lässt sich ebenfalls eine elektrische Spannung messen; das Elektrodenpotential bzw. Korrosionspotential.

Nach Pourbaix [Pou63], Bild 3-8, kann Eisen - also auch die Bewehrung, in Abhängigkeit vom pH-Wert und dem umgebenden Medium, unterschiedliche Werte des elektrochemischen Potentials annehmen.

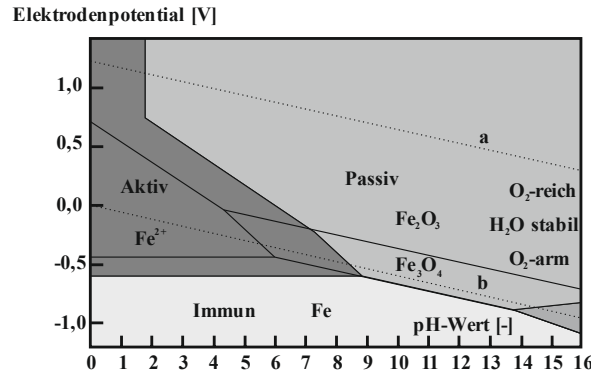


Bild 3-8: Potential-pH-Diagramm des Systems Eisen-Wasser bei 25°C nach Pourbaix [Pou63].

Im Bereich der Immunität liegen die elektrochemischen Potentiale je nach pH-Wert zwischen -0,6 bis -1,2 V. Innerhalb der pH-Werte zwischen 8,8 und 13,6 bilden sich die Eisenoxide Fe_2O_3 und Fe_3O_4 , die das Eisen vor weiterer Korrosion schützen. Das Eisen ist passiv und das zugehörige elektrochemische Potential kann Werte zwischen $< 1\text{ V}$ bis $-0,9\text{ V}$ annehmen. Unterhalb von $\text{pH} = 8,8$ und auch oberhalb von $\text{pH} = 13,6$ ist die Passivschicht in Abhängigkeit vom Potential nicht stabil. Das Eisen ist dann aktiv, es korrodiert mit Potentialwerten im Bereich von $-0,6\text{ V}$ bis $< 1\text{ V}$.

Neben dem Pourbaix-Diagramm liefern Stromdichte-Potentialkurven wichtige Informationen zur Lage von elektrochemischen Potentialen.

Die Lage des Ruhepotentials unterscheidet sich im Fall von aktivem und passivem Stahl deutlich (Bild 3-9). Passiver Stahl hat ein positiveres Ruhepotential als aktiver Stahl [MePr89, Nü91, BöEl91]. Mit steigendem Chloridgehalt im Beton fällt das anodische Potential ab. Auf diese Abhängigkeit wurde schon durch Page [PaTr82] und Locke und Siman [LoSi80] hingewiesen.

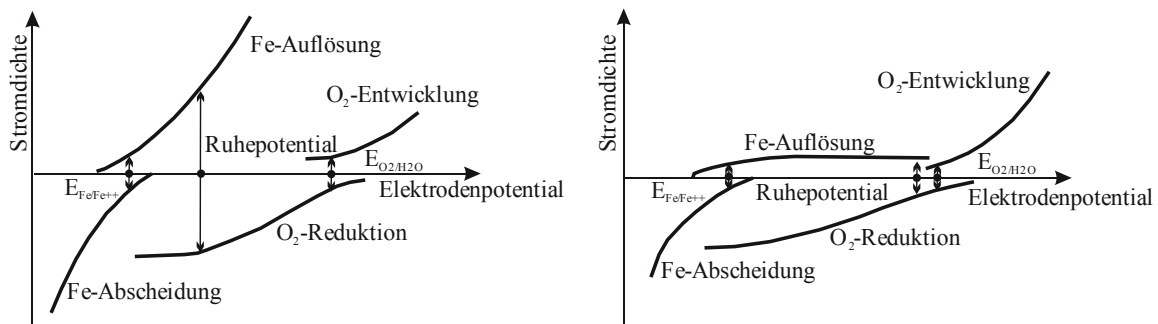


Bild 3-9: Qualitative Darstellung der Stromdichte-Potential-Kurven für aktiven (links) und passiven Stahl (rechts) [MePr89].

Bildet sich nun ein Makrokorrosionselement aus, so werden Anode und Kathode durch den Elementstrom polarisiert. Das Potential entspricht nicht mehr dem Ruhepotential. Das Kathodenpotential verschiebt sich ortsabhängig in negative Richtung, das Anodenpotential in positive Richtung.

Das Ruhe- bzw. Korrosionspotential einer Elektrode und somit das gesamte Makrokorrosionselement wird zusätzlich vom Sauerstoffgehalt im Beton bestimmt (Bild 3-10). Je nach Sauerstoffgehalt werden

unterschiedliche Eisenoxide an der Metalloberfläche gebildet, die das elektrochemische Potential bestimmen [Kaes03].

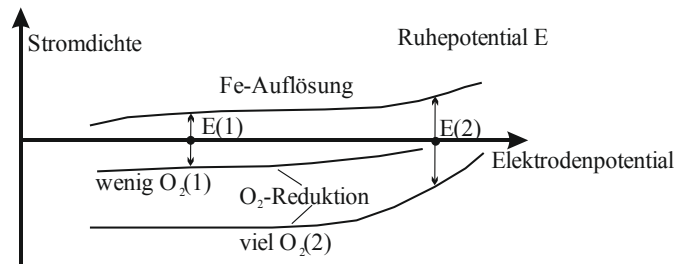


Bild 3-10: Qualitative Darstellung des Einflusses der Belüftung auf das Ruhepotential von passivem Stahl in Beton [MePr89].

Ist der Beton zunehmender Feuchtigkeit bis hin zur Porensättigung ausgesetzt (z. B. Fundamente/Bodenplatte im Grundwasser, Stützen von Meerwasserbrücken etc.), so behindert dies den Sauerstoffzutritt an die Bewehrung. Das Kathodenpotential wird negativer und der kathodische Teilprozess der Sauerstoffkorrosion wird behindert. Der entscheidende Parameter ist der Sauerstoffdiffusionskoeffizient D_{Ox} der Betonüberdeckung. Erreicht dieser Parameter einen kritischen Wert von $3,36 \cdot 10^6 / (A_{st} \cdot i_{pas})$ [Gu03], so verschiebt sich das elektrochemische Potential zu sehr negativen Werten, ohne dass ein Korrosionsprozess ablaufen kann.

Der Einfluss des Sauerstoffdargebotes auf das Polarisationsverhalten der Kathode kann durch folgende Gleichung 3-6 beschrieben werden:

$$i_c = -i_{c,o} \cdot \frac{c_{Ox}}{c_{Ox,0}} \cdot \exp(-C \cdot \mu_c) \quad (3-6)$$

mit:

- i_c : kathodische Stromdichte [A/m^2]
- $i_{c,o}$: kathodische Austauschstromdichte [A/m^2]
- c_{Ox} : atmosphärische Sauerstoffkonzentration an der Stahloberfläche [g/m^3]
- $c_{Ox,0}$: atmosphärische Sauerstoffkonzentration in der Umgebungsluft [g/m^3]
- C : elektrochemische Konstante [$1/V$] $C = \frac{\ln(10)}{b_c}$
- b_c : kathodische Tafelsteigung [V/dec]
- μ_c : Überspannung der kathodischen Reaktion [V] $\mu_c = E_c - E_{c,o}$
- E_c : Potential der kathodischen Reaktion [V]
- $E_{c,o}$: Gleichgewichtspotential der kathodischen Reaktion [V]

Jedoch haben Raupach und Gulikers [RaGu01] gezeigt, dass die Sauerstoffdiffusion nur in Betracht gezogen werden muss, wenn der Beton dauerhaft mit Wasser gesättigt oder äußerst dicht ist.

Die maßgebenden Einflüsse auf das elektrochemische Potential sind somit der pH-Wert des Elektrolyten, der Chloridgehalt, das Sauerstoffangebot und die Polarisierung durch weitere Elektroden im System.

3.3.4 Gruppe D: Die Messdurchführung und Messdatenauswertung

Die Einflussgruppen A bis C sind material- und objektspezifische Einflussgrößen, die sich teilweise ständig verändern können, wie z. B. der Elektrolytwiderstand des Betons oder auch die Anodenfläche. Zusätzlich sind aber auch die Einflussgrößen Mensch, Art der Messdurchführung und natürlich die Auswertung der Messdaten zu berücksichtigen. Diese Faktoren werden in der Einflussgruppe D zusammengefasst.

Messdurchführung:

Welches Messraster ist geeignet, je nach Objekt die gewünschte Defektgröße (Anodenfläche) zu detektieren?

Die Anzahl der gemessenen Potentiale, also das gewählte Messraster, hat Einfluss auf die Zuverlässigkeit der Potentialfeldmessung. Je enger das gewählte Messraster, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, eine Korrosionsstelle zu identifizieren [Br04, Schi07]. In der ASTM C876 wird keine Aussage über das Messraster getroffen. In der Literatur variiert das empfohlene Messraster von 10 x 10 cm² bei hohen Ansprüchen an die Detektionssicherheit (z. B. Stützen, Galerierückwänden) [DMB314, SIAM13] über 15 x 15 cm² nach [RITC03] und 20 x 20 cm² nach [MePr89] bis hin zu 25 x 25 cm² nach [DMB314, SIAM13]. In Ausnahmefällen dürfen nach [DMB314] auch Messraster von 50 x 50 cm² gewählt werden, wobei mögliche Ausnahmen nicht näher spezifiziert werden.

Laut [BüSc07] wird das erforderliche Messraster von der minimalen Anodengröße und der Bewehrungsüberdeckung vorgegeben. Eine Verringerung der Messauflösung birgt das Risiko, dass kleine Anoden nicht mehr detektiert werden können. Aber auch sehr feine Messraster können nicht garantieren, dass kleine Korrosionsherde mit Anodenlängen kleiner 2 cm noch detektiert werden können. Folglich besteht bei der Potentialfeldmessung selbst unter optimalen Bedingungen ein Risiko, dass kleine Korrosionsherde nicht erfasst werden [BüSc07]. Die Autoren [BüSc07] gehen nicht darauf ein, welche quantitativen Werte unter einem feinem Messraster zu verstehen sind.

Messdatenauswertung:

Was ist die geeignete grafische oder statistische Methode zur Festlegung von korrodierenden und nicht-korrodierenden Bereichen auf Grundlage der Potentialdaten? Ist die Bestimmung eines Grenzpotentials zweckmäßig?

Werden mehr Korrosionsherde detektiert als wirklich vorhanden, werden Bereiche unnötigerweise Instand gesetzt. Werden Korrosionsstellen übersehen, hat dies negative Folgen für die Dauerhaftigkeit des Bauwerks. Es gibt verschiedene Verfahren zur Auswertung der Potentialfeldmessung.

Zunächst sind Korrosionsstellen durch die Höhe des Potentialwertes und durch das Potentialgefälle im Übergang zu passiven Bereichen eingrenzbare. Prinzipiell nimmt die Korrosionswahrscheinlichkeit mit negativeren Potentialwerten und steileren Potentialgradienten zu. Diese Auswertung wird vom Merkblatt B3 der DGZfP [DMB314] empfohlen. Für diese Art der Auswertung ist die Darstellung der Potentialwerte in einem Äquipotentialplot hilfreich (Bild 3-11), auf den auch in allen anderen Richtlinien [RITC03, ASTM C876, SIAM13] hingewiesen wird.

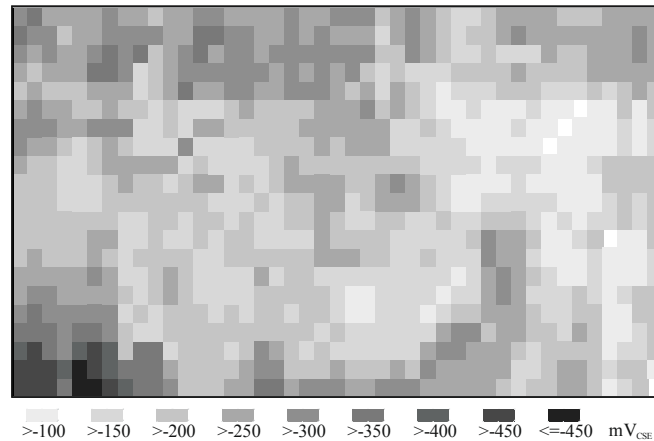


Bild 3-11: Äquipotentialplot einer Potentialfeldmessung.

In der ASTM [ASTMC876] werden Absolutwerte, bzw. Grenzpotentiale als Eingrenzung der Korrosionswahrscheinlichkeit angegeben. Diese Grenzwerte stammen aus einer Vielzahl von Labor- und Feldmessungen in den USA. Die praktische Erfahrung zeigt aber, dass unter anderen Bedingungen (Dicke der Überdeckung, Feuchtigkeit und Chloridgehalt im Beton) auch andere Potentialbereiche auf Korrosionsreaktionen an der Bewehrung hinweisen. Die Festlegung eines absoluten Kriteriums für das Auffinden korrodierender Bereiche der Bewehrung ist daher kritisch zu hinterfragen [BöE191]. Assouli [As08] konnte nachweisen, dass die Einschätzung der Korrosionswahrscheinlichkeiten aufgrund von Absolutwerten zu einer fehlerhaften Bewertung führen kann.

Eine weitere Möglichkeit zur Auswertung von Potentialfeldern sind kumulierte Wahrscheinlichkeitsverteilungen [BöE191, RITC03, SIAM13]. Die Summenhäufigkeitsverteilung einer Normalverteilung ergibt im Wahrscheinlichkeitsnetz eine Gerade. Elsener und Böhni [ElBö92] konnten nachweisen, dass die Potentialwerte der aktiven und der passiven Bewehrung als Normalverteilungen angesehen werden können. Somit ergeben sich zwei Geraden entsprechend der unterschiedlichen Verteilungen, die der korrodierenden und der passiven Bewehrung.

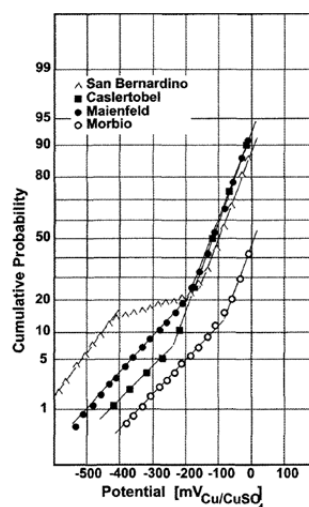


Bild 3-12: Kumulierte Wahrscheinlichkeitsverteilungen einer Potentialfeldmessung [ElBö97].

Diese Auswertemethode ist nur für Potentialfeldmessungen anwendbar, bei denen während der Messung und im Beton immer konstante Bedingungen vorliegen. Schon Feuchteunterschiede im Beton können dazu führen, dass mehrere Grundgesamtheiten (z. B. Korrosion im nassen Bereich, Korrosion im trockenen Bereich) im Beton berücksichtigt werden müssen, und mehr als zwei Geraden in der Summenhäufigkeitsverteilung erscheinen, die eine Auswertung erschweren bzw. zu Fehlern führen können.

Gulikers und Elsener [GuEl09] stellen noch ein weiteres statistisches Verfahren zur Auswertung von Potentialfeldmessdaten vor. Dieses Verfahren beruht auf der Trennung der Grundgesamtheit der Potentiale in die Wahrscheinlichkeitsdichten der aktiven und passiven Bewehrung. Ziel dieser Auswertung ist es, ein einziges Grenzpotential zu definieren, das den passiven vom korrodierenden Potentialbereich trennt. Das Messergebnis „Korrosion“ oder „keine Korrosion“ kann an jedem Ort der Messung mit Wahrscheinlichkeiten ausgedrückt werden [Le01], siehe Bild 3-13.

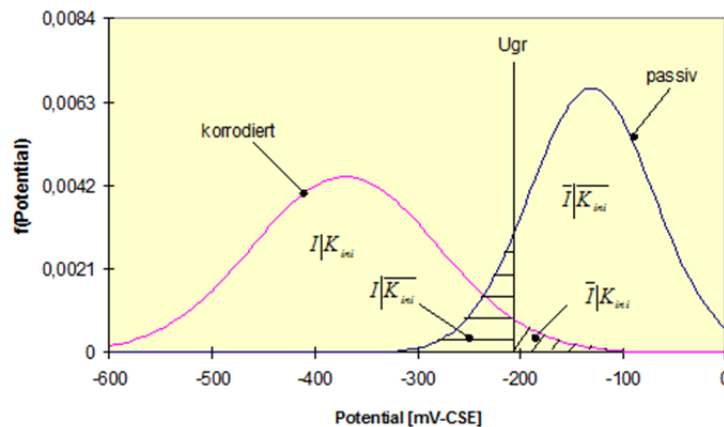


Bild 3-13: Wahrscheinlichkeiten für Indikation und Nicht-Indikation [Le01].

Das Grenzpotential ist keine fixe Größe, sondern hängt immer von den wirtschaftlichen Randbedingungen und den zuvor genannten Einflussfaktoren auf die Potentialfeldmessung ab. Dieses Verfahren wie auch alle anderen Auswertemethoden der Potentialfeldmessung benötigen Erfahrung und Sachverstand der ausführenden Personen.

Generell ist die Auswertung von Potentialfeldmessdaten nur in Kombination mit Sondieröffnungen, Betondeckungsmessung, Chloridprofilen, visueller Begutachtung, (freiliegende Bewehrung, Risse, Fugen, Teilinstandsetzungen, etc.) durchzuführen [DMB314, RITC03, SIAM13].

3.3.5 Literaturlauswertung zu den Einflussfaktoren der Potentialfeldmessung

Die systematische Untersuchung aller Einflussfaktoren auf die Potentialfeldmessung erfordert eine große Prüfmatrix mit umfangreichen Forschungsarbeiten. Einige Einflussfaktoren wurden bereits in der Literatur behandelt.

Nürnberg [Nü91] hat den Einfluss der Anodenfläche, der Lagerung in unterschiedlichen Luftfeuchtigkeiten, der Betondeckung und des Anoden/Kathodenverhältnis auf die Potentialfeldmessung an großformatigen Laborprobekörpern (1,5 m x 0,5 m x 0,15 m) untersucht. Die

Anoden befinden sich auf etwa 1/3 der Länge. In Bild 3-14 sind die von Nürnberger gemessenen Potentialwerte in Abhängigkeit der Lagerungsbedingungen und der Anodenbreite abgebildet. Bei höheren relativen Luftfeuchtigkeiten ist mit einem niedrigeren Elektrolytwiderstand des Betons zu rechnen, da die Betonzusammensetzung nicht verändert wurde.

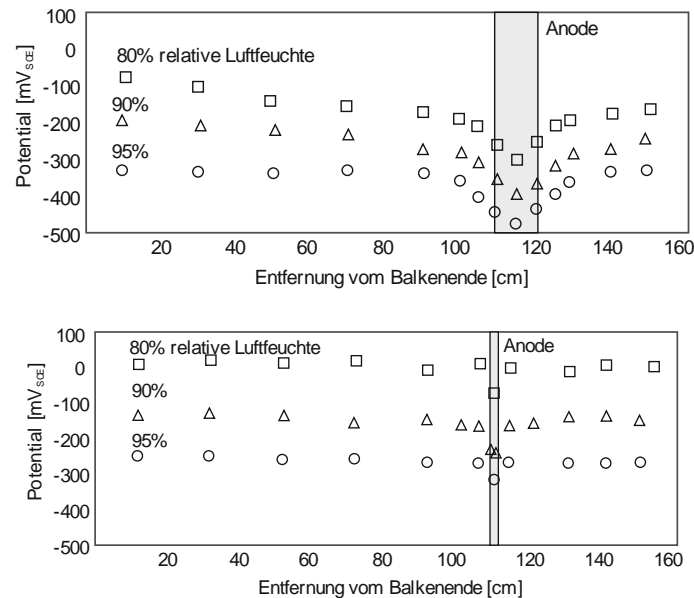


Bild 3-14: Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit und der Anodenbreite (10 cm oben, 2 cm unten) auf die Korrosionspotentiale nach Nürnberger [Nü91]; Beton B25, w/z-Wert 0,7, Zement PZ 35 F, Betondeckung 2 cm, 3%NaCl.

Das auf der Betonoberfläche gemessene Potential ist bei niedrigeren Elektrolytwiderständen negativer. Bei Lagerung in 80 % relativer Luftfeuchte und einer Anodenbreite von 10 cm weist das Potential direkt oberhalb der Anode einen Wert von ca. -300 mV_{SCE} während es in Lagerung von 95 % relativer Luftfeuchte den Wert von ca. -480 mV_{SCE} erreicht. Die Potentialgradienten verlaufen nahezu parallel. Die Anodenbreite von 10 cm hat eine Reichweite von ca. 20 cm, d. h. der Einfluss der Anode aufgrund der Polarisierung reicht bis 20 cm. Wird hingegen eine kleine Anodenbreite von 2 cm untersucht, so liegen die Potentialwerte um ca. 200 mV positiver, die Potentialunterschiede innerhalb der unterschiedlichen Lagerungsarten bleiben bestehen. Im Vergleich zu großen Anodenbreiten ist der Potentialgradient nur sehr schwach ausgeprägt und die Anodenreichweite beträgt lediglich wenige (≥ 5 cm) Zentimeter.

In der nächsten Abbildung (Bild 3-15) werden die Potentialwerte in Abhängigkeit der Betondeckung zusammengefasst.

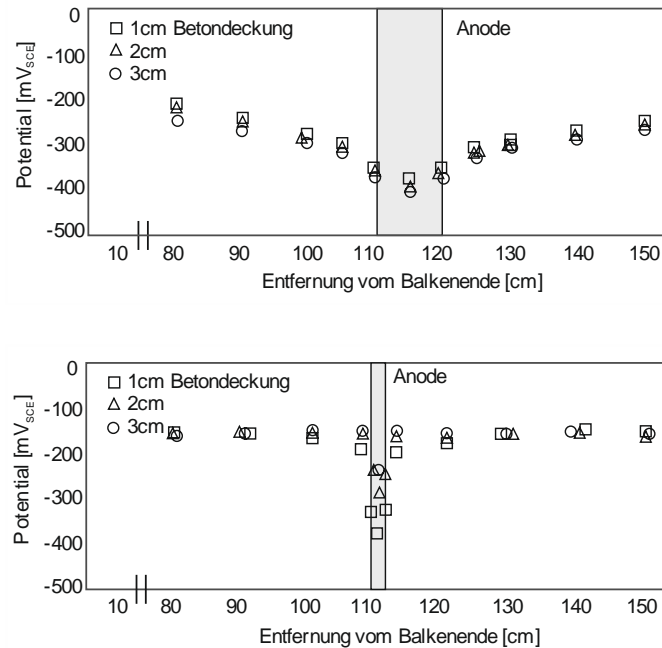


Bild 3-15: Einfluss der Betondeckung und der Anodenbreite (10 cm oben, 2 cm unten) auf die Korrosionspotentiale nach Nürnberger [Nü91]; Beton B25, w/z-Wert 0,7, Zement PZ 35 F, rel. Luftfeuchte 90%, 3%NaCl.

Der Einfluss der Betondeckung auf die Potentialfeldmessung ist vernachlässigbar. Sind größere Anodenbreiten vorhanden, ist kein nennenswerter Unterschied in den Potentialen aufgrund unterschiedlicher Betondeckungen feststellbar. Ist jedoch die Anodenbreite klein und die Betondeckung gering, so ist direkt oberhalb der Anode mit negativeren Potentialwerten und steilen Potentialgradienten zu rechnen. Die Reichweite der Anode ist wiederum stark begrenzt.

Zusätzlich hat Nürnberger [Nü91] noch den Einfluss des Anoden/Kathodenverhältnis auf die Potentialentwicklung untersucht (Bild 3-16).

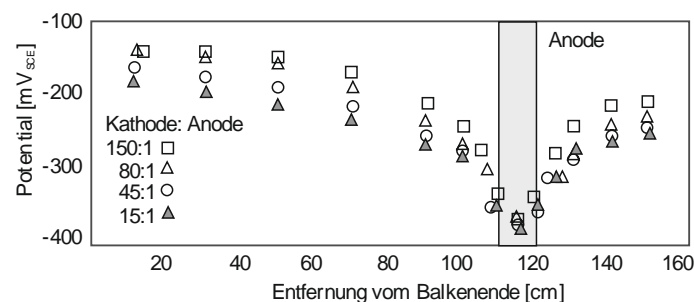


Bild 3-16: Einfluss des Anoden/Kathoden-Verhältnisses auf die Korrosionspotentiale nach Nürnberger [Nü91].

Die Ergebnisse in Bild 3-16 zeigen, dass das Anoden/Kathodenverhältnis keinen Einfluss auf die gemessenen Potentiale direkt oberhalb der Anode besitzt. Jedoch wird mit größer werdendem Abstand zur Anode und größerer Kathodenfläche im Verhältnis zur Anodenfläche das gemessene Potential positiver.

Die Forschungsarbeiten von Nürnberger [Nü91] eignen sich lediglich für einen qualitativen Vergleich. Eine systematische Quantifizierung der Einflussfaktoren auf die Potentialfeldmessung bzw. die Auswertung der Prüfqualität ist nicht möglich. Es wurden zwar Parameter, die den Elektrolytwiderstand maßgeblich beeinflussen, variiert, z. B. die relative Luftfeuchtigkeit, die Betonzusammensetzung, aber es fehlen die Messwerte zum jeweils korrespondierenden Elektrolytwiderstand. Zum anderen ist die Angabe der Anodenbreite sehr ungenau. Um Vergleiche mit weiteren Forschungsarbeiten durchführen zu können, ist die Angabe der Anodenfläche notwendig. Die gemessenen Linienscans und der Aufbau der Versuchskörper stellen zwar einen guten Ansatz zur Untersuchung der Einflussfaktoren dar, jedoch spiegeln sie keine typischen Bauteilsituationen wider.

Schiegg et al [Schi08] haben ebenfalls den Einfluss der Anodenlänge, Betondeckung und Messraster auf die Potentialfeldmessung experimentell und numerisch an einem linearen Makrozellsystem untersucht. Die abgeleiteten Ergebnisse sind in Bild 3-17 dargestellt.

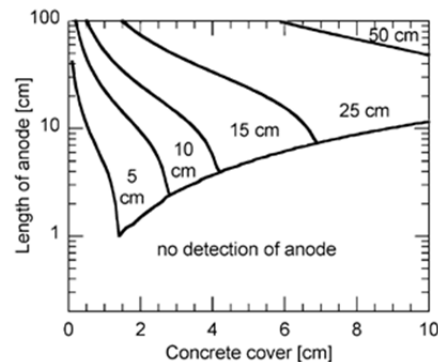


Bild 3-17: Detektierbarkeit von Anoden in Abhängigkeit von Anodenlänge, Betondeckung und Messraster [Schi08].

Aus diesen Ergebnissen kann geschlossen werden, dass mit steigender Anodenlänge und sinkender Betondeckung die Detektierbarkeit von korrodierenden Bereichen erleichtert wird. Anodenlängen kleiner 5 cm sind nicht mit normalen Messrastern ($15 \times 15 \text{ cm}^2$) detektierbar, da der Potentialabfall weniger als 100 mV beträgt, während Anodenlängen von 10 cm und einer Betondeckung von 4 cm mit einem Messraster von $15 \times 15 \text{ cm}^2$ sicher erkannt werden.

Die Ergebnisse von Schiegg et al. [Schi08] gelten lediglich für ein lineares Makrozellsystem. Eine Übertragbarkeit auf reale Bauteilsituationen wurde nicht nachgewiesen. Nürnberger [Nü91] hatte schon gezeigt, dass der Elektrolytwiderstand einen Einfluss auf das gemessene Potential und den Potentialabfall besitzt. Dieser Einfluss wurde von Schiegg et al. vernachlässigt. Daher können diese Forschungsarbeiten für eine systematische Quantifizierung der Einflussfaktoren auf die Potentialfeldmessung nicht verwendet werden.

Aus den Forschungsarbeiten von Pour-Ghaz et al. [Pou09] kann abgeleitet werden, dass eine größere Betondeckung verbunden mit einer steigenden Korrosionsrate eine bessere Detektierbarkeit ermöglicht. Der Effekt der Betondeckung wird schwächer bei steigendem Elektrolytwiderstand. Eine genaue elektrochemische Begründung wird nicht angegeben. Auch aus den Ergebnissen dieser Arbeit ist eine Quantifizierung der Zuverlässigkeit der Potentialfeldmessung nicht möglich.

3.3.6 Zusammenfassung der Literaturrecherche

In den vergangenen Jahren sind bereits einige Forschungsarbeiten zum Potentialfeldmessverfahren veröffentlicht worden. Jedoch wurde nur ein Teil der Einflussfaktoren auf die Potentialfeldmessung untersucht und ausgewertet. Trotzdem lassen sich folgende wichtige Einflussfaktoren auf das Potentialfeld identifizieren: der Elektrolytwiderstand, die Anodenfläche, die Betondeckung und das Messraster.

Zudem wurden die Untersuchungen in der Literatur lediglich an einfachen, linearen Makrozellgeometrien im Laborformat durchgeführt. Die Übertragung der Laborergebnisse auf Bauwerksgeometrien erfolgte nicht. Im Fokus der zitierten Arbeiten werden einzelne Einflussfaktoren auf die Potentialfeldmessung ausschließlich qualitativ bewertet. Ein globaler Ansatz zur Bewertung der Einflussfaktoren auf die Zuverlässigkeit der Potentialfeldmessung fehlt.

Für die Identifizierung der dominanten Einflussfaktoren auf die Potentialfeldmessung und Auswertung der Prüfqualität wird das Instrument der Numerik genutzt. Im nächsten Kapitel werden die Grundlagen der numerischen Simulation von Korrosionsprozessen erläutert und die Anwendbarkeit der Numerik für die Fragestellung in dieser Arbeit geprüft.

4 Die numerische Simulation von Korrosionsprozessen

Grundsätzlich stehen drei verschiedene Methoden für numerische Simulationen zur Verfügung: die Methode der Finiten Elemente (FEM), die Methode der Finiten Differenzen (FDM) und die Boundary Elements Method (BEM). In dieser Arbeit erfolgen die numerischen Berechnungen mit dem Simulationsprogramm BEASY [BEA12], das auf der Boundary Elements Methode basiert.

4.1 Die Boundary Elements Method (BEM)

Bei der Boundary Elements Method, auch Randelementmethode genannt, wird nur der Rand bzw. die Oberfläche eines betrachteten Gebietes oder einer Struktur diskretisiert, nicht jedoch deren Volumen wie bei der Finite Elemente Methode (FEM). Die unbekannt Zustandsgrößen befinden sich nur auf dem Rand. Mit Hilfe von Integralgleichungen werden die Eigenschaften des gesamten Gebietes abgebildet. Die Integralgleichungen werden in Differentialoperationen umgewandelt und zu einem Gleichungssystem zusammengebaut, das sich numerisch lösen lässt.

Durch die Nutzung zweidimensionaler Elemente werden die Anzahl der Knoten und damit die Anzahl der Freiheitsgrade verringert, wodurch sich das Elementnetz schnell und automatisch generieren lässt. Dies ist der große Vorteil der Boundary Elements Method. Ein Nachteil der BEM liegt in der Einschränkung, dass innerhalb eines Modellgebietes Materialeigenschaften, wie beispielsweise der Elektrolytwiderstand des Betons, nur konstant berücksichtigt werden können. Eventuell graduell auftretende Materialeigenschaften lassen sich nur durch Aneinanderreihung mehrerer Modelle realisieren.

Für die numerische Abbildung von Korrosionsprozessen sind im Wesentlichen die Potentiale und Ströme auf der Metalloberfläche interessant und für die Analyse der Potentialfeldmessung die Potentiale auf der Modelloberfläche. Daher bietet sich die Boundary Elements Method für die numerische Lösung der Fragestellungen in dieser Arbeit an.

4.2 Mathematische Grundlagen zur Boundary Elements Method (BEM)

Zur numerischen Beschreibung eines Korrosionsprozesses werden zwei Arten von Gleichungen benötigt. Die erste Art beschreibt die Potentialverteilung im Elektrolyten durch die Laplace-Gleichung. Die andere Art dient zur Beschreibung der elektrochemischen, nichtlinearen Reaktionen, die an den anodisch und kathodisch wirkenden Oberflächen ablaufen. Die mathematischen Hintergründe der BEM werden nun kompakt vorgestellt. Die detaillierte mathematische Beschreibung, auf der die Boundary Elements Method aufbaut, findet sich in [Breb84, Br04, Wa12].

Für ein gleichmäßiges, isotropes Medium, z. B. für einen Elektrolyten, kann gezeigt werden, dass der Stromfluss nach der Gleichung von Laplace:

$$k \cdot \nabla^2 \cdot E = 0 \quad (4-1)$$

mit E: Potential
k: Leitfähigkeit

zusammen mit:

$$I_{xi} = \frac{1}{k} \cdot \frac{\partial E}{\partial x_i} \quad (4-2)$$

mit I_{xi} : Stromdichte in x_i Richtung

berechnet werden kann. Die Laplace-Gleichung bildet den Elektrolyten mathematisch ab.

Die Lösung dieser Differentialgleichungen resultiert in den Boundary Elements Gleichungen, welche zu einem System linearer Gleichungen mit den folgenden Matrizen zusammengefasst werden können.

$$H \cdot E = G \cdot I \quad (4-3)$$

Die quadratischen Matrizen H und G beschreiben die Geometrie des Modells und E und I sind die Vektoren für die Stromdichte und das Potential.

Die Kinetik an der Grenzfläche zwischen Elektrolyt und Metalloberfläche wird durch die Stromdichte-Potential-Kurven beschrieben.

$$i_a = f_a(E_a) \quad (4-4)$$

$$i_c = f_c(E_c) \quad (4-5)$$

mit $i_{a,c}$: Stromdichte an der anodischen/kathodischen Metalloberfläche
 $f_{a,c}$: Polarisationsfunktion der Anode bzw. Kathode
 $E_{a,c}$: Elektrodenpotential der Anode bzw. Kathode

Die Stromdichte-Potential-Kurven beschreiben, wie viel Strom an der Stahloberfläche in Abhängigkeit des Potentials produziert bzw. konsumiert wird. Diese Kurven sind nicht linear und bilden eine Randbedingung für die Lösung der Laplace-Gleichung.

Durch Kopplung der Elektrodenkinetik und der Boundary Elements Bedingungen das folgende Gesamtsystems gelöst werden.

$$\begin{bmatrix} h_{aa} & h_{ac} \\ h_{ca} & h_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_a \\ E_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{aa} & g_{ac} \\ g_{ca} & g_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4-6)$$

Gleichung 4-6 kann iterativ gelöst werden. Als Ergebnis werden die Stromdichten und Potentiale an allen Knoten im System berechnet.

4.3 Modellgenerierung

Die Modellierung kann in drei Teilschritte untergliedert werden. Zuerst wird die Geometrie eingegeben und mit Netzelementen belegt. Anschließend werden die Randbedingungen definiert, indem die kathodisch und anodisch wirkenden Flächen festgelegt werden. Dies geschieht mittels Zuordnung entsprechender Stromdichte-Potential-Kurven bzw. durch definierte konstante Potentiale oder Stromdichten. Außerdem muss dem Elektrolyten eine Leitfähigkeit zugeordnet werden, die dem

Kehrwert des spezifischen Elektrolytwiderstandes entspricht. Im zweiten Schritt erfolgt die iterative numerische Berechnung. Zum Schluss müssen die Resultate geprüft und ausgewertet werden. Eine Visualisierung der Stromdichte- und Potentialverteilungen auf den Metalloberflächen bzw. der Potentialverteilung auf der Modelloberfläche ist für eine schnelle und übersichtliche Auswertung von Vorteil.

4.3.1 Eingabeparameter: Stromdichte-Potential-Kurven

Stromdichte-Potential-Kurven charakterisieren die Geschwindigkeit von Elektrodenreaktionen der anodischen und kathodischen Teilreaktionen. Die Kurven in Abhängigkeit des elektrochemischen Potentials beschreiben, wie viel Strom an der Stahloberfläche produziert oder konsumiert wird.

Unter der Annahme, dass alle für die anodische und kathodische Reaktion notwendigen Stoffe am Reaktionsort ausreichend verfügbar sind, ist der Durchtritt der Ladungsträger durch das elektrische Feld an der Phasengrenze der geschwindigkeitsbestimmende Schritt. Es gilt die Butler-Volmer Gleichung 4-7.

$$i = i_0 \left[e^{\left(\frac{\alpha \cdot z \cdot F \cdot (E - E_R)}{R \cdot T} \right)} - e^{\left(-\frac{(1-\alpha) \cdot z \cdot F \cdot (E - E_R)}{R \cdot T} \right)} \right] \quad (4-7)$$

mit:	R:	Gaskonstante [J/(mol K)]
	T:	Temperatur [K]
	α :	Durchtrittsfaktor [-]
	z:	Wertigkeit des Eisens [-]
	F:	Faraday-Konstante [(A s)/mol]
	E:	Potential [V]
	E_R :	Ruhepotential [V]
	i_0 :	Austauschstromdichte [A/m ²]
	i:	Summenstromdichte [A/m ²]

An der Phasengrenze Elektrode/Elektrolyt herrscht ein dynamisches Gleichgewicht, d. h. auch im Ruhepotential wird die Phasengrenze ständig von Ladungsträgern in beide Richtungen überschritten, obwohl nach außen kein Strom durch die Elektrode fließt. Der in beide Richtungen gleich große Strom wird als Austauschstromdichte i_0 bezeichnet und ist somit ein Maß für die Geschwindigkeit, mit der das Gleichgewicht eingestellt wird.

Die Austauschstromdichte entspricht dem Betrag der anodischen bzw. kathodischen Teilstromdichte am Ruhepotential. Der erste Term der Butler-Volmer-Gleichung gibt die anodische und der zweite Term die kathodische Teilreaktion wieder. Wird im Stromdichte-Potential-Diagramm die Stromdichte logarithmisch aufgetragen, liefert diese Gleichung für den anodischen und den kathodischen Ast jeweils eine Gerade, die so genannten Tafelgeraden, deren Schnittpunkt die Austauschstromdichte ergibt. Dieser Zusammenhang erlaubt eine Bestimmung der Austauschstromdichte, die nicht direkt gemessen werden kann, da bei einer Polarisation lediglich die Summenstromdichte erfasst wird. Die Steigung der Tafelgeraden in der dekadisch-halb-logarithmischen Darstellung entspricht für den anodischen (Gleichung 4-8) und kathodischen (Gleichung 4-9) Fall dem Kehrwert der folgenden Ausdrücke:

$$b_a = \frac{2,3 \cdot R \cdot T}{\alpha \cdot z \cdot F} \quad [\text{mV/dec}] \quad (4-8)$$

$$b_c = \frac{2,3 \cdot R \cdot T}{(1-\alpha) \cdot z \cdot F} \quad [\text{mV/dec}] \quad (4-9)$$

Grundsätzlich gibt es verschiedene Prinzipien zur Messung von Stromdichte-Potential-Kurven. Das galvanostatische Verfahren misst die Änderung des Elektrodenpotentials unter dem Einfluss einer treppenförmig gesteigerten Strombeaufschlagung, während bei der potentiostatischen Schaltung das Potential stufenweise erhöht wird und die Änderung des Stromflusses aufgezeichnet wird. Bei stetiger Steigerung des Stroms bzw. des Potentials als Funktion der Zeit liegt eine galvanodynamische bzw. eine potentiodynamische Messung vor. Hinreichend langsame Vorschubgeschwindigkeiten gewährleisten die Messung unter quasi-stationären Zuständen. Wird hingegen eine zu hohe Geschwindigkeit gewählt, ändert sich der Kurvenverlauf erheblich und es besteht die Gefahr, dass verhältnismäßig stark gehemmte Elektrodenreaktionen „überfahren“ werden [Kaes03] und die Messwerte unrealistisch, also unbrauchbar, werden.

Wie fast alle elektrochemischen Reaktionen sind auch Stromdichte-Potential-Kurven temperaturabhängig. Daher werden in dieser Arbeit bei der Wahl der numerischen Eingabeparameter Polarisationskurven gewählt, die mit der durchschnittlichen Temperatur von freibewitterten Bauteilen in Deutschland ermittelt wurden.

Die anodische Teilreaktion:

Nach Kaesche [Kaes03] sind anodische Strom-Spannungs-Kurven vom pH-Wert abhängig, während die kathodischen Kurven davon unbeeinflusst bleiben. Dies hat für die Bestimmung der Eingabeparameter nur eine untergeordnete Bedeutung. Da die Potentialfeldmessung bei chloridinduzierter Bewehrungskorrosion Verwendung findet, wird davon ausgegangen, dass sich die Bewehrung stets im alkalischen Bereich befindet. Der Fall einer Karbonatisierungsfront an der Bewehrung wird nicht betrachtet.

Bild 4-1 zeigt die Abhängigkeit der anodischen Teilreaktion vom Elektrolytwiderstand und dem Chloridgehalt.

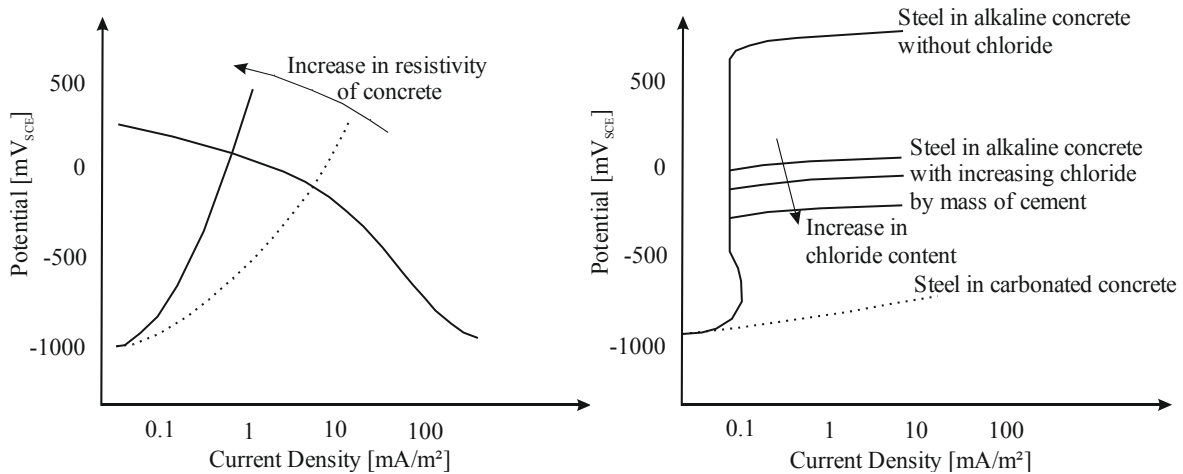


Bild 4-1: Einfluss des Elektrolytwiderstands und des Chloridgehaltes auf die anodische Teilreaktion [Be04].

Mit steigendem Elektrolytwiderstand des Betons fällt die anodische Tafelsteigung. Auch die Ergebnisse von Brem [Br04] zeigen, dass die anodische Polarisationskurve stark von der Betonfeuchtigkeit beeinflusst wird. Nöggerath [Nö90] hat Stromdichte-Potential-Kurven von Mörtelprobekörpern unter Variation des Mörtelwiderstandes gemessen. Es zeigte sich zum einen, dass das Ruhepotential negativer wird, je niedriger der Elektrolytwiderstand ist. Zum anderen wurden bei den anodischen Stromdichte-Potential-Kurven höhere Austauschstromdichten mit sinkendem Elektrolytwiderstand erreicht, während bei den kathodischen Stromdichte-Potential-Kurven die Austauschstromdichte vom Elektrolytwiderstand unbeeinflusst erscheint.

Aus Bild 4-1 (rechts) wird qualitativ deutlich, dass mit steigendem Chloridgehalt das anodische Ruhepotential fällt. Die Lage der anodischen Stromdichte-Potentialkurve verändert sich.

Die anodische Polarisationskurve ist zudem stark zeitabhängig [Br04]. Sie ist somit ein Abbild eines momentanen Zustandes, sie kann aber nicht den zeitlichen Verlauf eines korrodierenden Lochs beschreiben. Dies ist für die numerische Abbildung von Potentialfeldern nicht notwendig, da ebenfalls nur ein stationärer Korrosionszustand, der Zustand während der Potentialfeldmessung, abgebildet wird.

Nach den Forschungsergebnissen von Warkus [Wa12] kann die anodische Teilreaktion vereinfachend durch einen linearen Polarisationswiderstand R_a beschrieben werden (Gleichung 4-10).

$$i = \frac{(E - E_R)}{R_a} \quad (4-10)$$

mit: i : Stromdichte [A/m²]
 R_a : anodischer Polarisationswiderstand [Ωm^2]
 E : Potential [V]
 E_R : Ruhepotential [V]

Der anodische Polarisationswiderstand hängt maßgeblich vom Zementtyp, der Betonzusammensetzung, dem Chloridgehalt und der Temperatur ab [Ha12].

Die kathodische Teilreaktion:

Innerhalb der kathodisch wirkenden Bewehrung kann der Anteil der anodischen Reaktionen vernachlässigt werden. Somit bleiben zur Beschreibung der kathodischen Teilreaktion mit Hilfe der Butler-Volmer-Gleichung lediglich die Parameter Austauschstromdichte und kathodische Tafelsteigung übrig.

Bild 4-2 stellt qualitativ die Abhängigkeit der kathodischen Stromdichte-Potential-Kurve vom Sauerstoffdargebot an der Bewehrungsfläche dar.

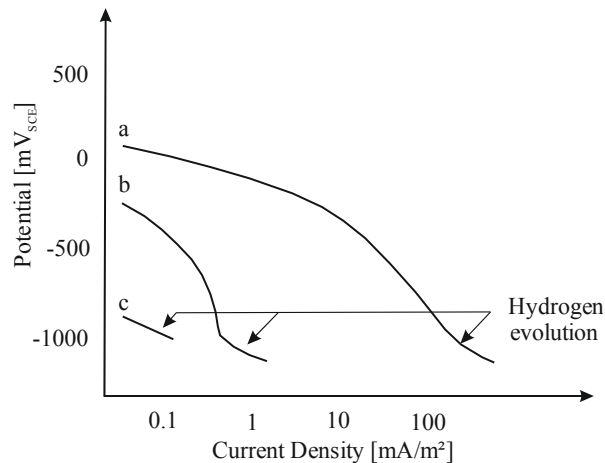


Bild 4-2: Schematische Darstellung der kathodischen Stromdichte-Potential-Kurve in alkalischen Beton: a) belüftet und halb-trocken; b) nass, c) komplett wassergesättigt [Be04].

Der Wert eines beliebigen Kathodenpotentials fällt bei steigendem Wassergehalt im Beton und somit reduziertem Sauerstoffdargebot. Wenn der Beton vollständig wassergesättigt ist (Kurve c) und kein Sauerstoff mehr im Beton enthalten ist, so sinkt das Potential stark ab und es wird Wasserstoff gebildet [Be04]. Zur Abbildung von Standardkorrosionssituationen in Stahlbetonbauteilen sind die Kurven a) und b) zu berücksichtigen.

Beschreibung von Stromdichte-Potential-Kurven:

Zur Beschreibung der Elektrodenkinetik als Eingabeparameter für numerische Simulationen sind zusammenfassend folgende Parameter festzulegen:

- Ruhepotentiale der Anode und Kathode [V]
- Treibspannung [V]
- anodischer Polarisationswiderstand [Ωm^2]
- Austauschstromdichte [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]
- kathodische Tafelsteigung [mV/dec]

Die Ruhepotentiale beeinflussen maßgeblich die Lage der anodischen und kathodischen Stromdichte-Potential-Kurven.

4.3.2 Eingabeparameter: Spezifischer Elektrolytwiderstand des Betons

Der Elektrolytwiderstand von Beton ist sowohl von Expositions- als auch Materialparametern abhängig. Auf der Widerstandsseite sind die Porenstruktur des Betons und hierbei vor allem die Zementart, der w/z-Wert und der Hydratationsgrad zu nennen. Von der Zementart wird maßgeblich der Ionengehalt der Porenlösung bestimmt [Bü96]. Auf der Einwirkungsseite dominieren die Parameter Feuchtigkeit, Temperatur und der nachträgliche Eintrag von Chloridionen [Bü96]. Zusätzlich hat die Karbonatisierung der Betonrandzone Einfluss auf den Elektrolytwiderstand, da bei der Bildung der Calciumcarbonate OH-Ionen verbraucht werden und damit neben der Ionenkonzentration auch die Leitfähigkeit im Porenwasser herabgesetzt wird.

4.4 Literaturlauswertung zur numerischen Simulation von Potentialverteilungen

In den letzten Jahren wurde das Werkzeug der numerischen Simulationen verstärkt in der Forschung eingesetzt, um Korrosionsprozesse im Stahlbeton und deren Einflussgrößen genauer zu studieren [Ba79, Jä01, KaSa01, Br04, Wa12]. Im Fokus der Forschung standen die Verteilung des Korrosionsstromes bzw. die Ausbreitung des Makroelements und die numerische Analyse der Steuergrößen auf die Korrosionsgeschwindigkeit. Die Ausbreitung von Potentialfeldern und deren Abbildung auf der Modelloberfläche sowie die Auswertung der flächigen Potentialwerte wurden bisher nicht umfassend untersucht.

Bereits Anfang der 90er haben Naish et al. [Na90] die Potentialverteilung an einem Stahlbetonbalken in Abhängigkeit des Elektrolytwiderstandes experimentell und numerisch mit Finiten Elementen untersucht. Es wurden sowohl 2-D als auch 3-D-Modelle verwendet. Als Ergebnis kann abgeleitet werden, dass der Einfluss des Elektrolytwiderstandes wesentlich stärker ausgeprägt ist als der der Betondeckung.

Brem [Br04] untersuchte die Potentialverteilung numerisch an einer Platte mit einer Einzelanode. Mit zunehmender Anodenfläche werden die Breite und die Tiefe des Potentialtrichters größer. Dies bedeutet, dass je kleiner die Anodenfläche ist, desto schwieriger wird die Detektierbarkeit der Korrosionsstelle. Im Fall von hohen Elektrolytwiderständen ist der Potentialtrichter tiefer und die Breite des Potentialtrichters kleiner als bei niedrigen Elektrolytwiderständen.

Die Betondeckung wirkt sich ebenfalls auf die Steigung des Potentialtrichters über der Anode aus. Je größer die Betondeckung ist, desto flacher ist der Potentialtrichter. Die Ausbreitung des Potentialtrichters wird nach Brem [Br04] nicht von der Betondeckung beeinflusst. Daraus kann gefolgert werden, dass große Betondeckungen die Detektierbarkeit von Anodenbereichen erschweren. Die Steuerung des Makroelementstromes beeinflusst zusätzlich die Potentialverteilung an der Betonoberfläche. Bei einer anodischen Steuerung bilden sich kleinere Potentialtrichter als bei ohmscher Steuerung. Aus diesem Grund kann von der Größe des Potentialtrichters (Potentialgradienten) nicht auf die Korrosionsgeschwindigkeit geschlossen werden.

Ergänzend hat Brem [Br04] numerische Simulationen mit mehreren Anoden durchgeführt, um die Beeinflussung der Anoden untereinander zu untersuchen. Unter den gewählten Randbedingungen

bildeten zwei Anoden erst bei einem Abstand von > 200 mm zwei Potentialtrichter aus, die sich aber noch im äußeren Rand überlagern.

Generell sind die berechneten Potentialtrichter von Brem im Vergleich zu den an realen Bauwerken messbaren Potentialtrichtern sehr schmal. Ein möglicher Grund für diese Beobachtung konnte in der Berechnung von Makroelementen mit mehreren Anoden aufgezeigt werden. Viele kleine Anoden bilden einen breiteren Potentialtrichter als eine große Anode, wodurch die Detektion begünstigt wird.

Ouglova et al [Ou05] haben den Einfluss des Elektrolytwiderstandes des Betons, Betonabplatzungen, Auftreten von Oxiden auf der Stahloberfläche und der Betondeckung sowohl experimentell als auch numerisch mittels der Finite Elemente Methode untersucht. Aus den Messungen an Stahlbetonstützen und numerischen Simulationen konnte nachgewiesen werden, dass die Potentialwerte aufgrund von Rissen oder Abplatzungen im Beton verfälscht werden. Ist der Beton hingegen rissfrei, so sind Potentialgradienten ein guter Korrosionsindikator. Oxide auf der Stahloberfläche beeinflussen ebenso wie der Elektrolytwiderstand und die Betondeckung die Potentialverteilung. Die Resultate von Ouglova et al. [Ou05] sind sehr kritisch zu sehen, da ein simples 2-D Finite Elemente Modell verwendet wurde und die elektrochemischen Eingabeparameter stark vereinfacht wurden. Beispielsweise wurde das Anoden- und Kathodenpotential als konstant betrachtet, wodurch die Polarisierung der Elektroden unberücksichtigt bleibt, was nicht der Realität entspricht.

Ge und Isgor [GeIs07] haben numerische Parameterstudien durchgeführt, um den Einfluss der Tafelsteigungen, Austauschstromdichte und Elektrodenpotentiale auf die Korrosionsraten und Polarisierung zu untersuchen. Das Ergebnis dieser Parameterstudie lautet, dass das Elektrodenpotential der Anode den größten Einfluss auf die Korrosionsrate hat, gefolgt von der kathodischen Tafelsteigung. Da die Korrosionsrate auch Einfluss auf die Potentialverteilung hat [Schi08], ist davon auszugehen, dass das Anodenpotential als auch die kathodische Tafelsteigung die Potentialverteilung bestimmen. Jedoch wurde lediglich eine lineare Makrozelle mit einem einzigen konstanten Elektrolytwiderstand untersucht. Eine Übertragung auf praktische Bauteilgeometrien ist nicht durchgeführt worden.

Pour-Ghaz et al. [PGIG09] untersuchten numerisch den Einfluss der folgenden Parameter auf die Potentialfeldmessung: Elektrolytwiderstand, Betondeckung, Temperatur, Sauerstoffdargebot und Anoden/Kathodenverhältnis. Durch Zunahme des Elektrolytwiderstandes verschieben sich die Anodenpotentiale in negative und die Kathodenpotentiale in positive Richtung. Aufgrund dessen soll die Interpretation der Potentialfeldmessdaten stets unter Berücksichtigung des Elektrolytwiderstandes durchgeführt werden. Weitere Ergebnisse zeigen, dass mit steigender Betondeckung die Detektierbarkeit anodischer Bereiche abnimmt. Die Parameterstudie zum Sauerstoffdargebot wurde über die Variation der Grenzstromdichte realisiert. Steigt das Sauerstoffdargebot, verschieben sich die Kathodenpotentiale geringfügig in positive Richtung während die Anodenpotentiale unbeeinflusst bleiben. Daraus schließt Pour-Ghaz, dass der Einfluss des Sauerstoffdargebots auf die Potentialfeldmessung vernachlässigbar ist, solange dem Beton der Sauerstoff nicht vollständig durch Wassersättigung entzogen wurde. Das Anoden- zu Kathodenverhältnis beeinflusst ebenfalls die Detektierbarkeit, besonders kleine Anoden- zu Kathodenverhältnisse erschweren die Interpretation der Potentialwerte. Die umfangreichen numerischen Studien von Pour-Ghaz wurden lediglich an einem

zwei-dimensionalen System durchgeführt, das nicht auf reale Bauteilgeometrien übertragen werden kann. Zusätzlich ist die Kathodenfläche stark begrenzt, wodurch die Vermutung nahe liegt, dass das Makrozellelement kathodisch kontrolliert ist, was aber nicht der Situation eines normal belüfteten Stahlbetonbauteils entspricht, das entweder anodisch oder elektrolytisch kontrollierte Makrokorrosionselemente aufweist.

Auch Warkus [Wa12] zeigt am Rande seiner numerischen Untersuchungen zur Geometrieabhängigkeit der Makrokorrosionsrate die Möglichkeit auf, die Potentialverteilung numerisch zu untersuchen. Beispielsweise wurde der Verlauf des Potentialtrichters (Bild 4-3) bei einem komplanaren Modell mit unterschiedlichen Elektrolytwiderständen untersucht.

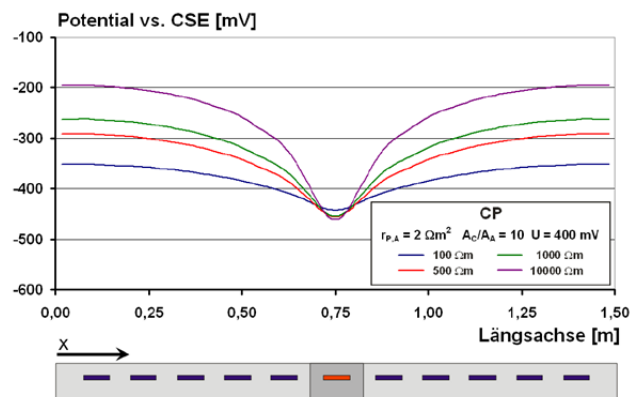


Bild 4-3: Potentialverteilung auf der Betonoberfläche über den Elektroden mit komplanarer Anordnung [Wa12]

Mit steigendem Elektrolytwiderstand wird die Potentialverteilung schärfer, d. h. die Tiefe des Potentialtrichters vergrößert sich geringfügig und seine Breite wird kleiner. Warkus weist darauf hin, dass bei der Ortung aktiver Bereiche durch eine Potentialfeldmessung die entscheidende Größe die Potentialdifferenz pro Längeneinheit ist. Weitere Untersuchungen zur Potentialfeldmessung werden in der Arbeit von Warkus nicht durchgeführt. Die Ergebnisse stimmen mit denen von Brem [Br04] überein.

Aus den genannten Untersuchungen können zwar einige Einflussfaktoren auf die Abbildung der Potentialdifferenzen auf einer Beton- bzw. Modelloberfläche abgeleitet werden, doch ist der Einfluss einzelner Faktoren auf die Detektierbarkeit von Anodenflächen nicht quantifizierbar. In dieser Arbeit werden daher numerische Untersuchungen vorgestellt und ausgewertet, die den Fokus auf die Quantifizierung der Einflussfaktoren unter realitätsnahen Bauteilgeometrien legen. Im ersten Schritt wird zunächst das Simulationsprogramm BEASY validiert.

4.5 Validierung der Boundary Elements Methods Software BEASY

In diesem Abschnitt wird die numerische Simulation von Potentialfeldern zum einen an einem „elektrolytischen Trog“ und zum anderen an einer instrumentierten Stahlbetonplatte validiert. Dafür wurden zunächst Strom- und Potentialwerte experimentell bestimmt und anschließend mit den Simulationsergebnissen verglichen.

4.5.1 Der elektrolytische Trog

Der elektrolytische Trog (Bild 4-4) besteht aus einem zylindrischen Plexiglasrohr mit einem Durchmesser von $\varnothing = 10$ cm und einer Länge von $l = 1130$ mm. Die Elektrode mit einem Durchmesser von $\varnothing = 12$ mm ist zentrisch im Rohr fixiert. Als Kathode wurde ein nicht korrodierender Stahl mit der Werkstoffnummer 1.4571 gewählt, auf den eine Anode aus Baustahl (Werkstoffnummer: 1.0037) aufgeschraubt wurde. An der Oberseite des Rohres wurde ein Schlitz parallel zur x-Achse gesägt. Entlang dieses Schlitzes wird eine Bezugselektrode (Kalomelektrode) geführt. Die Bezugselektrode ist mit einem Wegaufnehmer verbunden, damit jedes aufgenommene Potential der zugehörigen x-Koordinate zugeordnet werden kann.

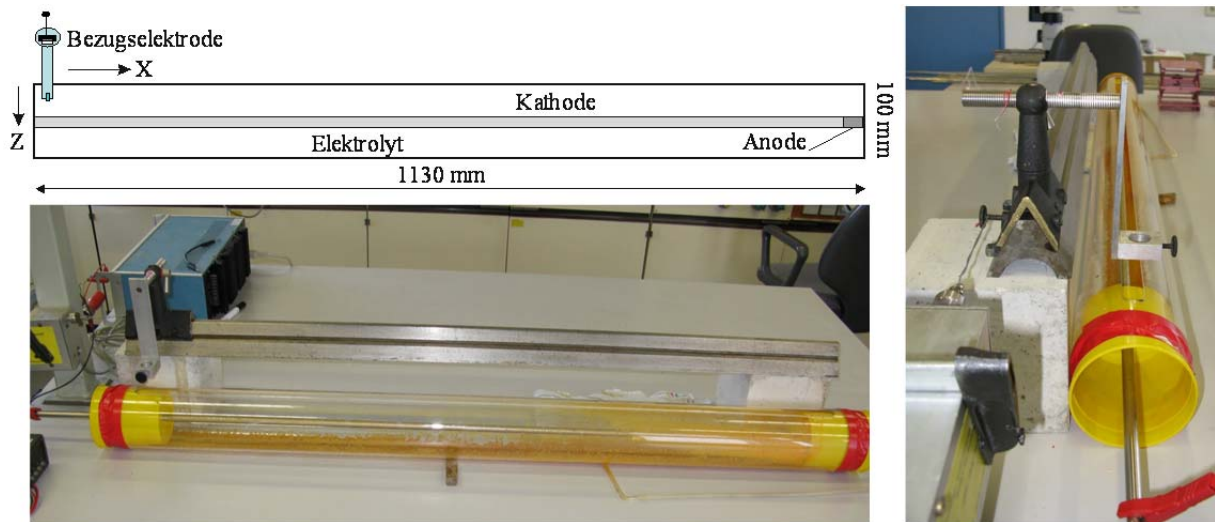


Bild 4-4: Elektrolytischer Trog: Schematische Skizze und Fotos.

Das numerische Modell als Abbild des elektrolytischen Trogs wird mit identischen geometrischen Randbedingungen aufgebaut. Im Bild 4-5 ist im oberen Teil das diskretisierte Modell abgebildet und im unteren Bereich eine simulierte Potentialverteilung.

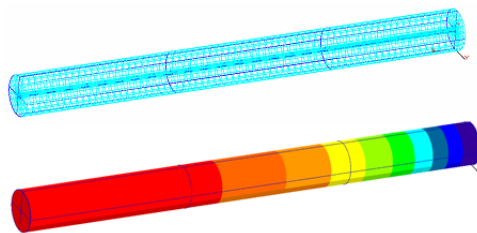


Bild 4-5: Numerisches Modell elektrolytischer Trog mit einer simulierten Potentialverteilung.

Die Ergebnisse aus der Validierung des Simulationsprogramms BEASY am elektrolytischen Trog wurden partiell in [KeGe10] veröffentlicht.

4.5.2 Modellparameter des elektrolytischen Trogs

Bei der Messung als auch bei der numerischen Simulation des elektrolytischen Trogs wurden drei Parameter variiert, die, wie die vorangegangenen Kapitel zeigen, einen Einfluss auf die Ausbreitung eines Potentialfeldes in einem Elektrolyten ausüben. Die drei Variationsparameter sind die Anodenfläche, der Elektrolytwiderstand und die Füllhöhe des elektrolytischen Trogs. Die Variation der Füllhöhe entspricht der Nachbildung unterschiedlicher Betondeckungen.

Die Anodenfläche läuft über den kompletten Umfang des Stabstahls. Der Elektrolytwiderstand bzw. die Leitfähigkeit wurde mit NaCl-Lösungen eingestellt. Die gewählten Leitfähigkeiten orientieren sich an Werten für einen CEM I-Beton, der entweder wassergesättigt, frei bewittert oder im Innenraum gelagert wird. Die Parametervariation ist zur Übersicht in Tabelle 4-1 aufgeführt. Zusätzlich werden die gewählten Leitfähigkeiten mit den tatsächlichen gemessenen Leitfähigkeiten verglichen.

Tabelle 4-1: Parametervariation des Modells elektrolytischer Trog.

L	Zustand	gewählter	entspr.	gemessene	Anodenfläche A	Füllhöhe H
		Elektrolytwiderstand [Ω m]	Leitfähigkeit [mS/cm]	Leitfähigkeit [mS/cm]		
I	wassergesättigter Beton	100	0,1	0,0984	3,1	1
II	frei bewitterter Beton	300	0,0333	0,0345	6,3	2
III	Beton im Innenraum	3000	0,0033	0,0036	9,4	3

Die Stromdichte-Potential-Kurven wurden separat, unabhängig von der Messung am elektrolytischen Trog aufgenommen. Für die Bestimmung der anodischen und kathodischen Stromdichte-Potential-Kurven wurden getrennt Proben aus dem gleichen Material hergestellt. Die jeweiligen Stromdichte-Potential-Kurven wurden mit Hilfe eines potentiostatischen Halteversuchs bestimmt. Die Proben wurden um 50 mV polarisiert und so lange auf dieser Stufe gehalten, bis die Stromdichte einen konstanten Wert annahm. Erst dann wurde die nächste Stufe mit einer Polarisierung um weitere 50 mV realisiert. Dieses Verfahren ist sehr zeitintensiv, aber nur durch eine langsame Polarisierung ist gewährleistet, dass keine elektrochemischen Prozesse an der Metalloberfläche überfahren werden [Za01] und die Stromdichte-Potential-Kurve reelle Elektrodeneigenschaften beschreibt. Die gemessene anodische und kathodische Stromdichte-Potential-Kurve ist in Bild 4-6 dargestellt.

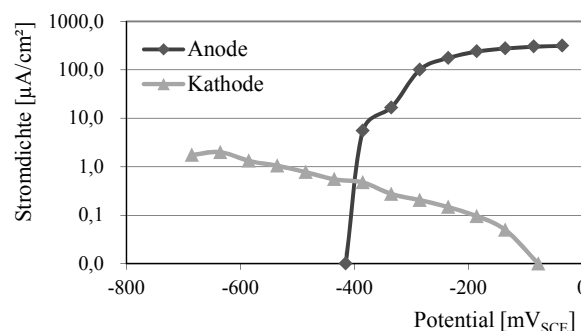


Bild 4-6: Im potentiostatischen Halteversuch gemessenen Stromdichte-Potential-Kurven.

4.5.3 Auswertung der Messergebnisse vom elektrolytischen Trog

Im ersten Schritt werden die Messergebnisse der Potentialwerte am Probability Plot ausgewertet, bevor sie im zweiten Schritt den simulierten Potentialwerten gegenübergestellt werden.

In Bild 4-7 und Bild 4-8 sind die Probability Plots mit Variation der Anodenfläche, der Leitfähigkeit und der Füllhöhe abgebildet.

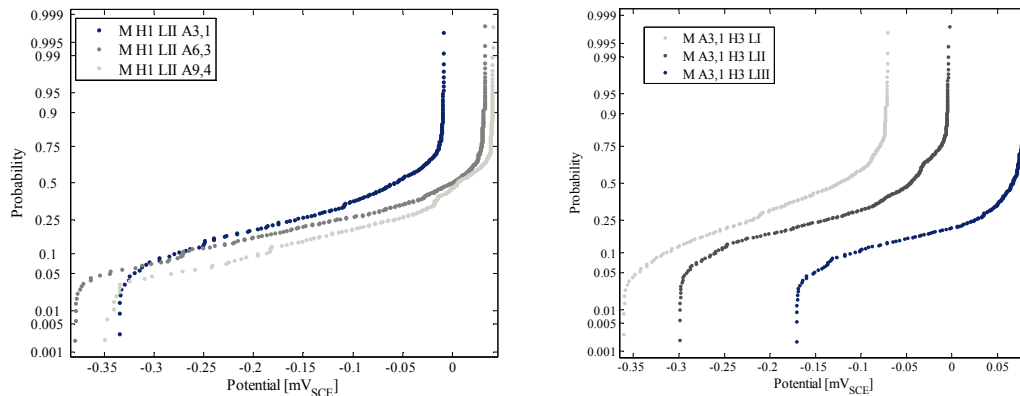


Bild 4-7: Messergebnisse (M) des elektrolytischen Trogs mit Variation der Anodenfläche A (links) und Variation der Leitfähigkeit L (rechts).

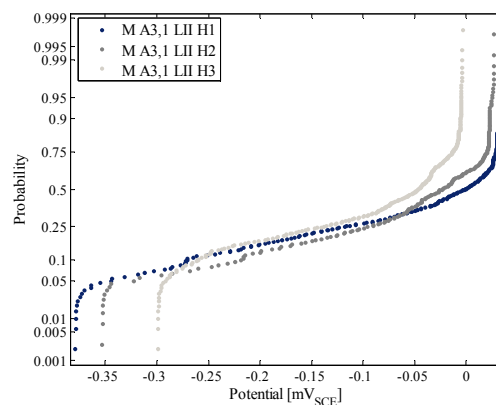


Bild 4-8: Messergebnisse (M) des elektrolytischen Trogs mit Variation der Füllhöhe H.

Den größten Einfluss auf die Potentialverteilung weist der Elektrolytwiderstand (Bild 4-7, rechts) auf. Der Einfluss ist charakterisiert durch eine Parallelverschiebung im Probability Plot von bis zu 200 mV, wodurch der Einfluss des Elektrolytwiderstandes auf die absoluten Elektrodenpotentiale besonders deutlich wird. Der Einfluss der Variation der Anodenfläche (Bild 4-7, links) hingegen ist nicht klar zu differenzieren. Die Steigung der Potentialwerte flacht bei steigender Anodenfläche ab. Mit größer werdender Füllhöhe wird die Steigung im Probability Plot leicht größer und der insgesamt gemessene Potentialbereich wird kleiner. Beispielsweise streuen die Potentialwerte bei einer Füllhöhe von 1 cm in einem Bereich von 400 mV und bei einer Füllhöhe von 3 cm in einem Bereich von 350 mV. Daraus kann abgeleitet werden, dass sich bei hohen Betondeckungen steilere Potentialgradienten ausbilden.

In allen Messungen am elektrolytischen Trog lief das Kathodenpotential am entgegengesetzten Ende der Anode einem konstanten Wert, dem Ruhepotential, zu. Dies bedeutet, dass der Anode immer ausreichend Kathodenfläche zur Verfügung stand. Das Makrokorrosionssystem war nicht kathodisch kontrolliert.

4.5.4 Vergleich der Simulations- und Messergebnisse vom elektrolytischen Trog

Der Vergleich der Messergebnisse mit den Simulationsergebnissen vom elektrolytischen Trog ist in den nachfolgenden Diagrammen (Bild 4-9 - Bild 4-11) zusammengefasst. Die Anode liegt jedes Mal am rechten Ende des elektrolytischen Troges bei einer Länge von rd. 1100 mm.

Bild 4-9 zeigt den Vergleich der Simulations- und Messergebnisse mit Variation der Leitfähigkeit und einer Anodenfläche von 3,1 cm² und einer Füllhöhe von 3 cm.

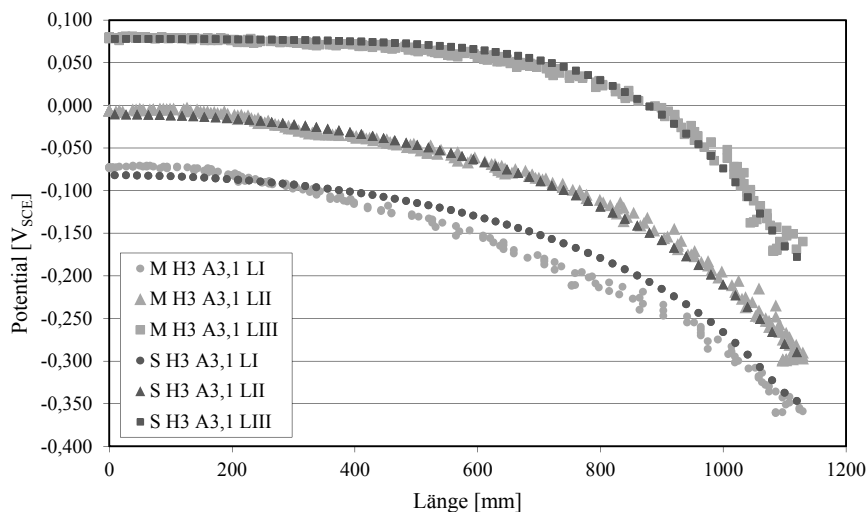


Bild 4-9: Vergleich Ergebnisse Messung (M) und Simulation (S) des elektrolytischen Troges mit Variation der Leitfähigkeiten (I, II, III); Anodenfläche 3,1 cm², Füllhöhe 3 cm.

Die Potentialwerte aus Simulation und Messung weisen eine sehr gute Übereinstimmung auf.

Die Ergebnisse aus dem Diagramm (Bild 4-9) zeigen zum einen den Einfluss der Leitfähigkeit auf die Potentiale am Rand eines Elektrolyten und zum anderen den Einfluss auf die Reichweite der Anode. Unter der Reichweite der Anode wird die Aktivierung bzw. Polarisierung der Kathode verstanden. Geringe Reichweiten bedeuten, dass auch nur geringe Kathodenflächen aktiviert werden konnten. Die Reichweiten können anhand der Kathodenpotentiale abgelesen werden. Hat das Kathodenpotential einen konstanten Wert (Ruhepotential) erreicht, endet der Reichweite der Anode.

Je niedriger die Leitfähigkeit ist, desto geringer ist die Reichweite der Anode. Bei einer Anodenfläche von 3,1 cm² und einer Leitfähigkeit, die sich bei einem frei bewitterten CEM I-Beton üblicherweise einstellen würde, beträgt die Reichweite der Anode entlang des Stabes rd. 100 cm. Dafür bilden sich bei niedrigeren Leitfähigkeiten deutlichere, steilere Potentialtrichter, also größere Potentialgradienten aus. Mit höheren Leitfähigkeiten werden niedrigere Anoden- und auch Kathodenpotentiale gemessen. Diese Ergebnisse stimmen qualitativ mit den Ergebnissen von Nürnberger [Nü91] überein.

In Bild 4-10 sind die Simulations- und Messergebnisse unter Variation der Anodenfläche abgebildet.

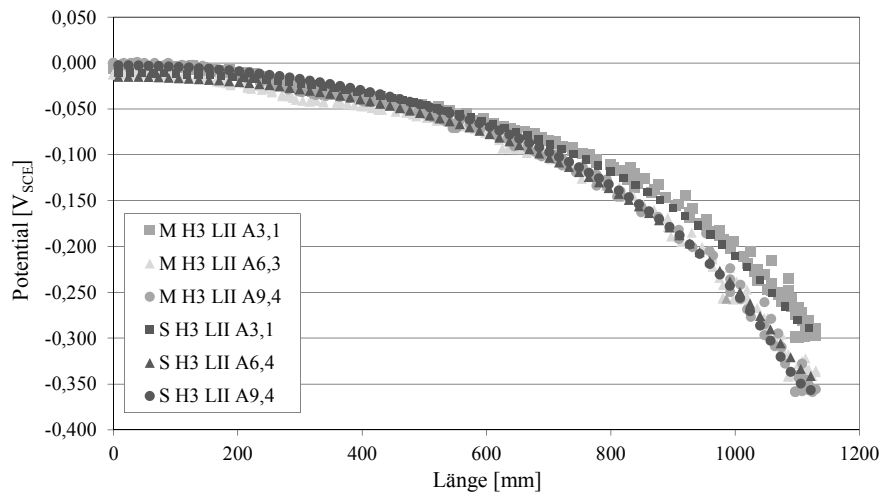


Bild 4-10: Vergleich Ergebnisse Messung (M) und Simulation (S) des elektrolytischen Trogs mit Variation der Anodenfläche; Leitfähigkeit II, Füllhöhe 3 cm.

Der Vergleich der gemessenen und numerisch ermittelten Werte aus Bild 4-10 spiegelt den Einfluss der Anodenfläche auf die Ausbreitung des Potentialfeldes wider. Bei Messungen direkt oberhalb der Anode ist ein Einfluss der Anodenfläche messbar. Je größer die Anodenfläche ist, desto negativer ist das gemessene Potential. Der Unterschied zwischen einer 9,4 cm² und einer 3,1 cm² großen Anode beträgt in diesem Beispiel 60 mV. Je weiter entfernt von den Anoden das Potential aufgezeichnet wird, desto geringer wird der Einfluss der Anodenfläche. Ab einer Entfernung von rd. 30 cm in eine Richtung ist der Einfluss der Anodengröße nicht mehr messbar. Die Potentialwerte für eine Anodenfläche von 6,4 cm² und die Potentialwerte für eine Anodenlänge von 9,4 cm² liegen sehr nahe beieinander. Die Ergebnisse stimmen mit Untersuchungen von [MePr89] überein. Für den Fall einer kleinen Anode inmitten eines großen kathodischen Bereiches gilt, dass die Reichweite des Elements geringer wird, je kleiner die Fläche der Anode ist. Zudem zeigen die Ergebnisse, dass sich weder durch die Messung der Potentiale noch des Potentialgradienten auf die Anodenfläche zurückschließen lässt.

Im nachfolgenden Diagramm (Bild 4-11) sind die berechneten und numerisch ermittelten Potentialwerte in Abhängigkeit der Füllhöhe des Elektrolyten abgebildet.

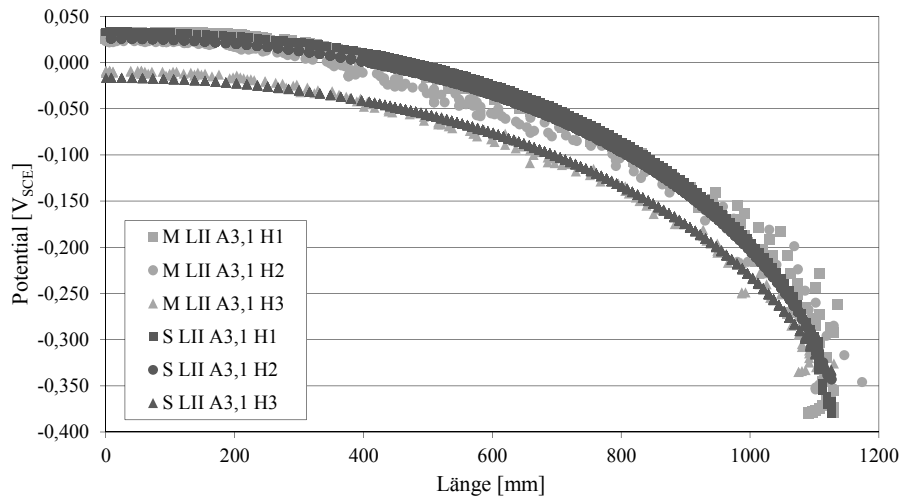


Bild 4-11: Vergleich Ergebnisse Messung (M) und Simulation (S) des elektrolytischen Trogs mit Variation der Füllhöhe; Anodenfläche 3,1cm²; Leitfähigkeit II.

Die Ergebnisse aus Bild 4-11 zeigen, dass die Füllhöhe des Elektrolyten nur einen geringen Einfluss auf die Potentialwerte ausübt. Lediglich unmittelbar oberhalb der Anoden beträgt die Potentialdifferenz zwischen der Füllhöhe von 1 cm und 3 cm 50 mV. Dieser Betrag wird zunächst mit größer werdender Entfernung von der Anode kleiner und steigt am Ende wieder auf 50 mV an. Der Unterschied zwischen der Messhöhe von 2 cm zu 3 cm ist vernachlässigbar. Mit einer größeren Füllhöhe werden entfernt von der Anode niedrigere Potentialwerte gemessen und es bildet sich ein flacherer Potentialgradient aus. Die Anode hat eine größere Reichweite, es wird mehr Kathodenfläche aktiviert. Diese Ergebnisse stimmen mit Untersuchungen von Büchler und Schiegg [BüSc07] überein.

Der Elektrolytwiderstand hat einen großen Einfluss auf die Ausbildung eines Potentialtrichters. Daher ist insbesondere bei Betonen mit geringer Leitfähigkeit, beispielsweise CEM III Betonen, mit steilen aber nicht breiten Potentialtrichtern zu rechnen. Die Anodenfläche hat in den untersuchten Größenordnungen nur einen geringen Einfluss auf die Ausbildung des Potentialfeldes. Die Ergebnisse bestätigen die Erkenntnis, dass die gemessenen Potentiale keinen Rückschluss auf die Größe der Anodenfläche zulassen. Der Einfluss der in diesem Beispiel betrachteten Messhöhen, respektive Betondeckungen, ist vernachlässigbar.

Insgesamt stimmen die gemessenen und numerisch ermittelten Ergebnisse sehr gut überein. Die Simulation mit der Software BEASY kann mit diesen Ergebnissen als validiert betrachtet werden. Es ist nun möglich, numerische Studien zum Einfluss geometrischer Parameter wie Anodenflächen, Anoden/Kathodenverhältnis, Anordnung der Anoden und anderer Einflüsse wie dem Elektrolytwiderstand durchzuführen. Diese Einflüsse können am numerischen Modell systematisch variiert werden.

Die am elektrolytischen Trog ermittelten Ergebnisse gelten für eine zweidimensionale, komplanare Makrokorrosionszelle, die meist in dieser Geometrie nicht in der Praxis am Bauwerk vorkommt. Zudem wurde nur ein einzelner Bewehrungsstab gemessen, wodurch die Interaktion mehrerer Stäbe und verschiedener Stabanordnungen unberücksichtigt bleiben. Daher sind aus den Ergebnissen am elektrolytischen Trog keine Empfehlungen für die Potentialfeldmessung am Bauwerk ableitbar.

Im nächsten Schritt werden an einem praxisnahen Stahlbetonprobekörper gemessene Potentialwerte mit numerisch ermittelten Potentialwerten verglichen.

4.5.5 Das Modell Platte BAM

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Probekörper wurden an der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM) hergestellt. Ziel dieser Untersuchung ist, die gemessenen Korrosionspotentiale auf der Stahlbetonoberfläche mit der numerisch berechneten Potentialverteilung an der Modelloberfläche zu vergleichen, um die Genauigkeit der numerischen Simulation zu kontrollieren. Die Probekörper sind zwei Stahlbetonplatten mit der Abmessung $L = 270 \text{ cm}$, $B = 270 \text{ cm}$ und $H = 15 \text{ cm}$. Der Aufbau der Platte und die Elektrodenanordnung sind Bild 4-12 zu entnehmen.

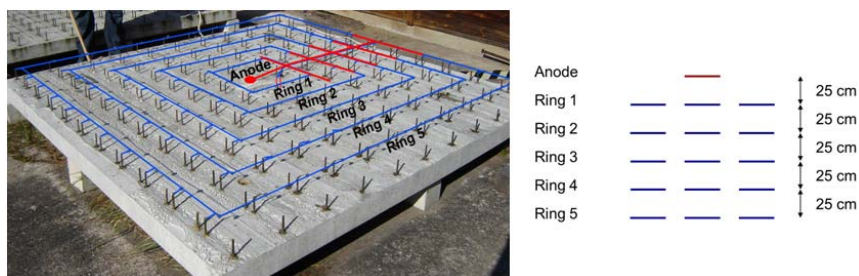


Bild 4-12: Darstellung einer Platte und Schema der für die Messungen verwendeten Arbeitselektroden [KeEb11].

Neben der dargestellten Anode bilden die Bügel im kurzgeschlossenen Element den kathodisch wirksamen Bereich aus. Je Ring sind drei Bügel miteinander kurzgeschlossen, dabei beträgt der Abstand der Ringe untereinander 25 cm. Die Bügel haben ein Öffnungsmaß von 20 cm und einen Abstand untereinander von 5 cm. Die im Beton eingebettete Mantelfläche eines Bügels beträgt 53 cm^2 . Die Betondeckung der Bügel beträgt 2 cm. Der auskragende Bereich der Bügel sowie der Bereich 1 cm unterhalb der Betonoberfläche sind mit Epoxidharz beschichtet. Die Anoden bestehen aus 2 Stabstählen (B 500), die in einem chloridhaltigen Betonprisma eingebettet sind und nach Fertigstellung der Platten eingebracht wurden. Die Mantelfläche der Anoden beträgt insgesamt 76 cm^2 . Beide Platten wurden mit CEM I hergestellt. Platte 2 enthält zusätzlich noch Steinkohlenflugasche. Die genaue Betonzusammensetzung als auch der genaue Aufbau werden in [KeEb11] beschrieben.

Die Eingabeparameter für die numerische Simulation sind die Geometrie der Platte, der Elektrolytwiderstand und die Stromdichte-Potential-Kurven. Diese Parameter wurden aus den Messungen an den realen Platten gewonnen. Die Ermittlung von Stromdichte-Potential-Kurven (SPK) erfolgte auf Basis von potentiostatischen Stufenversuchen mit einer Schrittweite von 25 mV über einen Zeitraum von 4 h. Aus den letzten 20 Messwerten je Potentialstufe wurde der zugehörige Mittelwert des Stromes I gebildet. Die genauen Ergebnisse zu den Stromdichte-Potentialkurven sind in [KeEb11] zu finden.

Im numerischen Modell (Bild 4-13) werden nur die kurzgeschlossenen Elektroden berücksichtigt. Die Elektroden, die nicht kurzgeschlossen, also nicht elektrisch leitend verbunden sind, beeinflussen das Makroelement nicht und werden somit im numerischen Modell nicht abgebildet.

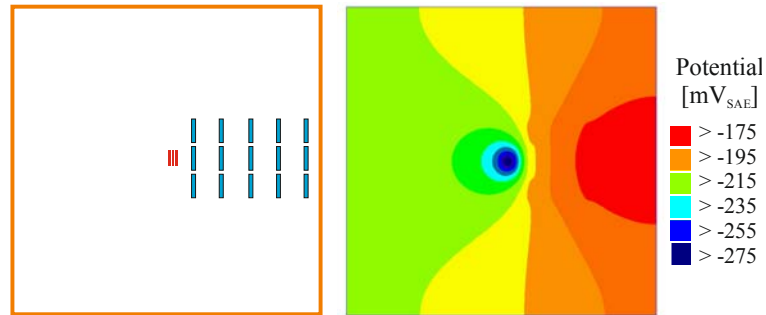


Bild 4-13: Numerisches Modell (links) und die Potentialverteilung der Platte 1 (rechts).

Die drei Anoden (rot) befinden sich in der Mitte der Stahlbetonplatte. Die Kathodenstäbe (blau) liegen rechts von der Anode in unterschiedlichem Abstand. In der numerisch ermittelten Potentialverteilung der Platte 1, Bild 4-14 (rechts), können die anodischen und kathodischen Bereiche klar unterschieden werden. Die Modelloberfläche weist im Bereich der Anoden die negativsten Potentialwerte auf. Je weiter entfernt die Kathoden liegen, umso positiver werden die Potentiale.

Die folgenden Diagramme, Bild 4-14, zeigen den Vergleich der gemessenen und der simulierten Potentialwerte von Platte 1 CEM I (links) und Platte 2 CEM I + FA (rechts).

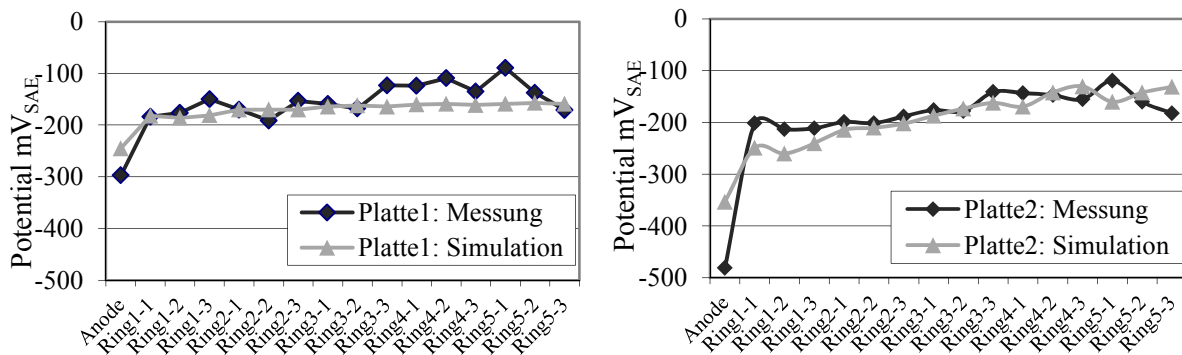


Bild 4-14: Vergleich der Potentialergebnisse von Simulation und Messung von Platte 1 (links) und Platte 2 (rechts) [KeEb11].

Die simulierten Kathodenpotentiale der Platten liegen im Wertebereich der gemessenen Potentiale. Lediglich die simulierten Anodenpotentiale sind bei Platte 1 um 50 mV und bei Platte 2 um 130 mV positiver. Die Abweichung der Anodenpotentiale kann auf die anodische Hemmung zurückgeführt werden. Bei Betrachtung der Eingabeparameter wie der anodischen SPK in Kombination mit dem gemessenen Elementstrom wird deutlich, dass bei Langzeitversuchen wie der SPK die anodische Hemmung berücksichtigt wird. Die gemessenen Potentiale hingegen basieren auf einer Polarisationsdauer von rd. 25 Minuten. Anhand des steileren Stromabfalls der Elementstromkurve nach 25 Minuten zeigt sich, dass an Platte 2 von einer langfristig größeren anodischen Hemmung auszugehen ist. [KeEb11]

Der Vergleich der Korrosionsströme aus Simulation und Messung beider Platten ist in Tabelle 4-2 aufgeführt.

Tabelle 4-2: Vergleich der Korrosionsströme von Simulation und Messung [KeEb11].

Probekörper	Korrosionsstrom [μA]		Abweichung [%]
	Messung	Simulation	
Platte 1	69	71	+2,9
Platte 2	91	75	-17,6

Der simulierte Korrosionsstrom der Platte 1 weist eine Abweichung von lediglich 2,9 % zum gemessenen Korrosionsstrom auf. Innerhalb der Platte 2 liegt die Abweichung mit 17,6 % höher. Die Streuungen im Korrosionsstrom liegen im Bereich, die auch nach Literaturdaten [WaRa10, Br04, Wa12] für numerische Simulationen von Korrosionsprozessen zu erwarten sind.

Die Übereinstimmung der gemessenen mit den simulierten Werten ist sehr gut. Im gemessenen Stahlbetonprobekörper sind Streuungen im Elektrolytwiderstand zu erwarten, während in der Numerik ein homogener Elektrolytwiderstand über den gesamten Querschnitt eingegeben wird. Dies ist ein Grund, weshalb es zu Abweichungen zwischen den gemessenen und simulierten Potentialwerten kommen kann. Beide Platten werden freibewittert gelagert, wodurch schon in der Randzone je nach Wetterbedingung starke Elektrolytwiderstandgradienten zu erwarten sind.

4.5.6 Zusammenfassung der Validierung

Die Ergebnisse aus den Vergleichen zwischen den Messungen und Simulationen am elektrolytischen Trog als auch an den Stahlbetonplatten der BAM zeigen, dass die numerische Simulation von Korrosionsprozessen und der daraus resultierenden Potentialverteilung ein zweckmäßiges Werkzeug zur Auswertung der Einflussfaktoren auf die Potentialfeldmessung ist.

Es konnte eine Abbildungsgenauigkeit erreicht werden, die in dem Bereich natürlicher Streuungen von 20 bis 40% liegt [Wu12]. Da die numerischen Berechnungen auf Plausibilität überprüft wurden, ist nicht davon auszugehen, dass die Gründe für die Abweichungen in der Numerik liegen. Die Abweichungen sind wahrscheinlich auf Ungenauigkeiten der gewählten Eingabeparameter zurückzuführen. Besonders der Elektrolytwiderstand besitzt einen großen Einfluss auf die Makrokorrosionszelle. Innerhalb der numerischen Modelle wird der Elektrolytwiderstand als homogen angenommen. Diese Vereinfachung stimmt mit dem Zustand im elektrolytischen Trog sehr gut überein, da dort eine Lösung als Elektrolyt verwendet wurde. Jedoch ist bei den Stahlbetonplatten kein homogen verteilter Elektrolytwiderstand zu erwarten. Dies ist ein Grund, weshalb die Ergebnisse vom elektrolytischen Trog besser mit der Simulation übereinstimmen als die Ergebnisse der Stahlbetonplatten.

Aus den Ergebnissen am elektrolytischen Trog wird zusätzlich bestätigt, dass der Elektrolytwiderstand einen dominanten Parameter für die Ausbildung eines Potentialfeldes darstellt.

4.6 Grenzen der Numerik

Die Verifikation und Validierung numerischer Modelle von natürlichen Systemen ist unmöglich, weil natürliche Systeme niemals geschlossene Systeme sind [Or94].

Jedes Modell ist eine Abbildung der Realität und beinhaltet Vereinfachungen und Annahmen. Ein Modell ist immer auch ein Kompromiss zwischen dem Anspruch, die Realität möglichst vollumfänglich abzubilden und dem Anspruch, mit möglichst wenig Annahmen und Berechnungsaufwand gute Resultate zu erhalten [Br04]. Numerische Modelle können durch Vergleiche von Experimenten und Vorhersagen bestätigt werden, jedoch sind diese Bestätigungen teilweise inhärent. Eine vollständige Bestätigung ist logischerweise ausgeschlossen durch den Irrtum der Anerkennung der Konsequenzen und durch den unvollständigen Zugang zu den wahren natürlichen Phänomenen. Numerische Modelle können daher relativ ausgewertet werden [Or94].

Die hier beschriebenen Annahmen, müssen bei der Übertragung der Berechnungsergebnisse auf reale Verhältnisse berücksichtigt werden. Auch ist zu beachten, dass die Genauigkeit der Resultate einer numerischen Berechnung primär von den Eingabedaten abhängt und erst sekundär von der Genauigkeit der numerischen Algorithmen. Das bedeutet, dass der Wahl der richtigen Eingabedaten, die die zu untersuchenden Parameter richtig beschreiben, eine wesentliche Bedeutung zukommt.

5 Numerische Parameterstudie zur Ermittlung der dominanten Einflussfaktoren auf die Potentialfeldmessung

Der nächste wesentliche Schritt zur Erreichung des Forschungsziels ist die Identifizierung der dominanten Einflussfaktoren auf die Potentialfeldmessung. Dies sind die Faktoren, in deren Abhängigkeit die Probability of Detection-Kurven beschrieben werden.

Im ersten Schritt werden die Eingabeparameter für die numerische Simulation von Potentialfeldern festgelegt. Anschließend werden Potentialfelder unter Variation der Eingabeparameter berechnet. Dann werden die dominanten Einflussfaktoren auf die Potentialfeldmessung auf Grundlage einer numerischen Parameterstudie herausgefiltert. Experimentell im Labor oder praktisch am Bauwerk ist eine solche Parameterstudie nur eingeschränkt mit einem erheblichen materiellen, personellen und zeitlichen Aufwand realisierbar.

5.1 Numerische Modellbildung

Für den Aufbau des numerischen Referenzmodells ist eine Geometrie festzulegen, wie sie in vielen Stahlbetonbauwerken anzutreffen ist. Die einfachste und die häufigste Bauteilgeometrie ist die Platte, z. B. Parkdecks, Fahrbahnplatten etc.. Das Referenzmodell wird daher mit einer Plattengeometrie versehen. Die Dimension der Platte richtet sich nach der Ausbreitung des Makroelementes. Das numerische Modell muss so groß gewählt werden, dass an den Rändern keine wesentlichen Korrosionsströme mehr fließen. Würden an den Rändern noch Ströme auftreten, wäre das Makrokorrosionselement kathodisch gehemmt. Dieser Zustand ist aber für belüftete Bauteilplatten nicht realistisch.

In Bild 5-1 ist das numerische Modell der Platte dargestellt. Die Anode befindet sich in Plattenmitte.

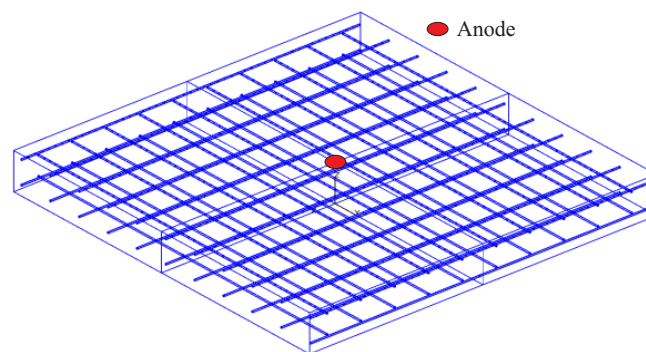


Bild 5-1: Numerisches Referenzmodell.

Die gewählte Platte ist quadratisch mit einer Seitenlänge von 2 m. Insgesamt beinhaltet die Platte vier Bewehrungslagen mit einem Bewehrungsdurchmesser von 10 mm. Der Stababstand beträgt 20 cm. Zur Ausnutzung der Doppelsymmetrie wurde für die eigentliche Simulation nur ein Viertel der Platte verwendet.

5.2 Eingabeparameter der Numerik

Die Wahl der Eingabeparameter für die numerische Simulation bestimmt maßgeblich die Genauigkeit der realistischen Abbildung von Potentialfeldern. Daher kommt der Festlegung der Eingabeparameter eine besondere Bedeutung zu.

In Tabelle 5-1 sind die Werte für die Eingabeparameter zusammengefasst.

Tabelle 5-1: Variation der Eingabeparameter für die numerische Berechnung von Potentialfeldern.

	Parameter	Einheit	Variation	Quelle
A_A	Anodenfläche Platte; Defektgröße	cm ²	0,0; 0,8; 1,5; 2,3; 3,1; 3,9; 4,7; 5,5; 6,2; 7,0	5.2.1
d_c	Betondeckung	mm	10, 20, 30, 40, 50	5.2.2
R	Elektrolytwiderstand	Ω m	100, 400, 700	5.2.3
E_A	Ruhepotential Anode	mV _{SCE}	-580, -600, -630	5.2.4
E_K	Ruhepotential Kathode	mV _{SCE}	-175, -225, -255	5.2.4
ΔE	Treibspannung	mV	325, 375, 425	5.2.5
R_a	anodischer Polarisationswiderstand	Ω m ²	0,5; 1,3; 2,0; 10	5.2.6
b_c	kathodische Tafelsteigung	V/dec	120, 285	5.2.7
i_{corr}	Austauschstromdichte	μ A/cm ²	0,003; 0,147	5.2.7

Im folgenden Abschnitt wird die Wahl der Eingabeparameter begründet.

5.2.1 Anodenfläche

Für die Festlegung der Anodenfläche, die die Defektgröße widerspiegelt, ist es notwendig, auf die Anforderungen zur statistischen Analyse von Probability of Detection Kurven zu achten. Die gewählten Defektgrößen sollen in dem Bereich liegen, in dem die POD nicht ausschließlich die Werte 0 und 1 annimmt. Durch viele POD-Werte von 0 und 1 wird die Aussagegenauigkeit nicht erhöht.

Die jeweiligen Anodenflächen haben sich iterativ ergeben. Zudem sind in Bezug auf die Defektgröße die folgenden zwei Fragen zu beantworten: a) welches ist die kleinste detektierbare Anodenfläche und b) welches ist die größte nicht detektierbare Anodenfläche, also der größte Defekt, der übersehen werden kann.

5.2.2 Betondeckung

Die Anwendung der Potentialfeldmessung ist nur für chloridexponierte Stahlbetonbauwerke zweckmäßig. Diese Bauwerke können den Expositionsklassen XS oder XD zugeordnet werden. Für diese Expositionsklassen ist zwar in der aktuellen Norm DIN 1045 eine Betondeckung von 55 mm gefordert, jedoch ist meist in den Bauwerken mit Korrosionsproblemen zu rechnen, die die geforderte

Betondeckung nicht einhalten bzw. auf Grundlage älterer Normen gebaut wurde, in denen eine geringere Anforderung an die Betondeckung galten. Daher variiert die Betondeckung in dieser Parameterstudie von 10 mm bis 50 mm.

5.2.3 Elektrolytwiderstand

Für die Auswahl der spezifischen Elektrolytwiderstände zur numerischen Simulation von Potentialfeldern wurden für verschiedene Betone mit unterschiedlichen Einwirkungen typische spezifische Elektrolytwiderstände aus der Literatur gewählt. Eine wichtige Randbedingung für die Auswahl des Elektrolytwiderstandes ist, dass innerhalb des Wertebereiches auch Korrosionsprozesse stattfinden können. Nach [An96, Be04] gilt als obere Grenze ein Elektrolytwiderstandswert von $1000 \Omega\text{m}$. Ist der Wert des Elektrolytwiderstandes höher, so ist keine ausreichende Ionenleitung im Elektrolyten mehr möglich, um den Korrosionsprozess aufrecht zu erhalten. Die untere Grenze des Elektrolytwiderstandes wird durch die Sauerstoffdiffusion bestimmt. Ist der Beton wassergesättigt, ist zwar der Elektrolytwiderstand sehr gering, so kann aber aufgrund des Sauerstoffmangels kein Korrosionsprozess ablaufen. Als untere Elektrolytwiderstandsgrenze wurde daher nach Andrade et al. [An96] und der Literaturrecherche von Hornbostel et al. [Ho12] der Wert von $100 \Omega\text{m}$ festgelegt. Bei typischen Einwirkungen liegen die handelsüblichen Betone innerhalb dieser Grenzen von $100 \Omega\text{m}$ bis $1.000 \Omega\text{m}$ [Po01, Be12, OsPoSc12].

5.2.4 Ruhepotentiale

Das Ruhepotential oder auch freie Korrosionspotential wird neben vielen anderen Faktoren maßgeblich vom Sauerstoffgehalt bestimmt. Der Sauerstofftransport im Beton wird durch die Dichtigkeit des Porengefüges und den Feuchtigkeitsgehalt im Beton beeinflusst. Diese beiden Parameter können indirekt über den Wert des Elektrolytwiderstandes des Betons quantifiziert werden. Die Abhängigkeit des Elektrodenpotentials vom Elektrolytwiderstand wird durch die Versuche am elektrolytischen Trog und der BAM-Platten bestätigt. Mit sinkendem Elektrolytwiderstand fällt das Potential ab.

Für die Analyse der dominanten Einflussfaktoren auf die Potentialfeldmessung ist die genaue Lage der anodischen und kathodischen Ruhepotentiale nicht maßgebend, da ebenfalls Variationen der Treibspannung durchgerechnet werden, wodurch die absolute Lage der Ruhepotentiale verändert werden muss. Von besonderem Interesse ist die Änderung des Potentials je Längen- bzw. Flächeneinheit und nicht die absolute Lage der Potentiale.

Bei Bertolini et al. [Be04] streuen die anodischen Ruhepotentiale in einem Bereich von -500 bis $-600 \text{ mV}_{\text{SCE}}$ und kathodische Ruhepotentiale in einem Bereich von -100 bis $-200 \text{ mV}_{\text{SCE}}$. Innerhalb der Untersuchungen von Brem [Br04] liegen die anodischen Potentiale bei ca. $-550 \text{ mV}_{\text{SCE}}$ und die kathodischen bei ca. $-150 \text{ mV}_{\text{SCE}}$. Bei Brem werden auch die dazugehörenden Elektrolytwiderstände angegeben, aber die anodischen Potentiale wurden alle bei Elektrolytwiderstandswerten $> 100 \Omega\text{m}$ gewonnen und decken somit die hier verwendeten Elektrolytwiderstandsbereiche ab. Die kathodischen

Potentiale hingegen streuen kaum, obwohl der Elektrolytwiderstand Werte von 60 Ωm bis 1567 Ωm abdeckt. Dies widerspricht den Ergebnissen des elektrolytischen Trogs und der Randbalken.

Die experimentellen Versuche von Warkus [Wa12] weisen ein anodisches Ruhepotential von ca. $-380 \text{ mV}_{\text{SCE}}$ und ein kathodisches von ca. $-60 \text{ mV}_{\text{SCE}}$ auf. Während die Versuchskörper aus Portlandzement einen Elektrolytwiderstand von ca. 120 bis 180 Ωm besitzen, führt die Verwendung des Hochofenzementes zu einem höheren Widerstand von ca. 350 bis 420 Ωm . Trotz der Bandbreite der Elektrolytwiderstandswerte streuen die Ruhepotentiale kaum. Nach Harnisch [Ha12] weisen die anodischen Ruhepotentiale in annähernd wassergesättigtem Beton (nach einer Beaufschlagungsphase) Werte von $-540 \text{ mV}_{\text{SCE}}$ auf, während bei Betonen mit hohen Wassergehalten (nach einer Trocknungsphase) Werte im Mittel von $-460 \text{ mV}_{\text{SCE}}$ gemessen wurden. Diese Potentialwerte wurden nicht mit Elektrolytwiderstandsdaten verknüpft.

In Tabelle 5-2 sind die Ergebnisse zu den Elektrodenpotentialen aus der Literatur zusammengefasst.

Tabelle 5-2: Zusammenfassung zur Literaturrecherche der Elektrodenpotentiale.

Autor	E_A [mV_{SCE}]	E_K [mV_{SCE}]	Quelle
Bertolini	-500 - -600	-100 - -200	[Be04]
Brem	-550	-150	[Br04]
Ge und Isgor	-780	160	[GeIs07]
Jäggi	-	-180	[Jä01]
Harnisch	-270 - -600	-	[Ha12]
Nürnbergger	-690 - -750	-	[Nü95]
Raupach	-	-315 - -375	[Ra92]
Warkus	-330	-60	[Wa12]

In der Literatur wird eine große Bandbreite an Ruhepotentialen angegeben. Jedoch ist nicht immer nachvollziehbar, unter welchen Randbedingungen, z. B. Elektrolytwiderstand, die Potentialwerte ermittelt wurden. Ein zusätzliches Problem ist die Messung des „wahren“ Anodenpotentials. Oft laufen auf der Anode parallel kathodische Reaktionen ab, wodurch lediglich ein Mischpotential der anodischen und kathodischen Bereiche messbar bleibt.

Um nun die Ruhepotentiale für die Simulation von Potentialfeldern in Abhängigkeit des Elektrolytwiderstandes festzulegen, wurden die Potentialänderungen der anodischen Ruhepotentiale vom elektrolytischen Trog herangezogen. Bei der Änderung des Elektrolytwiderstandes von 100 Ωm auf 300 Ωm , änderte sich das anodische Ruhepotential um 27 mV und bei der Änderung von 300 Ωm auf 3000 Ωm um 96 mV. Daraus ergibt sich durch Interpolation für die Simulation eine Potentialdifferenz von 30 mV bei der Änderung des Elektrolytwiderstandes von 100 Ωm auf 400 Ωm und eine Potentialdifferenz von 20 mV bei der Änderung von 400 Ωm auf 700 Ωm .

5.2.5 Treibspannung

Die Treibspannung ist die Potentialdifferenz zwischen dem anodischen und kathodischen Elektrodenpotential. Gulikers und Raupach [GuRa06] haben unterschiedliche numerische Modelle verschiedener Forscher miteinander verglichen. Ein Ergebnis dieses Vergleiches ist, dass die Treibspannung eine entscheidende Rolle in der Kinetik der Korrosion hat und die Höhe des Makrokorrosionsstroms maßgeblich bestimmt, da der wirksame Anteil der Bewehrung durch die Treibspannung und den Elektrolytwiderstand dominiert wird. Diese Aussage wird durch die Forschungsarbeiten von Warkus [Wa12], Harnisch [Ha12] und Osterminski [Os13] bestätigt.

Warkus [Wa12] hat Treibspannungen an unterschiedlichen Betonzusammensetzungen (CEM I, w/z 0,5/0,6 und CEM III w/z 0,5) in konstantem Klima mittels Depolarisationsmessungen bestimmt. Durch die konstante Lagerung in einer Klimakammer ist von homogenen Feuchteverteilungen auszugehen. Die Mittelwerte der Treibspannungen liegen zwischen 300 mV und 350 mV mit Maximalwerten von bis zu 440 mV. Im Falle von feuchten Makroanoden und trockenen kathodischen Bereichen kann sich die Treibspannung weiter erhöhen [Wa12]. Die von Harnisch [Ha12] ermittelten Treibspannungen streuen über einen größeren Bereich von 250 bis 500 mV.

5.2.6 Anodischer Polarisationswiderstand

Das Polarisationsverhalten der Anoden wird mit einem konstanten anodischen Polarisationswiderstand beschrieben, der tendenziell von vielen Faktoren wie der verwendeten Zementsorte, der Betonzusammensetzung, Chloridgehalt und Temperatur abhängig ist [Wa12].

Warkus [Wa12] bestimmte den anodischen Polarisationswiderstand an Versuchskörpern aus Portlandzement (w/z = 0,5). Die Werte streuen zwischen 0,5 und 2 Ωm^2 . Die anodischen Polarisationswiderstände von Harnisch [Ha12] erstrecken sich über einen größeren Bereich von etwa 0,5 und 7,5 Ωm^2 . Für einen CEM I Beton innerhalb der Expositionsklasse XD3 quantifizierte Osterminski [Os13] für den anodischen Polarisationswiderstand eine Lognormalverteilung mit Mittelwert von 1,8 Ωm^2 und einer Standardabweichung von 0,63 Ωm^2 .

Die in dieser Arbeit festgelegten anodischen Polarisationswiderstände von 0,5 bis 10 Ωm^2 decken einen großen Wertebereich innerhalb der hier vorgestellten Literaturarbeiten ab. Ein Wert von 0 Ωm^2 kommt einer unpolarisierbaren Anode gleich, während ein Widerstand von 10 Ωm^2 dem Verhalten einer sehr aktiven Anode entspricht [Wa12].

5.2.7 Kathodische Tafelsteigung und Austauschstromdichte

Die Reaktionskinetik an der Kathode wird von der Sauerstoffkonzentration im Beton bestimmt. Steht der kathodischen Teilreaktion ausreichend Sauerstoff zur Verfügung, ist sie durchtrittskontrolliert und im entgegengesetzten Fall unterliegt sie einer Diffusionskontrolle. Zunächst wird nur der Fall einer ausreichenden Sauerstoffversorgung betrachtet, da eine Sauerstoffverarmung nur in ständig wassergesättigten Bauwerken der Exposition XD2/XS2 zu erwarten ist und nicht in Bauwerken der

Exposition XD3/XS3. Zudem ist die Anwendung der Potentialfeldmessung in ständig wassergesättigten Bauteilen nicht sinnvoll, da aufgrund des Sauerstoffmangels keine kathodische Teilreaktion und in Konsequenz auch keine Korrosion ablaufen kann.

Umfangreiche Arbeiten zum kathodischen Polarisationsverhalten wurden von Brem [Br04] und Warkus [Wa12] durchgeführt. Brems Untersuchungen kommen auf eine Tafelsteigung von 285 mV/dec mit einer Austauschstromdichte von $0,147 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, während Warkus eine Tafelsteigung von 120 mV/dec und eine Austauschstromdichte von $0,003 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ermittelte.

Diese beiden Wertepaare wurden für die Parameterstudie berücksichtigt, da sie eine weite Spanne an kathodischen Polarisationsdaten aus der Literatur abdecken [Ra92, Jä01].

5.3 Verarbeitung der Simulationsergebnisse

Die numerische Berechnung liefert als Ergebnis Stromdichten und Potentiale zu jedem Element im Modell. Für die Auswertung der Potentialverteilung sind die Potentialwerte auf der Modelloberfläche von Interesse. Beispielhaft ist eine solche numerisch berechnete Potentialverteilung in Bild 5-2 dargestellt.

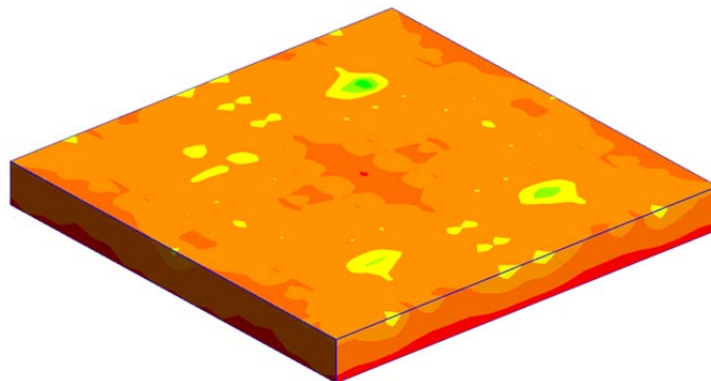


Bild 5-2: Numerisch ermittelte Potentialverteilung auf einer Platte mit mehreren Anoden.

Die Potentialwerte auf der Modelloberfläche können nach verschiedenen Gesichtspunkten ausgewertet werden. Ein wichtiger Parameter bei der Durchführung der Potentialfeldmessung ist das gewählte Messraster. Daher wurde das numerische Modell derart aufgebaut, dass verschiedene Messraster abgegriffen werden können. Zusätzlich ist der Einfluss des Abstands der Referenzelektrode zur Anodenfläche von Interesse, da in der Praxis nicht gewährleistet werden kann, dass ein Messstreifen automatisch oberhalb der Anodenflächen verläuft. Der Abstand zwischen Anodenfläche und Referenzelektrode/Messstreifen hat großen Einfluss auf die Prüfqualität der Potentialfeldmessung in Abhängigkeit des Messrasters. In Tabelle 5-3 sind die gewählten Auswerteparameter zusammengefasst.

Tabelle 5-3: Variation der Auswerteparameter nach der numerischen Berechnung der Potentialverteilung.

Parameter	Einheit	Variation	Abstand Anode - Referenzelektrode
Messraster	cm x cm	5 x 5; 10 x 10 15 x 15; 25 x 25	
X x X_0	cm x cm		0
X x X_1	cm x cm		5
X x X_2	cm x cm		10
X x X_3	cm x cm		15

Nach der Filterung der Simulationsergebnisse in die unterschiedlichen Messraster und Messrasterkombinationen steht für jede Variation eine Potentialverteilung zur Verfügung.

5.4 Auswertung der Simulationsergebnisse

Die Ergebnisse aus der numerischen Parameterstudie werden mit Hilfe von Probability Plots ausgewertet, in denen die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Potentialwertes gegen die Potentialwerte auf der Modell(Beton)-oberfläche aufgetragen wird. Die Standardeinstellungen sind die kathodischen Polarisationswerte von Brem [Br04] und ein Messraster von 5x5cm². Änderungen der Standardeinstellungen sind entsprechend angegeben. Jede einzelne numerische Simulation spiegelt eine Potentialfeldmessung wider.

Die ersten zwei Diagramme zeigen die Simulationsergebnisse mit Variation der Anodenfläche (Bild 5-3) und der Betondeckung (Bild 5-4).

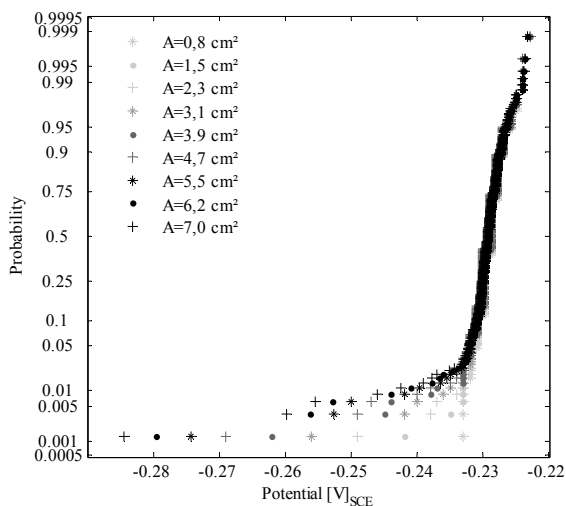


Bild 5-3: Probability Plot mit Variation der Anodenfläche: R 400 Ω m, d_c 40 mm, ΔE 375 mV, R_a 1,3 Ω m², Messraster 5x5 cm².

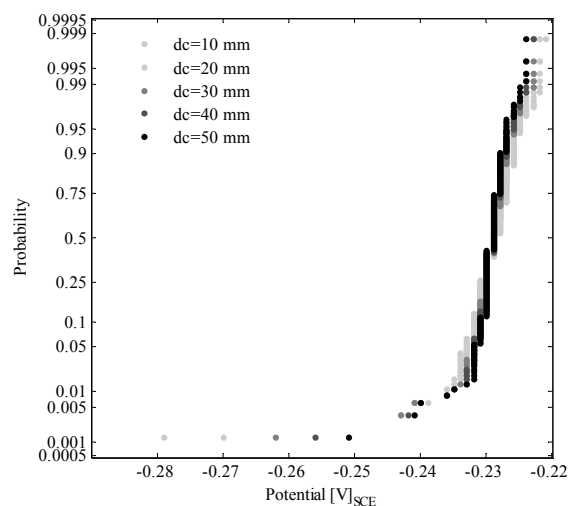


Bild 5-4: Probability Plot mit Variation der Betondeckung: R 400 Ω m, A_A 3,1 cm², ΔE 375 mV, R_a 1,3 Ω m², Messraster 5x5 cm².

Mit steigender Anodenfläche steigt auch die Potentialdifferenz innerhalb des Potentialfeldes, das Signal Korrosion wird verstärkt. Die Anodenfläche bestimmt maßgeblich die Makroelementstromdichte. Kleine Anodenflächen polarisieren die Kathoden schwächer, verringern so den Gesamtstrom, was zu einem weniger stark differenzierten Potentialfeld führt. Daher zeigen die Ergebnisse, dass kleine Anodenflächen kleiner 3 cm^2 nur schwer zu detektieren sind, besonders bei größeren Messrastern, wie sie in der Praxis üblich sind. Nach den Arbeiten von Harnisch [Ha12] startet der Korrosionsprozess mit einer kleinen Anodenfläche, deren Wachstum zeitlich nahezu linear verläuft. Daher ist in chloridbeaufschlagten Bauwerken mit solchen kleinen Anodenflächen zu rechnen.

Die Potentialänderung auf der Modelloberfläche wird mit sinkender Betondeckung verstärkt. Dieser Effekt könnte zu der Interpretation führen, dass geringere Betondeckungen zu einer höheren Aussagequalität der Potentialfeldmessung beitragen. Jedoch sinkt bei kleineren Betondeckungen auch die aktivierbare Kathodenfläche durch die Verringerung des Elektrolytquerschnittes und somit reduzierten Ionenleitfähigkeit. Dies führt zu einem schmalen Potentialtrichter, der bei größeren Messrastern schwerer zu detektieren ist.

Besonders bei stark schwankenden Betondeckungen innerhalb eines Bauteils ist die Interpretation der Potentialfeldmessung mit großer Sorgfalt durchzuführen. Liegt eine relativ konstante Betondeckung vor, ist der Einfluss der Betondeckung bei einem Messraster von $5 \times 5 \text{ cm}^2$ vernachlässigbar.

In den folgenden zwei Diagrammen werden die Ergebnisse zur Parametervariation Elektrolytwiderstand (Bild 5-5) und Treibspannung (Bild 5-6) vorgestellt. Innerhalb der numerischen Modelle wurde ein homogener Elektrolytwiderstand eingestellt.

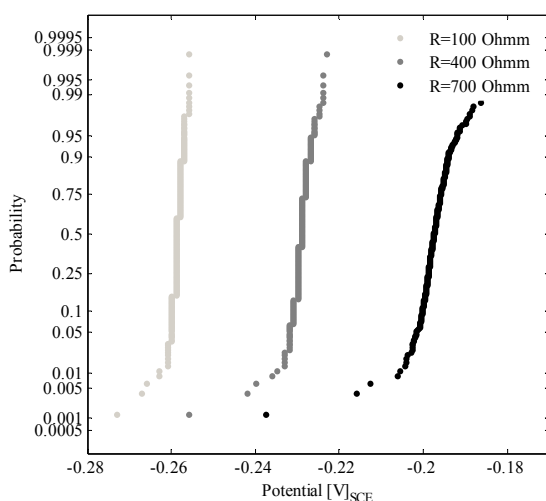


Bild 5-5: Probability Plot mit Variation des Elektrolytwiderstandes: A_A $3,1 \text{ cm}^2$, d_c 40 mm , ΔE 375 mV , R_a $1,3 \Omega \text{ m}^2$, Messraster $5 \times 5 \text{ cm}^2$.

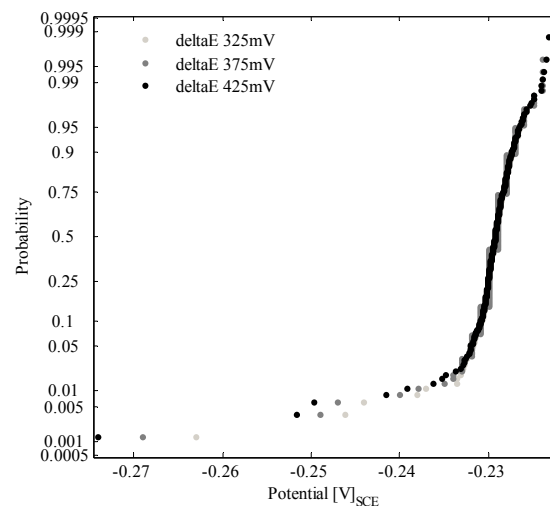


Bild 5-6: Probability Plot mit Variation der Treibspannung: R $400 \Omega \text{ m}$, d_c 40 mm , A_A $4,7 \text{ cm}^2$, R_a $1,3 \Omega \text{ m}^2$, Messraster $5 \times 5 \text{ cm}^2$.

Höhere Elektrolytwiderstände führen zu einer positiveren Lage der Potentialverteilungen. Dies liegt in der Lage der Ruhepotentiale in Abhängigkeit vom Sauerstoffdargebot begründet. Außerdem bildet

sich bei reduzierten Leitfähigkeiten ein steilerer Potentialtrichter oberhalb der Anodenbereiche aus, was an der großen Potentialdifferenz innerhalb der Potentialverteilung deutlich wird. Mit sinkendem Elektrolytwiderstand können mehr kathodisch wirksame Bereiche in steigender Entfernung zur Anode aktiviert werden, wodurch die Äquipotentiallinien sehr flach werden, der Potentialgradient schwächer ausfällt und die Detektierbarkeit reduziert wird.

In Bauwerkssituationen der Expositionsklasse XD3/XS3 ist stets eine heterogene Elektrolytwiderstandsverteilung durch Feuchtigkeitsunterschiede innerhalb eines Bauteils zu erwarten. Dies kann zu einer großen Bandbreite an Potentialwerten führen, die die Interpretation der Potentialfelddaten erschweren.

Die Potentialdifferenzen werden mit steigender Treibspannung größer, da eine höhere Treibspannung stärker polarisiert und eine größere wirksame kathodische Fläche aktiviert. Eine Erhöhung der Treibspannung von 100 mV führt zu einer zusätzlichen Potentialdifferenz der negativsten Potentiale von 20 mV.

Die Parameterstudien zum Einfluss des anodischen (Bild 5-7) und kathodischen (Bild 5-8) Polarisationsverhaltens sind in den folgenden Diagrammen abgebildet.

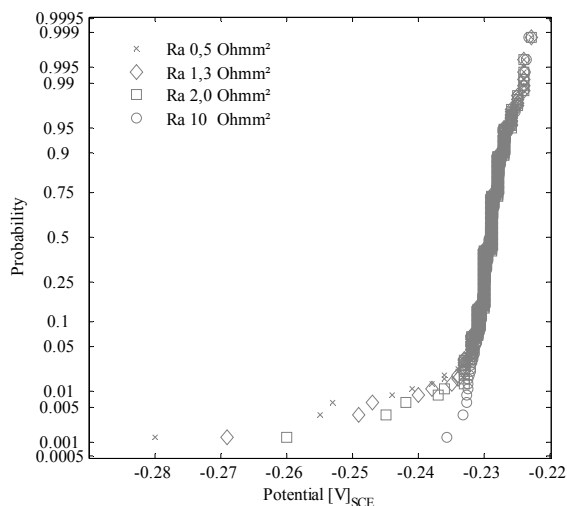


Bild 5-7: Probability Plot mit Variation des anodischen Polarisationswiderstandes:
 R 400 Ω m, d_c 40 mm, A_A 4,7 cm²,
 ΔE 375 mV, Messraster 5x5 cm².

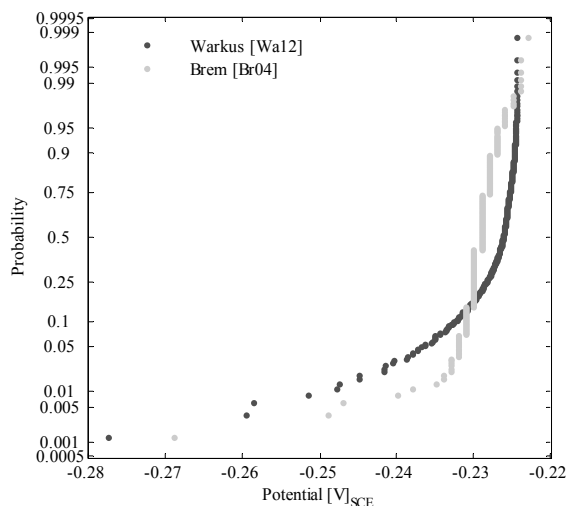


Bild 5-8: Probability Plot mit Variation des kathodischen Polarisationswiderstandes:
 R 400 Ω m, d_c 40 mm, A_A 4,7 cm²,
 ΔE 375 mV, Messraster 5x5 cm².

Der anodische Polarisationswiderstand beeinflusst ebenfalls die Potentialgradienten innerhalb einer Potentialverteilung. Mit einem sinkenden anodischen Polarisationswiderstand von 10 Ω m² auf 0,5 Ω m² steigt die Potentialdifferenz um ca. 45 mV. Jedoch wurde mit der Festlegung der Parametervariation der anodischen Polarisationswerte auch eine sehr große Bandbreite abgedeckt. Statistische Untersuchungen von Osterminski [Os13] haben ergeben, dass der anodische Polarisationswiderstand für Bauteile der Expositionsklasse XD3/XS3 lognormal um den Mittelwert von 1,3 Ω m² und einer Standardabweichung von 0,63 Ω m² streuen. Innerhalb dieser Bandbreite ist der

Einfluss des anodischen Polarisationswiderstandes auf die Ausbildung eines Potentialfeldes vernachlässigbar.

Das kathodische Polarisationsverhalten beeinflusst die Potentialdifferenz nur gering. Zwar wird die kathodische Potentialverteilung in ihrer Steigung verändert, die absolute Differenz der Potentiale liegt aber bei lediglich 10 mV. Aufgrund dieser Ergebnisse wird der Einfluss des kathodischen Polarisationsverhaltens nicht weiter berücksichtigt.

In der letzten Gegenüberstellung werden keine Eingabeparameter mehr betrachtet, sondern die Variation des Messrasters, das durch Filterung der Simulationsergebnisse gewonnen wird. Für eine bessere Vergleichbarkeit wurde in die folgenden Diagramme zum Messraster $15 \times 15 \text{ cm}^2$ und $25 \times 25 \text{ cm}^2$ (Bild 5-9) ebenfalls das Messraster $5 \times 5 \text{ cm}^2$ grau hinterlegt. Die Änderung der Wahrscheinlichkeiten liegt in der Verringerung der Datensätze begründet.

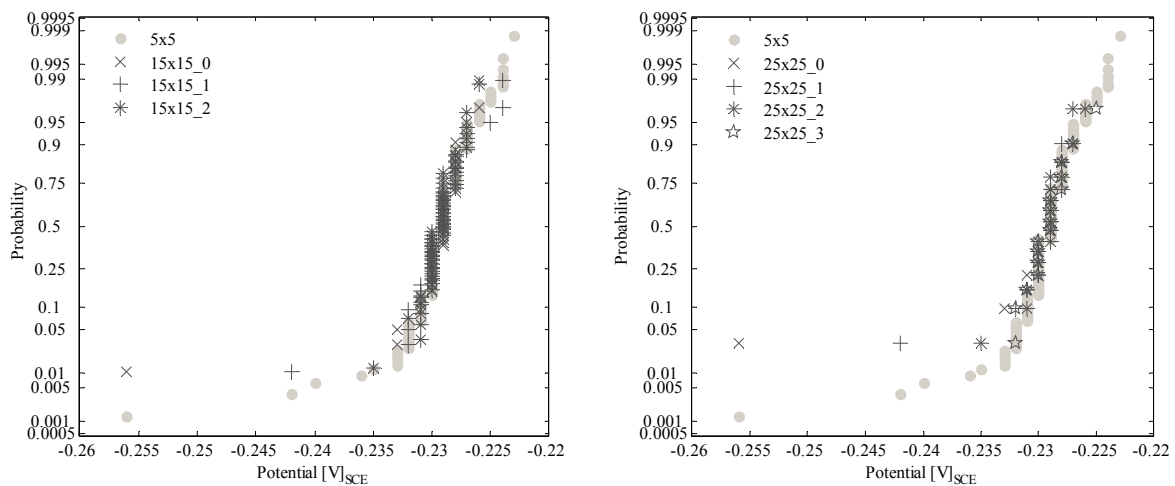


Bild 5-9: Probability Plot mit Variation des Messrasters $15 \times 15 \text{ cm}^2$ (links) $25 \times 25 \text{ cm}^2$ (rechts): R 400 Ωm , d_c 40 mm, A_A 3,1 cm^2 ; ΔE 375 mV, R_a 1,3 Ωm^2 .

Beim Vergleich des Basismessrasters $5 \times 5 \text{ cm}^2$ mit den Messrasterkombinationen von $15 \times 15 \text{ cm}^2$ und $25 \times 25 \text{ cm}^2$ ist erkennbar, dass mit steigendem Messraster nicht die komplette Bandbreite der Potentialwerte abgedeckt wird. Die Detektierbarkeit sinkt mit größer werdendem Messraster. Liegt der Abstand zwischen Anodenbereich und Ort der Bezugs Elektrode ungünstig, kann selbst eine Anodenfläche von 3,1 cm^2 unter den simulierten Randbedingungen mit einem Messraster von $15 \times 15 \text{ cm}^2$ nicht sicher detektiert werden. Der Einfluss des Messrasters ist sehr stark ausgeprägt.

5.5 Zusammenfassung der dominanten Einflussparameter auf die Potentialfeldmessung

Das Ergebnis zur numerischen Parameterstudie über die Einflussfaktoren der Potentialfeldmessung hat gezeigt, dass für die Auswertung der Probability of Detection neben der Defektgröße Anodenfläche verschiedene Faktoren zu berücksichtigen sind.

Das gewählte Messraster, als Teil der Einflussgruppe D, besitzt den größten Einfluss auf die Detektierbarkeit anodischer Bereiche. Vorteilhafterweise ist dies einer der wenigen Parameter, auf die der Ingenieur bei der Messdurchführung Einfluss nehmen kann.

Auf der Seite der Bauteileigenschaften ist der Elektrolytwiderstand, Einflussgruppe A und C, des Betons maßgebend für die Ausbreitung des Potentialfeldes und die Lage der Ruhepotentiale. Dieser Einfluss wird noch ausgeprägter sein, wenn heterogene Feuchtigkeitsverteilungen in einem Bauteil zu erwarten sind, z. B. bei vertikalen Bauteilen, Stützen, etc..

Die elektrochemischen Parameter anodischer und kathodischer Polarisationswiderstand sowie die Treibspannung bleiben für die Auswertung der Probability of Detection unberücksichtigt. Ihr Einfluss auf die Ausbildung der Potentialverteilung ist vernachlässigbar.

Die Betondeckung wird für die Auswertung der Prüfqualität berücksichtigt, da in Kombination mit Messraster und Elektrolytwiderstand der Einfluss auf das Potentialfeld dominant werden könnte.

Wenn neben der Defektgröße noch weitere Einflussfaktoren das Messverfahren bestimmen, so muss die POD dieses Messverfahrens auch in Abhängigkeit dieser Einflussfaktoren betrachtet werden [Pa12]. Daher wird nun die Probability of Detection in Abhängigkeit der folgenden Parameter ausgewertet:

- Einflussgruppe A:
 - Anodenfläche
 - Betondeckung
 - Elektrolytwiderstand des Betons

- Einflussgruppe C:
 - Elektrolytwiderstand des Betons

- Einflussgruppe D:
 - Messraster
 - Messrasterkombination (Abstand Anode - Referenzelektrode)

Bevor nun die eigentlich Auswertung der Probability of Detection-Kurven der Potentialfeldmessung auf numerische Grundlage erfolgt, werden die dominanten Einflussfaktoren final mit Potentialfeldmessung an realen Bauteilen überprüft.

6 Potentialfeldmessung an realen Bauteilen

Zur Kontrolle, ob die numerisch ermittelten dominanten Einflussfaktoren auch die Praxis widerspiegeln, wurden über einen großen Zeitraum hinweg in regelmäßigen Abständen Potentialfelder an 40 Jahre alten, natürlich korrodierenden Stahlbetonbauteilen gemessen und ausgewertet. Die ausgewählten Stahlbetonbauteile stammen aus dem Olympiastadion in München. Ein Nachteil der realen Bauteilmessungen ist, dass viele Einflussfaktoren auf die Potentialfeldmessung nicht variiert werden, z. B. Betondeckung, Anodenfläche ect.. Aus diesem Grund liegt der Fokus bei den Bauteilmessungen auf der Analyse des Einflusses des Elektrolytwiderstands und des Messrasters.

Teilergebnisse zu den Randbalken des Olympiastadions wurden in der Zeitschrift Beton- und Stahlbetonbau „Studie zur Potentialfeldmessung an 40 Jahre alten Stahlbetonbauteilen vom Olympiastadion München - Einfluss des Elektrolytwiderstands und des Messrasters“ [KeGe13] bereits veröffentlicht.

6.1 Randbalken vom Olympiastadion München

Die Randbalkensegmente vom Olympiastadion in München (Bild 6-1) wurden dem Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) im Zuge der Instandsetzungsarbeiten im Sommer 2010 zu Forschungszwecken zur Verfügung gestellt. Die Segmente bildeten den Abschluss der Haupttribüne.

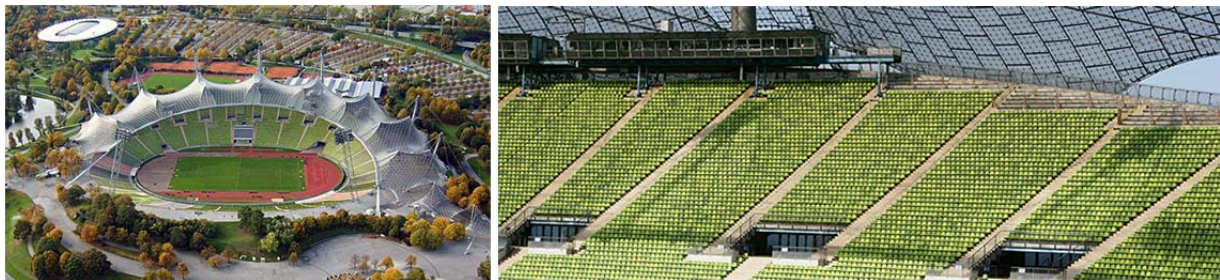


Bild 6-1: Übersicht Olympiastadion München (links; www.noupe.com); Tribüne mit Abschluss der Randbalken (rechts, www.olympiapark.de).

Die Randbalken wurden in den Jahren 1970/71 hergestellt und waren zum Zeitpunkt der Umlagerung vom Stadion auf das cbm-Gelände im Juli 2010 ca. 40 Jahre alt.

Trotz des Daches über dem Olympiastadion konnte bei ungünstigen Wetterbedingungen Schnee auf die Randbalken geweht werden. Das Olympiastadion wurde häufig für Veranstaltungen (Fußballspiele etc.) genutzt. Die Randbalken bildeten den Fußgängeraufgang zu den Tribünen. Aus Gründen der Verkehrssicherheit wurde die Randbalken mit Tausalzen beaufschlagt. Zusätzlich wurde durch die Zuschauer regelmäßig Feuchtigkeit eingetragen. Aus diesem Grund können die Randbalkensegmente der Expositionsklasse XD3 zugeordnet werden.

Die Randbalken wiesen teilweise starke chloridinduzierte Korrosionsschäden mit freiliegender korrodierender Bewehrung und Betonentfestigungen auf.

Die Lage der für die Forschung ausgewählten Randbalken sind Bild 6-2 zu entnehmen. Diese Segmente wiesen im Gegensatz zu ihren Nachbarsegmenten noch keine fortschreitenden Korrosionserscheinungen wie Risse oder Abplatzungen auf.

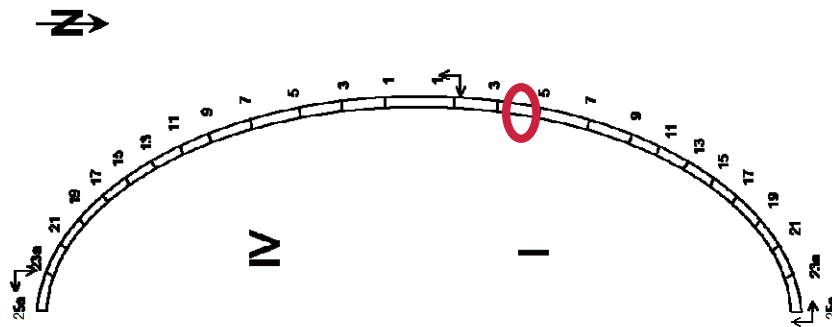


Bild 6-2: Lage der ausgewählten Randbalkensegmente im Olympiastadion.

Die zwei ausgewählten Segmente (Bild 6-3) sind Nachbarsegmente. Ein Randbalken enthält ein Stück der Konsole. Die Bohrlöcher in den Randbalken wurden zum Abhängen der Segmente von der Tribüne auf den Schwerlasttransporter benötigt.



Bild 6-3: Die Randbalkensegmente auf dem cbm-Außenlager.

6.2 Durchführung der Potentialfeldmessung

Die tausalzbeaufschlagten Randbalkenoberseiten wurden in die drei Messflächen A, B und C aufgeteilt. Messfläche B ist die Oberseite der Konsole, die am Randbalkensegment von Messfläche A befestigt ist, Bild 6-4.

Die regelmäßig durchgeführten Potentialfeldmessungen wurden, wenn nicht anders beschrieben, nach den Anweisungen des Merkblattes B3 der DGZfP [DMB314] durchgeführt. Die Messflächen wurden 20 Minuten vor der Messung gleichmäßig befeuchtet. Als Bezugs Elektrode wurde die Kupfer/Kupfersulfat-Elektrode (CSE) in Stabform ausgewählt. Im Gegensatz zu der Radelektrode gewährleistet die Stabelektrode eine Potentialmessung an immer den gleichen Messpunkten. Gemessen wurde mit dem Messgerät CANIN der Firma Proceq. Das Standardmessraster beträgt 10 x 10 cm².

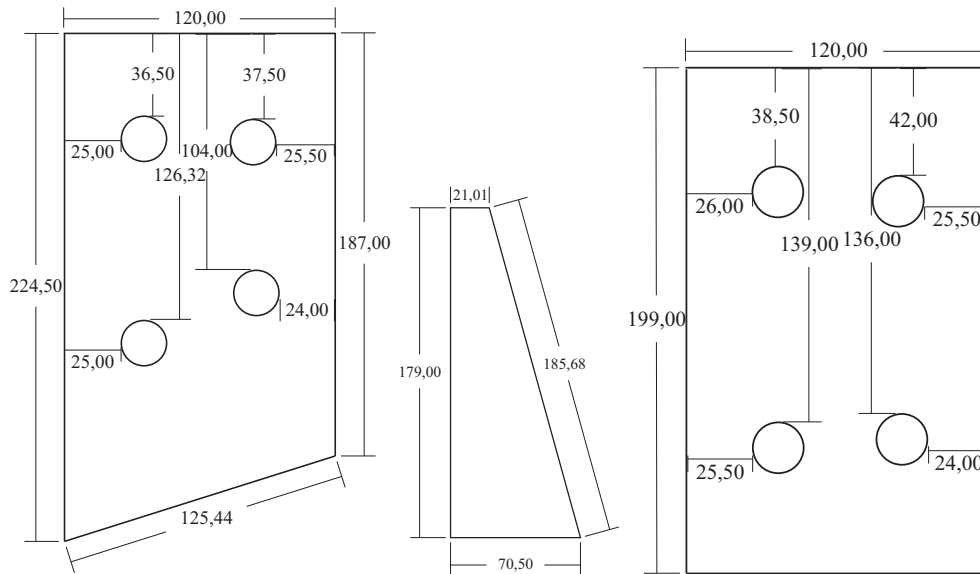


Bild 6-4: Vermessung der Messflächen A (links), B (Mitte), C (rechts).

6.3 Kennwerte der Randbalken

Für die Analyse des Ist-Zustandes der Bauteile wurden verschiedene Kennwerte, wie Zementart, Betondeckung und tiefengestaffelte Chloridgehalte ermittelt.

Zementart:

Die Betonzusammensetzung und die Zementart der Randbalkensegmente sind nicht mehr bekannt. Aus diesem Grund wurde aus den Bohrkernen, die zu Transportzwecken entnommen wurden, Zylinderscheiben zur Ermittlung des Elektrolytwiderstandes zugeschnitten. Mit Hilfe des Elektrolytwiderstandes kann auf die Zementart rückgeschlossen werden.

Aus den Bohrkernen wurden acht Zylinder mit einem Durchmesser $D = 80$ mm und einer mittleren Höhe von $H = 125$ mm gesägt. Die Betonzylinder enthalten keine Bewehrung. Die Zylinder wurden bis zur Massekonstanz bei 20°C wassergesättigt. Anschließend wurde mit der Zwei-Elektroden-Messung der Elektrolytwiderstand bestimmt. Die Zellkonstante k_e beträgt nach der folgenden Gleichung 6-1:

$$k_e = \frac{A}{H} = \frac{D^2 \cdot \pi}{4} = \frac{0,08^2 \cdot \pi}{4} = 0,04 \text{ [m]} \quad (6-1)$$

Der spezifische Elektrolytwiderstand im wassergesättigten Zustand beträgt im Mittel $168 \Omega\text{m}$ mit einer Standardabweichung von $17 \Omega\text{m}$. In Anlehnung an die spezifischen Elektrolytwiderstandsdaten von [PoKe91] kann abgeleitet werden, dass bei Herstellung der Randbalkensegmente ein Portlandzement CEM I verwendet worden ist.

Betondeckung:

Die Betondeckung wurde mit dem Messgerät Ferroskan aufgenommen. Es wurden auf jeder Messfläche mehrere Linienscans gefahren. Die Messflächen A und C sind direkte Nachbarelemente, daher wurde die Betondeckung dieser Flächen zusammen ausgewertet. Die Ergebnisse der Betondeckungsmessung sind in Bild 6-5 als Wahrscheinlichkeits- und relative Häufigkeitsverteilung aufgeführt.

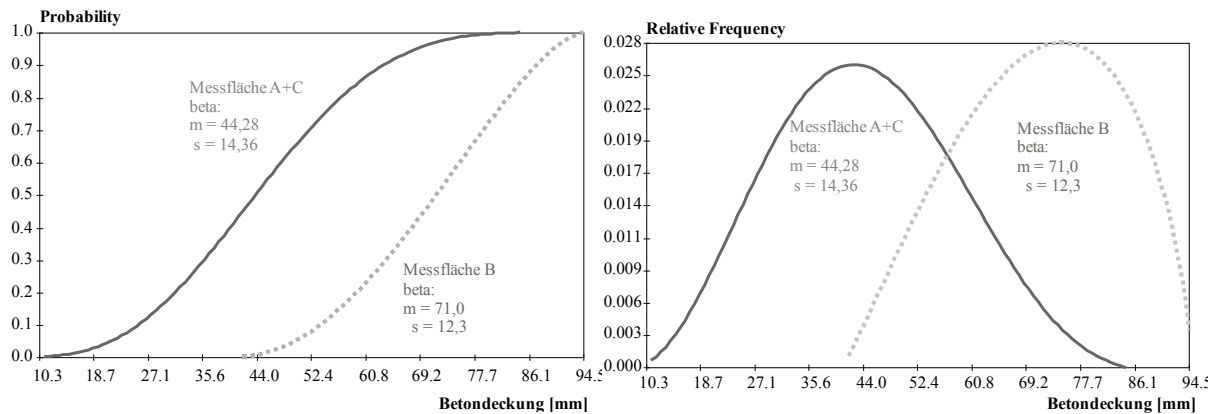


Bild 6-5: Ergebnisse der Betondeckungsmessung der Messflächen A+C und B; Wahrscheinlichkeitsverteilung (links), relative Häufigkeitsverteilung (rechts).

Die Daten der Betondeckungsmessung können mit einer Beta-Verteilung abgebildet werden. Die Messfläche A+C weist einen Mittelwert von $m = 44$ mm und eine Standardabweichung von $s = 14$ mm auf. Für eine XD3 Exposition ist die Betondeckung im Mittel geringer als die nach heutiger Norm DIN 1045-01 [DIN08] empfohlenen 55 mm. Zudem variiert die Betondeckung innerhalb der Segmente sehr stark. Beispielsweise beträgt der Minimalwert der Betondeckung in der Messfläche A+C 10,5 mm und der Maximalwert 84 mm. Eine Erklärung für die starke Streuung der Betondeckung ist nicht bekannt.

Im Gegensatz zu Messfläche A+C ist die Betondeckung der Messfläche B mit einem Mittelwert von $m = 71$ mm und einer Standardabweichung von $s = 12$ mm als sehr hoch zu bewerten. Die Streuung der Messwerte ist geringer als bei der Messfläche A+C.

Chloridgehalt:

Zur Abschätzung der Korrosionswahrscheinlichkeit und der damit einhergehenden Verifizierung der Potentialfeldergebnisse wurden tiefengestaffelt Chloridprofile gezogen. Die Schrittweite der Tiefenstaffelung beträgt 10 mm. Zur Festlegung der Entnahmestellen wurde die Potentialfeldmessung vom 04.11.2010 in einem Äquipotentialplot dargestellt und Entnahmestellen in Bereichen mit hohen als auch niedrigen Potentialen festgelegt (Bild 6-6).

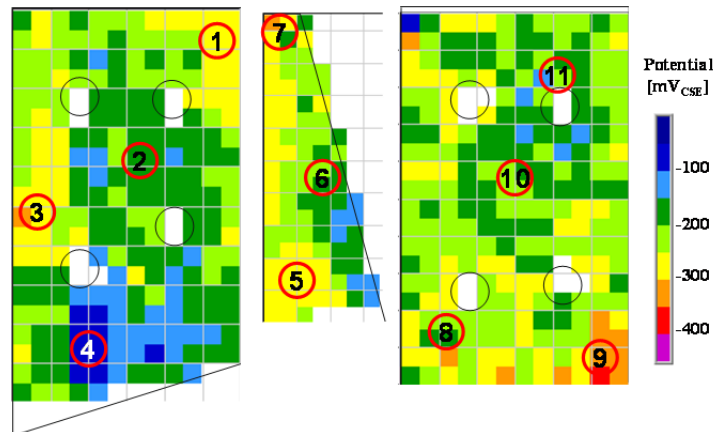


Bild 6-6: Plan der Chloridprofilentnahmestellen der Messflächen A, B, C; Potentialdaten vom 04.11.2010.

Die Chloridprofile (CP) wurden gemäß [Do89] analysiert und sind in den folgenden Diagrammen (Bild 6-7) zusammengefasst dargestellt.

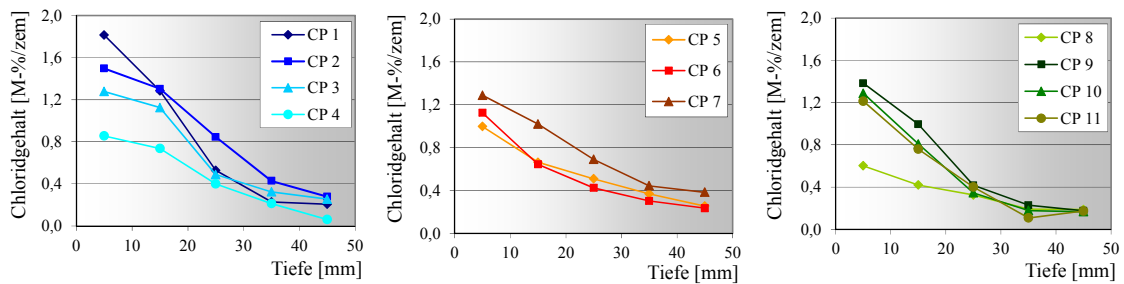


Bild 6-7: Ergebnisse der Chloridprofile (CP) der Randbalkensegmente; Messfläche A CP1-CP4, Messfläche B CP5-CP7, Messfläche C CP8-CP11.

Die Ergebnisse der Chloridprofile aller drei Messflächen sind in einer vergleichbaren Größenordnung. Messfläche A weist in der ersten Tiefenlage von 0 bis 10 mm die höchsten Chloridgehalte von bis zu 1,75 M-%/zem. auf, jedoch fallen die Chloridgehalte bei allen Messflächen in einer Tiefe von 40 bis 50 mm auf Werte unter 0,4 M-%/zem. Für die Messflächen A+C mit einer mittleren Betondeckung von 44 mm sind die Chloridgehalte zunächst als unkritisch zu bewerten, jedoch streut die Betondeckung sehr stark, wodurch durchaus geringe Betondeckungen mit hohen Chloridgehalten zusammen fallen können und der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt erreicht werden kann. In Messfläche B hingegen fallen sehr hohe Betondeckungen mit niedrigen Chloridgehalten in den großen Tiefenlagen zusammen, die Korrosionswahrscheinlichkeit ist als geringer zu betrachten als bei den Messflächen A und C.

6.4 Exposition der Randbalkensegmente

Die Randbalkensegmente werden am cbm frei bewittert gelagert. Die Wetterdaten der Lagerung aus dem Untersuchungszeitraum vom 01. Juli 2010 bis 31. Dezember 2012 mit Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und Niederschlag sind in Bild 6-8 zusammengefasst. Die hier aufgeführten Wetterdaten stammen vom agrarmeteorologischen Messnetz Bayern der bayrischen Landesanstalt für

Landwirtschaft (<http://www.lfl.bayern.de>). Die nächstgelegene Wetterstation „Roggenstein“ in der Gemeinde Emmering im Landkreis Fürstfeldbruck wurde als Messstation für die Randbalken ausgesucht. Die Werte für Temperatur (lila), relative Luftfeuchtigkeit (türkis) und Niederschlag (dunkelblau) entsprechen dem Tagesmittelwert.

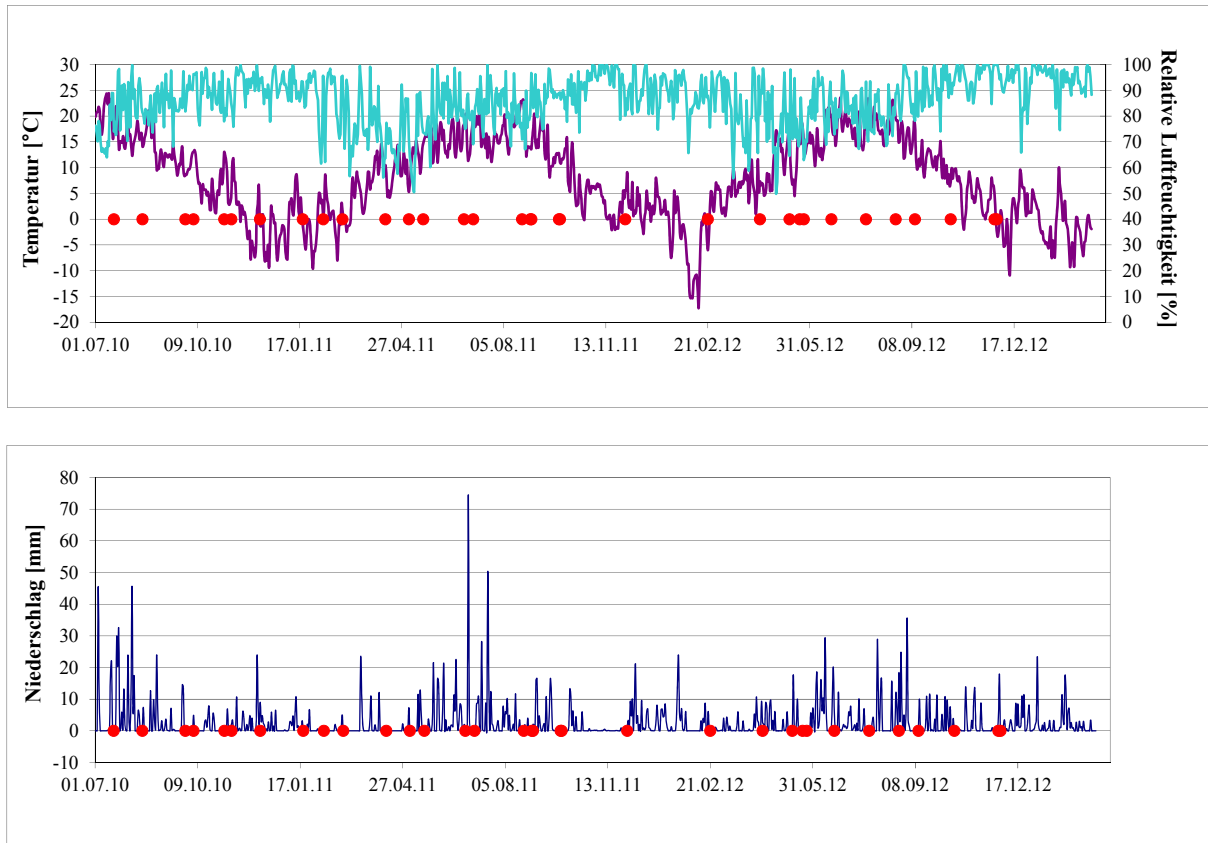


Bild 6-8: Meteorologische Daten und Messzeitpunkte (rote Punkte) aus dem Potentialfeldmesszeitraum 01.07.2010 – 31.12.2012: Temperatur (lila) und Luftfeuchtigkeit (türkis), Niederschlag (dunkelblau).

Die meteorologischen Daten im Betrachtungszeitraum spiegeln anhand der Temperaturverläufe klar die Jahreszeiten wider. Während die Temperaturen in den Sommermonaten unauffällig sind, fällt eine längere Kältephase mit Temperaturen von unter -15°C im Februar 2012 auf. Bei der Betrachtung der Niederschlagsereignisse im Vergleich mit den Temperaturverläufen erscheinen die Sommer 2011 und 2012 als stark regenlastig. Auffällig ist eine lange Trockenzeit von ca. sechs Wochen im Herbst 2011.

Die Potentialfeldmessung an den Randbalken wurde bei jedem Wetterszenario gemessen. Besonders interessant waren dabei Messungen nach starken Regen- und langen Trockenperioden. Da der Elektrolytwiderstand des Betons maßgeblich von der Witterung beeinflusst wird [Os12], ist bei diesen Szenarien ein stärkerer Einfluss des Elektrolytwiderstandes auf die Potentialfeldmessung zu erwarten.

Vor der Analyse des Einflusses des Elektrolytwiderstandes und des Messrasters wird zunächst die Präzision des Messverfahrens untersucht.

6.5 Präzision der Potentialfeldmessung

Die DIN 55 350 Teil 13 [DIN87] definiert die Präzision als qualitative Bezeichnung für das Ausmaß der gegenseitigen Annäherung voneinander unabhängiger Messungen bei mehrfacher Anwendung eines festgelegten Messverfahrens unter vorgegebenen Bedingungen. Je größer das Ausmaß der gegenseitigen Annäherung der voneinander unabhängigen Messungen ist, umso präziser arbeitet das Messverfahren.

Die bei der Gewinnung voneinander unabhängiger Messergebnisse geltenden Bedingungen bestehen in der wiederholten Anwendung des festgelegten Messverfahrens am identischen Objekt durch denselben Beobachter in kurzen Zeitabständen mit derselben Geräteausrüstung am selben Ort.

Die Präzision eines Messverfahrens sagt nichts über die Richtigkeit einer Messung aus. Ein Messverfahren kann präzise aber trotzdem falsch sein [DIN97], siehe Bild 6-9.

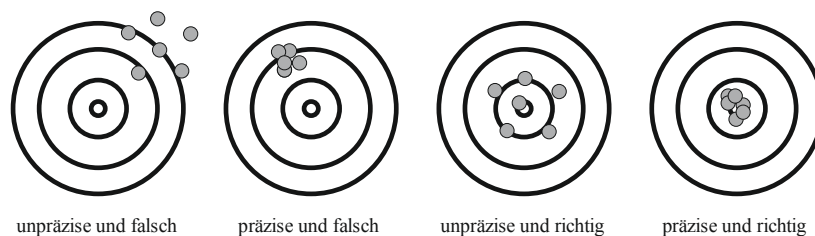


Bild 6-9: Grafische Darstellung von Präzision und Richtigkeit von Messergebnissen.

Um die Bedingungen nach DIN 55 350 zu erfüllen, wird die Präzision der Potentialfeldmessung durch Wiederholung der Messung an den Randbalken unter gleicher Oberflächenvorbehandlung, gleichem Messgerät und gleichem Messenden durchgeführt. In Bild 6-10 sind die Wiederholmessungen an allen drei Messflächen im Probability plot gegenübergestellt. Die Messungen wurden mit einer Zeitdifferenz von zwei Stunden durchgeführt. Messung 1 steht für die erste Messung und Messung 2 für die zweite.

Die Probability plots der jeweiligen Wiederholmessungen liegen grafisch nahezu parallel. Größere Abweichungen ergeben sich an den Grenzen für die sehr negativen und die positiven Werte. Eine Erklärung für die Abweichung könnte die feuchtebedingte und somit zeitliche (aufgrund von Austrocknung, Verdunstung) Abhängigkeit der Potentialfeldmessung oder auch kleine Abweichungen in der Positionierung der Bezugselektrode während der Messung sein.

Eine statistische und daher quantitative Analyse der Präzision der Potentialfeldmessung unter Wiederholbedingungen ist aufgrund der Abhängigkeit der Messung von den Feuchtebedingungen nicht sinnvoll, da sich ein Feuchtezustand bei freier Bewitterung und messtechnisch notwendiger Oberflächen-befeuchtung des Betons nicht konstant einstellen lässt und daher gegen die Anforderungen der DIN 55 350 verstoßen.

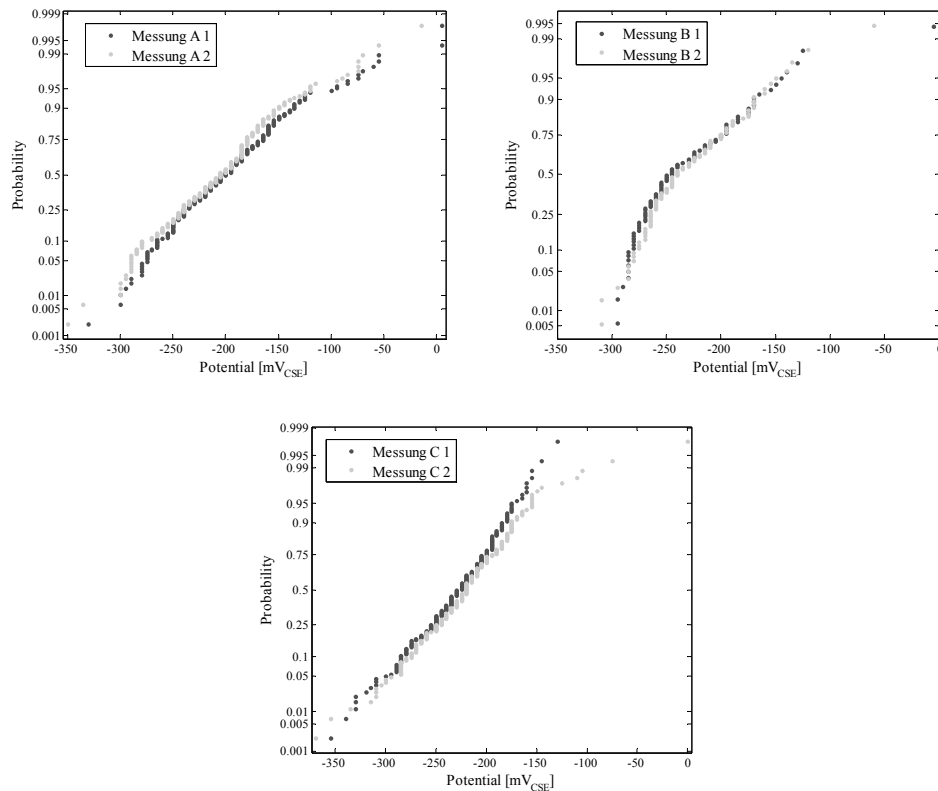


Bild 6-10: Probability plots der Wiederholmessungen der Potentialfelder der Messflächen A, B und C.

Trotz dieser Beeinträchtigungen sind die Wiederholmessungen von Bild 6-10 ein qualitativer Indikator, der auf eine hohe Präzision der Potentialfeldmessung schließen lässt.

6.6 Einfluss des Messrasters

Das Messraster ist ein wichtiger Einflussfaktor auf die Prüfqualität der Potentialfeldmessung. Mit feiner werdendem Messraster steigt die Wahrscheinlichkeit, auch kleine korrodierende Bereiche zu detektieren.

Zum Vergleich unterschiedlicher Messraster wurde auf den Messflächen A und C eine Potentialfeldmessung mit dem Messraster $5 \times 5 \text{ cm}^2$ aufgenommen. Diese Messung ist die Basismessung. Aus dieser Messung wurden alle theoretisch möglichen Messraster ($10 \times 10 \text{ cm}^2$, $15 \times 15 \text{ cm}^2$, $20 \times 20 \text{ cm}^2$) und Messrasterkombinationen herausgefiltert und im Anschluss die Potentialwerte im Probability plot miteinander verglichen. Je nachdem, an welchem Punkt die Potentialfeldmessung gestartet wird, ergeben sich für das Messraster $10 \times 10 \text{ cm}^2$ zwei Messrasterkombinationen, für $15 \times 15 \text{ cm}^2$ drei Messrasterkombinationen und für $20 \times 20 \text{ cm}^2$ vier Messrasterkombinationen.

In Bild 6-11 sind die Äquipotentialplots der verschiedenen Messraster und Messrasterkombinationen der Messfläche C dargestellt. Die entsprechenden Äquipotentialplots der Messfläche A sind im Anhang zu finden.

Im Äquipotentialplot des Basismessrasters $5 \times 5 \text{ cm}^2$ sind niedrige Potentiale in Verbindung mit einem steilen Potentialgradienten an der linken Ecke klar erkennbar. Mit größer werdendem Messraster fällt diese Stelle bei ungünstiger Messrasterkombination ($15 \times 15_1 \text{ cm}^2$, $20 \times 20_1 \text{ cm}^2$ und $20 \times 20_2 \text{ cm}^2$) nur schwach bzw. gar nicht mehr auf. Liegt hingegen die Bezugselektrode nah an der vermuteten Anodenfläche, ist diese auch bei größeren Messrastern im Äquipotentialplot detektierbar.

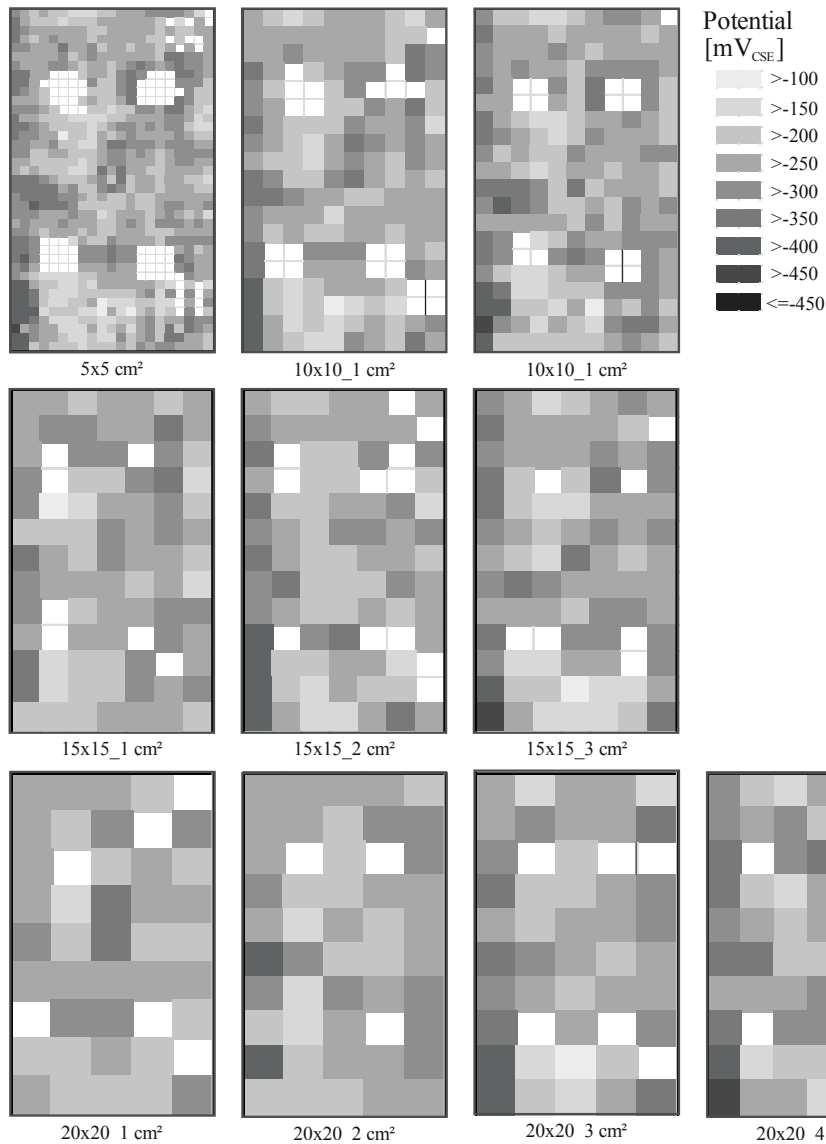


Bild 6-11: Äquipotentialplots der Messfläche C mit unterschiedlichem Messraster und Messrasterkombinationen.

In Bild 6-12 ist die Messrasterauswertung der Messfläche A und in Bild 6-13 die Messrasterauswertung der Messfläche C abgebildet. In den nachfolgenden Diagrammen ist die Potentialfeldmessung mit dem Basismessraster $5 \times 5 \text{ cm}^2$ zum übersichtlichen Vergleich dunkelgrau hinterlegt.

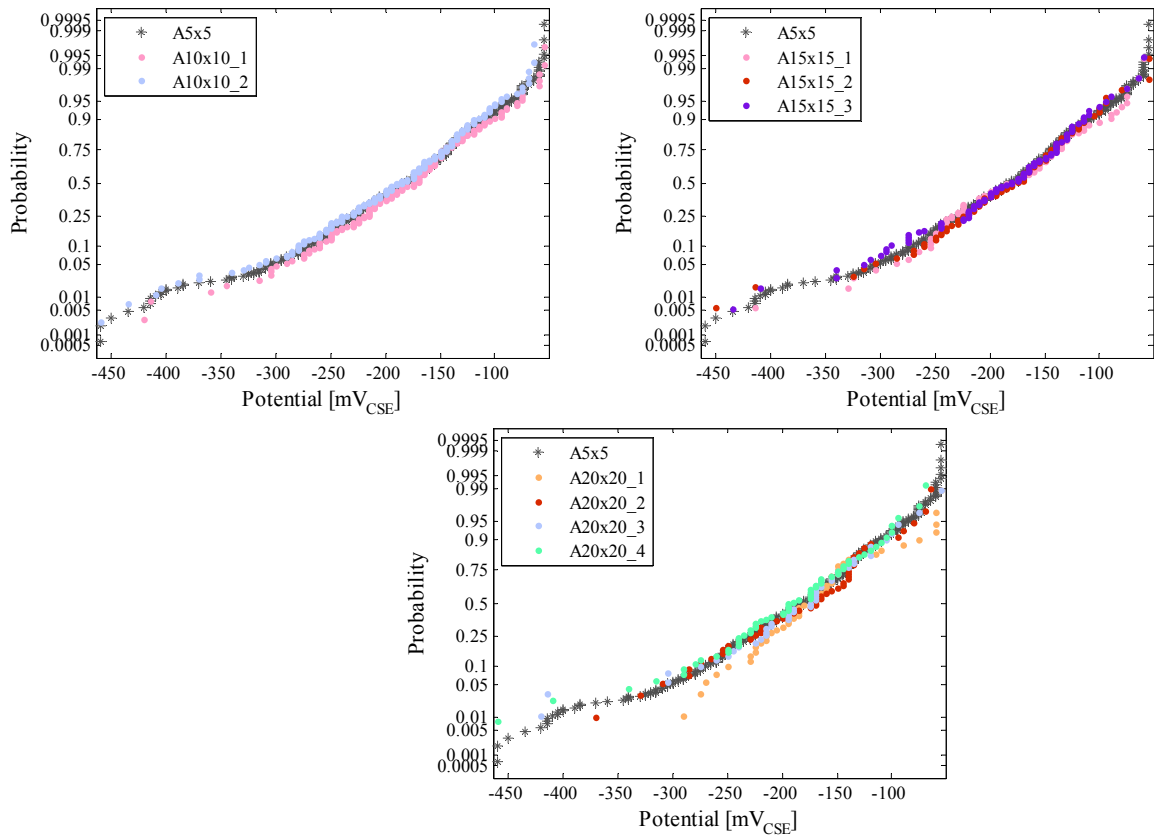


Bild 6-12: Probability plot der Messfläche A aufgeteilt nach Messraster und Messrasterkombination.

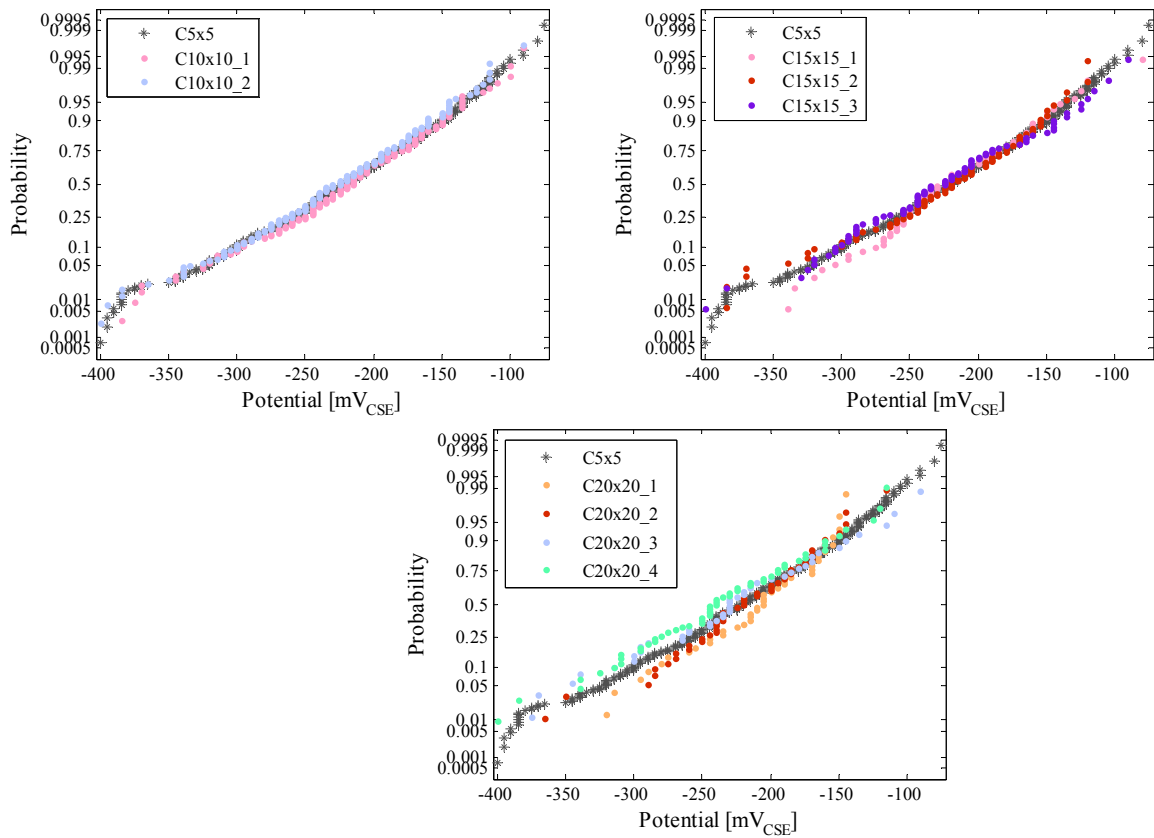


Bild 6-13: Probability plot der Messfläche C aufgeteilt nach Messraster und Messrasterkombination.

Bei der Gegenüberstellung des Basismessrasters $5 \times 5 \text{ cm}^2$ mit den Messrasterkombinationen des Messrasters $10 \times 10 \text{ cm}^2$ ergibt sich bei beiden Messflächen eine große Übereinstimmung. Es wird mit dem Messraster $10 \times 10 \text{ cm}^2$ der gesamte Potentialwertebereich abgedeckt wie beim Messraster $5 \times 5 \text{ cm}^2$.

Der Vergleich der Messraster $15 \times 15 \text{ cm}^2$ mit dem Basismessraster $5 \times 5 \text{ cm}^2$ liefert eine differenzierteres Bild. Innerhalb der Messflächen A werden im mittleren Potentialmessbereich alle Werte abgedeckt, während die negativen Potentiale, die auf eine mögliche Anodenfläche hindeuten, nur vereinzelt aufgenommen werden. Die Messung mit dem Messraster $15 \times 15 \text{ cm}^2$ der Messfläche C ist nur bei den Kombinationen $15 \times 15_2 \text{ cm}^2$ und $15 \times 15_3 \text{ cm}^2$ mit dem Messraster $5 \times 5 \text{ cm}^2$ vergleichbar, wohingegen mit der Messrasterkombination $15 \times 15_1 \text{ cm}^2$ die negativeren Potentialwerte nicht erfasst werden.

Wird nun die Messrasterkombination $20 \times 20 \text{ cm}^2$ der Messfläche A analysiert, so entspricht die Kombination $20 \times 20_1 \text{ cm}^2$ der ungünstigsten Anordnung zwischen dem Ort der negativsten Potentiale und dem Ort der Messung. Das negativste detektierte Potential hat nur einen Wert von ca. $-300 \text{ mV}_{\text{CSE}}$, während das negativste Potential der Basismessung negativer als $-450 \text{ mV}_{\text{CSE}}$ ist. Lediglich die Messrasterkombinationen $20 \times 20_3 \text{ cm}^2$ und $20 \times 20_4 \text{ cm}^2$ decken den gesamten Potentialbereich ab. Die Auswertung der Messfläche C liefert ein vergleichbares Bild. Die Potentialfeldmessungen mit den Kombinationen $20 \times 20_2 \text{ cm}^2$, $20 \times 20_3 \text{ cm}^2$ und $20 \times 20_4 \text{ cm}^2$ decken weitestgehend den gesamten Potentialwertebereich ab. Die Messung $20 \times 20_1 \text{ cm}^2$ weicht stark von der Basismessung $5 \times 5 \text{ cm}^2$ ab.

Die Ergebnisse zur Variation des Messrasters bestätigen die Ergebnisse aus der numerischen Parameterstudie zur Potentialfeldmessung. Das Messraster ist ein dominanter Einflussfaktor.

6.7 Einfluss der Oberflächenvorbehandlung

Unter dem Einfluss der Oberflächenvorbehandlung wird die Befeuchtung der Oberfläche vor der Messdurchführung verstanden. Die Oberflächenvorbehandlung soll einen sicheren elektrolytischen Kontakt der Bezugselektrode mit der Betonoberfläche gewährleisten und Feuchteunterschiede an der Betonoberfläche egalisieren.

Zusätzlich wird durch die Oberflächenvorbehandlung der Elektrolytwiderstand in den oberflächennahen Bereichen herabgesenkt. Um den Einfluss der Oberflächenvorbehandlung qualitativ zu untersuchen, wurden folgende Messvariationen durchgeführt. Für die erste Messung, die als „Messung trocken“ bezeichnet wird, wurde nur der Schwamm an der Bezugselektrode etwas angefeuchtet. Die zweite Messung wurde nach dem Merkblatt B3 durchgeführt und für die dritte Messung, die „Messung nass“, wurde die Betonoberfläche mindestens zwei Stunden vor der Messung regelmäßig gewässert.

Die Messwertaufnahme bei trockenen Oberflächen war sehr schwierig, da es lange dauerte, bis sich ein stabiles Potential eingestellt hat. Bei der Potentialmessung mit einer Punkt- bzw. Stabelektrode ist

die Messwertaufnahme in diesem Fall noch kontrollierbar. Wird jedoch eine Radelektrode verwendet, ist die Kontrolle der Aufnahme stabiler Potentiale schwieriger.

In den nachfolgenden Probability plots (Bild 6-14) sind die Auswertung der drei Messflächen A, B und C mit Variation der Oberflächenbefeuchtung dargestellt.

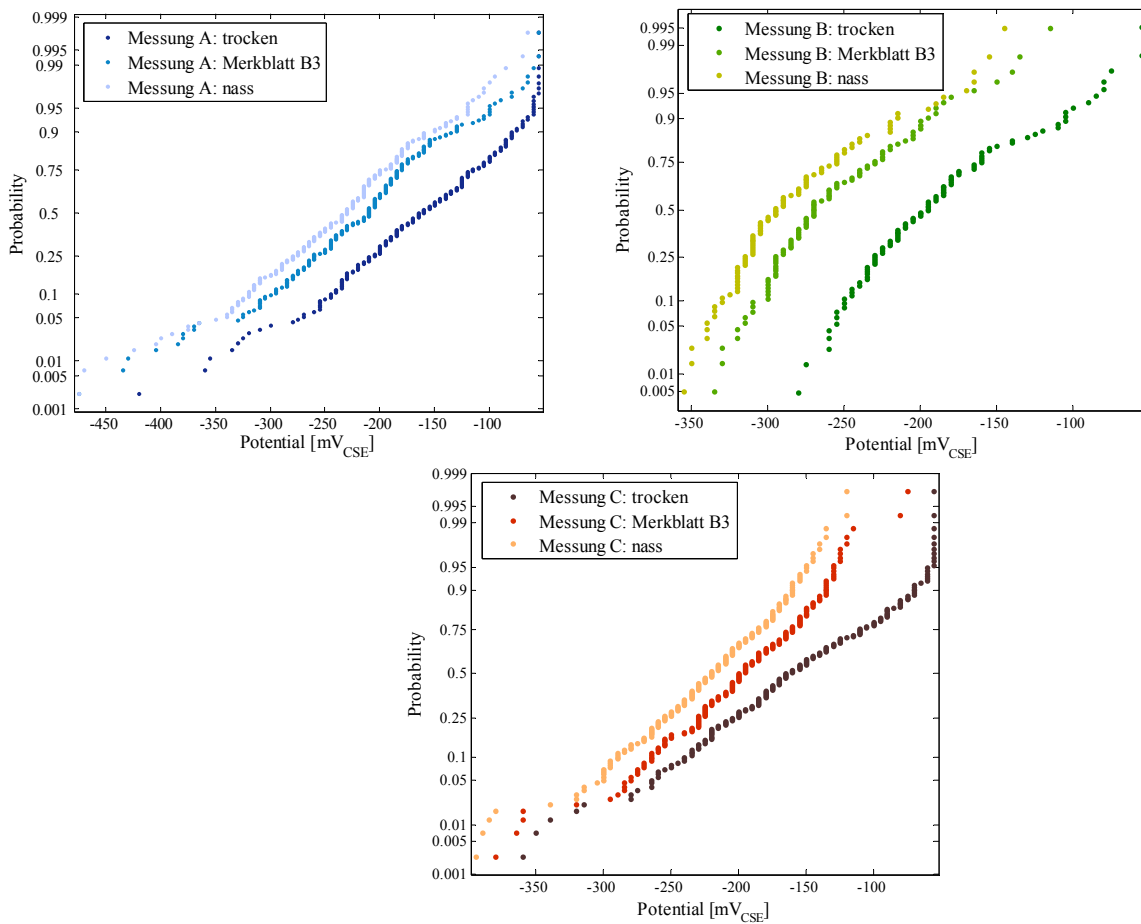


Bild 6-14: Probability plots der Potentialmessung von der Messfläche A (06.07.2011), Messfläche B (01.09.2011) und Messfläche C (31.08.2011) nach unterschiedlicher Oberflächenvorbehandlung.

Bei allen drei Messflächen verschieben sich die Probability plots der Potentialfeldmessungen in negative Richtung mit stärker werdender Oberflächenbefeuchtung und somit sinkendem Elektrolytwiderstand. Von der Messung „trocken“ bis zur Messung „nass“ liegt eine Potentialverschiebung von bis zu 100 mV. Die Verschiebung im Probability plot ist fast parallel, wobei die Verschiebung von Messung „trocken“ zu Messung nach B3 ausgeprägter ist als die Verschiebung von Messung nach B3 zu Messung „nass“.

Weitere Probability plots mit unterschiedlicher Befeuchtung der Betonoberfläche sind im Anhang aufgeführt. Die Verschiebung im Probability plot ist unterschiedlich stark ausgeprägt, d. h. die Parallelverschiebung im Probability plot wird geringer, je stärker vorher Regenereignisse stattfanden. Ist der Ausgangselektrolytwiderstand des Betons gering, so fällt auch die Verschiebung im Probability plot kleiner aus, siehe Bild 6-15.

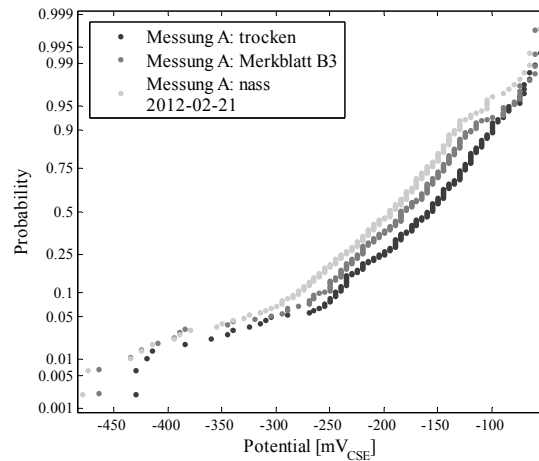


Bild 6-15: Probability plot der Potentialmessung von der Messfläche A (21.02.2012), nach unterschiedlicher Oberflächenvorbehandlung „trocken“, nach Merkblatt B3 und „nass“.

Die Auswertung der Probability plots zeigt deutlich, dass ein absolutes Grenzpotential zur Unterscheidung von korrodierenden und nicht-korrodierenden Bereichen nicht zweckmäßig ist.

Diese Ergebnisse stimmen mit den Potentialverteilungen unter verschiedenen Elektrolytwiderständen im elektrolytischen Trog überein. Die Absolutverschiebung ist bei den Ergebnissen im elektrolytischen Trog mit bis zu 200 mV größer, aber im elektrolytischen Trog wurde auch eine größere Bandbreite an Elektrolytwiderständen untersucht, als durch Vornässen bei den Randbalken zu erwarten ist. Je größer die Änderung des Elektrolytwiderstandes ist, desto größer ist die Absolutverschiebung der Potentialwerte.

Neben der Oberflächenvorbehandlung hat auch die Exposition Einfluss auf den Elektrolytwiderstand des Betons und auf die daraus resultierende Potentialverteilung.

6.8 Einfluss der Witterungsbedingungen Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Niederschlag

In den nachfolgenden Diagrammen (Bild 6-16 bis Bild 6-18) sind die Probability plots aller Potentialmessung im Betrachtungszeitraum nach den einzelnen Messflächen getrennt zusammengefasst. Bei der Darstellung geht es um die Gesamtheit der Potentialmessungen, daher ist es aufgrund der Datenmengen nicht möglich, einzelne Messungen zu identifizieren.

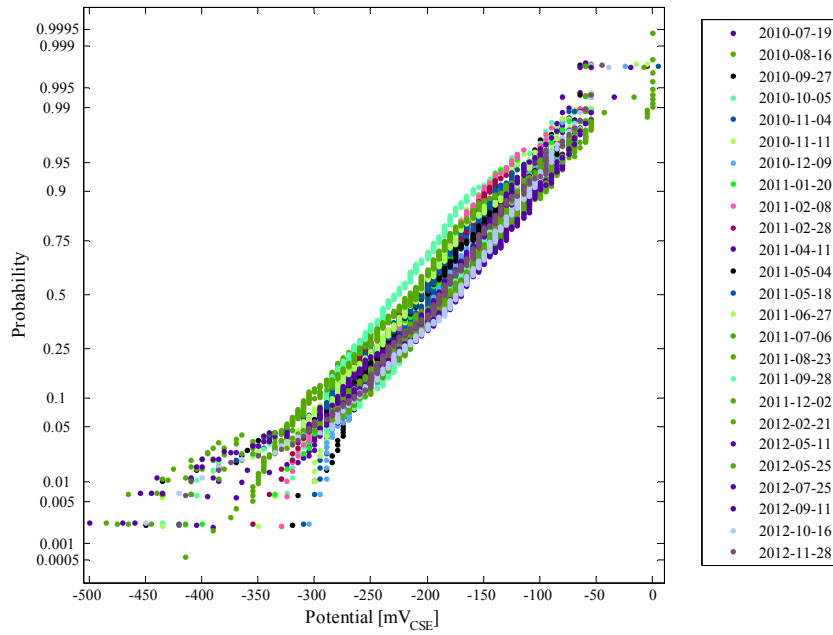


Bild 6-16: Probability plot aller Potentialfeldmessungen nach dem Merkblatt B3 der Messfläche A im Messzeitraum.

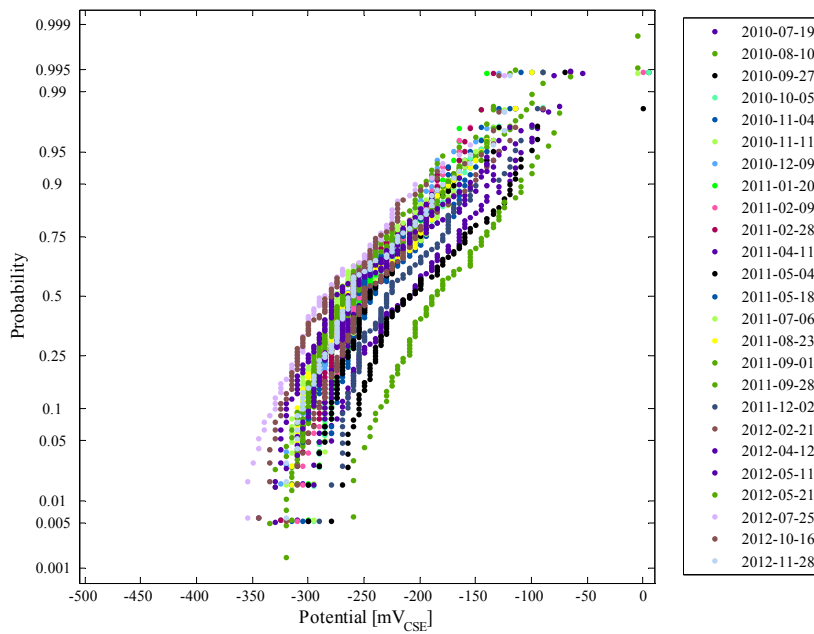


Bild 6-17: Probability plot aller Potentialfeldmessungen nach dem Merkblatt B3 der Messfläche B im Messzeitraum.

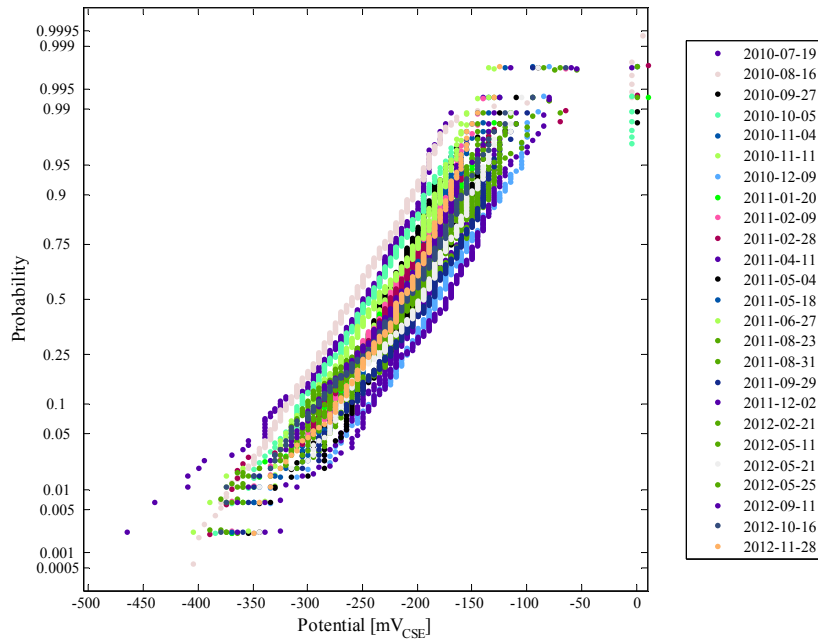


Bild 6-18: Probability plot aller Potentialfeldmessungen nach dem Merkblatt B3 der Messfläche C im Messzeitraum.

Die Messungen liegen bei allen Messflächen in einer Grundgesamtheit. Die vielen Messungen über mehr als 30 Monate hinweg zeigen eine gute Reproduzierbarkeit im qualitativen Verlauf des Probability plots und der Gradienten während die Absolutwerte der Potentiale um mehrere Millivolt voneinander abweichen. Diese Ergebnisse spiegeln die Ergebnisse bei unterschiedlicher Oberflächenvorbereitung wider.

Bei der Messfläche A liegt die Grundgesamtheit in einem Streuband von ca. 50 mV, nur bei den negativen Werten streuen die Potentiale über einen Bereich von 200 mV. Die Potentialwerte bei der Messfläche B befinden sich in einem größeren Streuband von ca. 150 mV, doch scheinen sich die einzelnen Messungen lediglich in einer Parallelverschiebung zu unterscheiden. Eine Streubreite innerhalb der negativsten Potentiale wie in Messfläche A liegt nicht vor. Vergleichbar zur Messfläche B lassen sich die Potentialwerte von Messfläche C beschreiben. Das Potentialstreuband umfasst ca. 100 mV und die negativen Werte streuen bis auf eine Ausnahme innerhalb des Streubands.

Messfläche B streut im Vergleich zu den anderen Messflächen A und C am stärksten. Eine mögliche Begründung ist, dass Messfläche B eine weitaus größere Betondeckung als die anderen Flächen aufweist, wodurch es länger dauert, bis sich ein stabiler Feuchtigkeitszustand bzw. Elektrolytwiderstand einstellt oder Feuchtgradienten einen stärkeren Einfluss ausüben.

Aufgrund der großen Datenmenge ist es nicht möglich, die einzelnen Messungen differenziert unter Berücksichtigung der meteorologischen Daten auszuwerten. Daher werden im folgenden Abschnitt die Daten der Messfläche C getrennt nach den Jahren 2010, 2011 und 2012 aufgeführt. Die weiteren nach Messjahren getrennt aufgeführten Potentialmessungen der Messflächen A und B sind im Anhang zu finden.

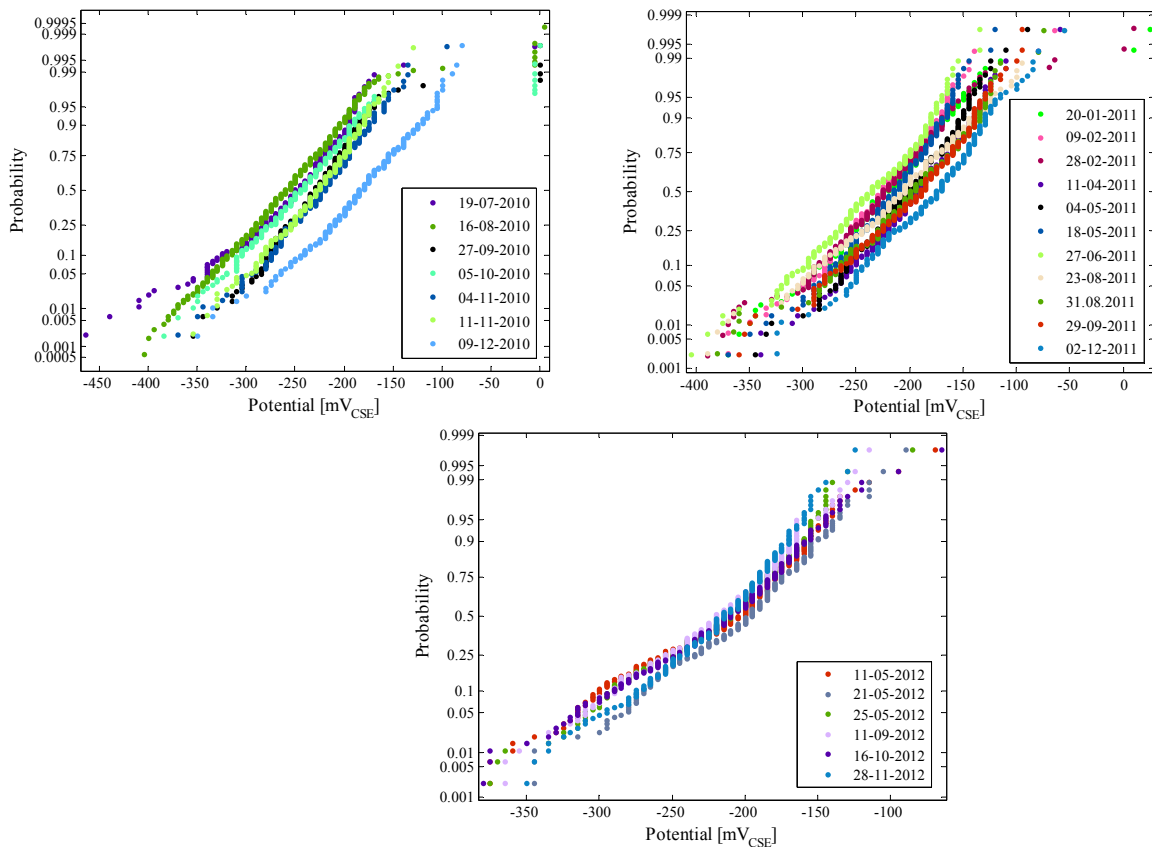


Bild 6-19: Probability plot aller Potentialfeldmessungen nach dem Merkblatt B3 der Messfläche C im Jahr 2010 (oben links), 2011 (oben rechts) 2012 (unten).

Die Werte der Potentialmessungen aus dem Jahr 2012 streuen am wenigsten. Jedoch steht für das Jahr 2012 die geringste Anzahl an Messungen zur Verfügung. Innerhalb der Messungen im Jahr 2010 weicht die Messung vom 09.12.2010 stark von den restlichen Messungen ab. An diesem Tag lag die Tagesdurchschnittstemperatur unter dem Nullpunkt. Da der Elektrolytwiderstand eine hohe Temperaturabhängigkeit aufweist, ist davon auszugehen, dass der Widerstand an diesem Tag sehr hoch ist, was zur Verschiebung der Potentialwerte in positive Richtung führt, wie die Messungen mit unterschiedlicher Oberflächenbefeuchtung ebenfalls gezeigt haben.

Im Messjahr 2011 wurde die größte Anzahl an Potentialfeldmessungen durchgeführt. Daher wird im folgenden Abschnitt die Messungen aus diesem Jahr nach Temperatur (Bild 6-20) und Niederschlagsereignissen (Bild 6-21) getrennt analysiert.

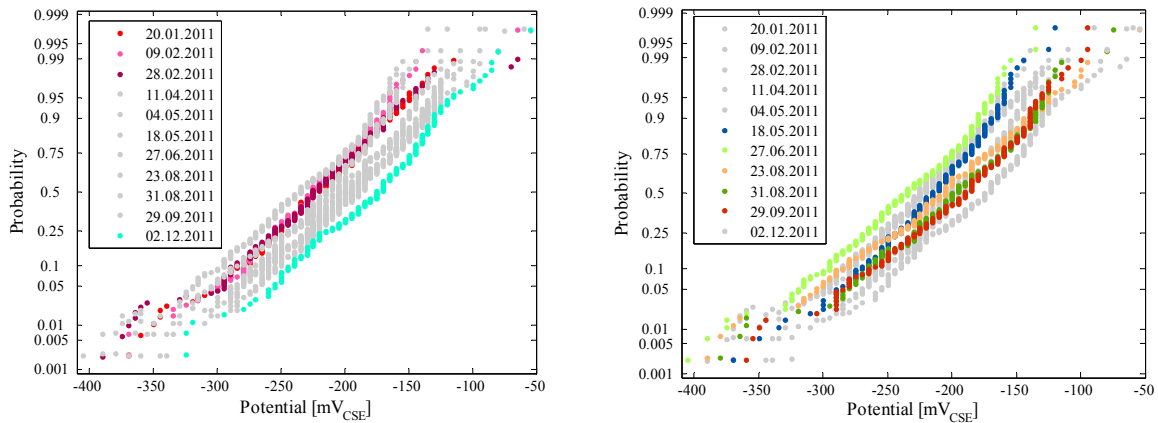


Bild 6-20: Probability plot aller Potentialfeldmessungen nach dem Merkblatt B3 der Messfläche C im Jahr 2011; Messungen bei winterlichen Temperaturen (links), Messungen bei sommerlichen Temperaturen (rechts) [KeGe12].

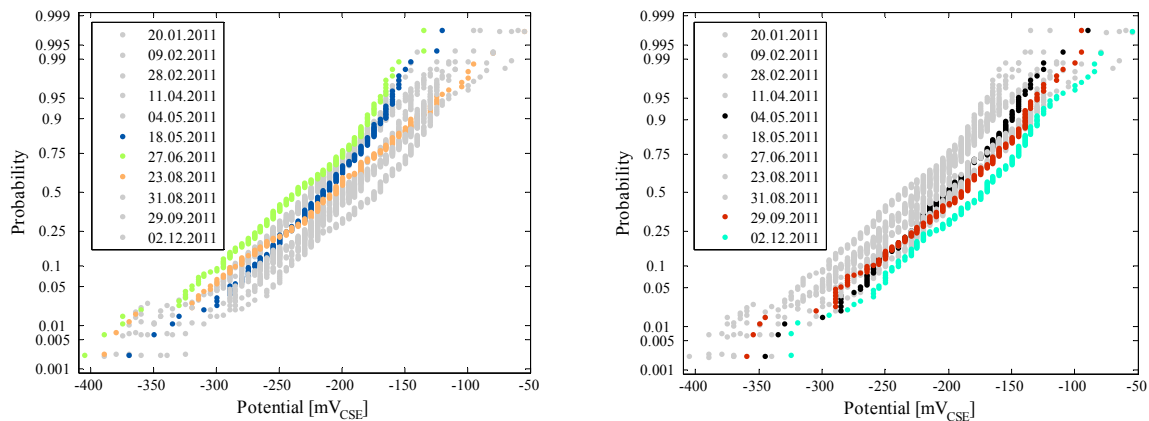


Bild 6-21: Probability plot aller Potentialfeldmessungen nach dem Merkblatt B3 der Messfläche C im Jahr 2011; Messungen nach Regenereignissen (links); Messungen nach längeren Trockenphasen (rechts) [KeGe12].

Die Potentialmessung mit den positivsten Potentialwerten ist die Messung vom 2. Dezember 2011. Vor dieser Messung fielen Temperaturen im Mittel um 7°C mit einer langen Trockenphase von insgesamt 6 Wochen zusammen. Diese Witterungskombination führt zu hohen Elektrolytwiderständen, die wiederum eine Verschiebung der Potentialwerte in positive Richtung verursachen. Am 27. 2011 wurde die Messung mit den niedrigsten Potentialwerten aufgenommen. Dieser Tag weist eine Tagesdurchschnittstemperatur von 18°C auf. Zuvor kam es zu einigen Regenereignissen. Daraus kann ein niedriger Elektrolytwiderstand abgeleitet werden, der die Potentialwerte in negative Richtung verschoben hat.

Generell zeigen die Diagramme, dass der Einfluss der Niederschlagsereignisse größer ist als der Einfluss der Temperatur, wenn die Messfläche freibewittert gelagert ist.

6.9 Zusammenfassung der Messungen an den realen Bauteilen

Die Messungen an den realen Bauteilen bestätigen die Ergebnisse aus der numerischen Parameterstudie. Das Messraster und der Elektrolytwiderstand des Betons gehören zu den dominanten Einflussfaktoren auf die Potentialfeldmessung. Zudem weist die Potentialfeldmessung eine hohe Wiederholgenauigkeit auf, solange die äußeren Bedingungen (z. B. Feuchtzustand – Elektrolytwiderstand) nicht wesentlich verändert werden.

In der Literatur ist keine vergleichbare Datenmenge und Auswertung zur Potentialfeldmessung zu finden, die zu Vergleichszwecken hinzugezogen werden könnte.

7 Auswertung der Prüfqualität der Potentialfeldmessung mittels numerischer Methoden

In diesem Kapitel wird der wesentliche Schritt zur Bestimmung der Prüfqualität durchgeführt. In Abhängigkeit der in den vorangegangenen Kapiteln erarbeiteten Einflussfaktoren werden die Probability of Detection der Potentialfeldmessung aufgestellt.

7.1 Konzept

Grundsätzlich stehen für die Erstellung der Probability of Detection-Kurven zwei Modelle zur Verfügung: das Hit-Miss-Modell und das a vs. \hat{a} -Modell (Abschnitt 2.2). Welches Modell eingesetzt werden kann, hängt u. a. von der Art der Inspektion ab. Inspektionen können in zwei Kategorien eingeteilt werden: Inspektionen, die nur binäre Ergebnisse liefern – Korrosion hit oder miss, und Inspektionen, die ebenso Informationen zur gemessenen Größe (\hat{a} - Potential) in Abhängigkeit der Defektgröße (a - Anodenfläche) liefern – a vs. \hat{a} . Für die Analyse der Probability of Detection der Potentialfeldmessung sind grundsätzlich beide Ansätze geeignet.

Die Prüfqualität der Potentialfeldmessung wird in folgender Weise erarbeitet. Zunächst werden die numerisch berechneten Potentialfelder aus dem Modell einer Stahlbetonplatte aus Abschnitt 5 aufgearbeitet. Die Modelloberfläche wird je nach gewähltem Messraster in Elemente aufgeteilt. Die ermittelte („gemessene“) Potentialverteilung wird mit Hilfe der kumulierten Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung durch Definition eines Grenzpotentials in aktive und passive Potentiale unterteilt. Diese Auswertemethode ist zulässig, da während der numerischen Berechnung konstante, stationäre Bedingungen vorliegen. Zusätzlich ist aufgrund der gewählten Eingabeparameter bekannt, dass sich nur eine Anode und eine Kathode, also zwei Grundgesamtheiten, im System befinden. Nach der Auswertung wird jedem Element das Indikationsergebnis „Korrosion gemessen“ oder „Korrosion nicht gemessen“ zugeordnet, siehe Bild 7-1.

Für die Beschreibung des Zustandes wird ebenfalls ein Feld mit einer gleichen Anzahl an Elementen erstellt. Je nach Anordnung der Anoden wird dem Element oberhalb der Anode der Zustand „Korrosion“ zugewiesen. Die restlichen Elemente werden mit der Information „keine Korrosion“ belegt.

Der Vergleich zwischen dem Zustand „Korrosion“ oder „keine Korrosion“ und der Auswertung aus der Messung „Korrosion gemessen“ oder „Korrosion nicht gemessen“ liefert den binären Datensatz für die Auswertung der POD nach dem Hit-Miss Modell. Werden nun die gemessenen Potentiale je Element mit der Anodenfläche verknüpft, so stehen die Daten für eine a vs. \hat{a} -Analyse zur Verfügung.

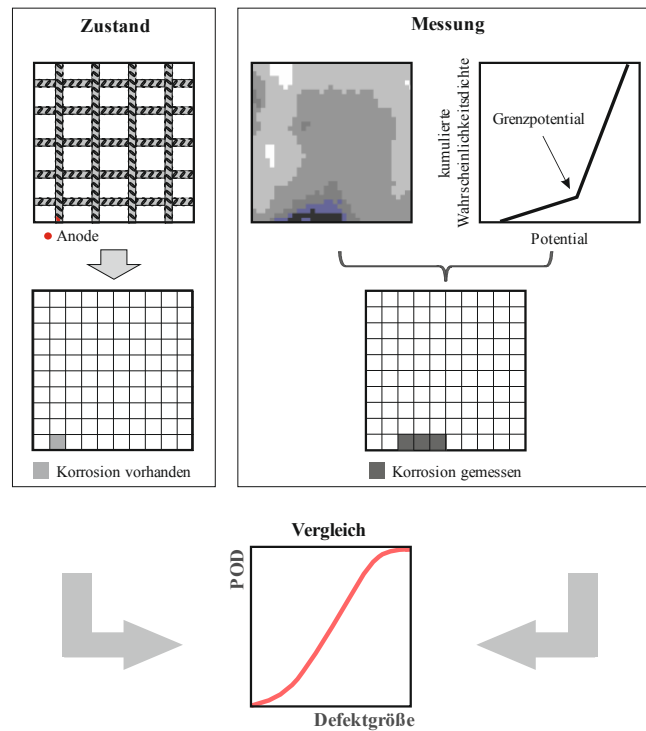


Bild 7-1: Vorgehensweise zur Erstellung einer POD-Kurve.

Dieses Vorgehen wird mit Variation der Defektgröße (Anodenfläche) und mit Variation der dominanten Einflussfaktoren (Elektrolytwiderstand, Messraster) so oft wiederholt, bis ein statistisch ausreichender Datensatz für die Ermittlung der POD-Kurven zur Verfügung steht.

Das für die Auswertung der POD verwendete numerische Modell einer Platte und auch die gewählten Eingabeparametern entsprechen denen aus dem Kapitel 5.

7.2 Grenzkriterium für die POD der Potentialfeldmessung

Generell gilt bei der Auswertung der POD, dass mit steigender sicherheitstechnischer Relevanz des Prüfprozesses die POD auf Basis von realen und realistischen Defekten basieren soll [Ka13]. Bei der Korrosion in Beton handelt es sich zunächst um ein dauerhaftigkeitsrelevantes Problem und erst im sehr weit fortgeschrittenen Stadium der Korrosion um ein standsicherheitsrelevantes Problem. Ist das Stadium einer standsicherheitsgefährdeten Korrosion erreicht, in dies meist durch korrosionsinduzierte Risse und Betonabplatzungen, also Strukturschäden im Beton, visuell erkennbar und die Messung eines Potentialfeldes wird obsolet.

Die Potentialfeldmessung zeigt aber lediglich an, an welcher Stelle Korrosionsprozesse stattfinden und nicht wie weit der Korrosionsprozess, also der Querschnittsverlust der Bewehrung, vorangeschritten ist. Daher müssen die Messergebnisse aus der Potentialfeldmessung mit weiteren Bauwerksuntersuchungen, wie Chloridprofilen, Betondeckung, Bewehrungs Sondierung, etc. kombiniert und verifiziert werden. Die POD der Potentialfeldmessung ist somit nicht direkt mit einer standsicherheitsrelevanten Fragestellung verbunden. Aus diesen Gründen ist eine POD der

Potentialfeldmessung, die auf numerischer Basis gewonnen wird, zulässig. Die Unsicherheiten des POD-Modells, die sich aus diesem Prozess ergeben, sind bei Interpretation und Weiterverarbeitung von POD-Daten zu berücksichtigen. Dies gilt besonders für die Verwendung der POD zum Update der Lebensdauerprognose von Stahlbetonbauteilen. Im Handbook zur POD [MIL09] wird darauf verwiesen, dass numerisch generierte POD-Kurven größere Konfidenzintervalle als 95 % und ein größeres Grenzkriterium als $a_{90/95}$ beinhalten sollten.

Das Konfidenzintervall von 95 % für POD-Kurven hat sich aus zwei Gründen etabliert. Zum einen wird das 95% Konfidenzintervall von Statistikern häufig gewählt und ist somit tabelliert und zum anderen durch die 29 vs. 29 POD-Methode. Sind 29 gleich große Defekte in einem Bauteil enthalten und werden alle 29 Defekte gefunden, wird basierend auf der F-Statistik genau das Konfidenzintervall von 95% erreicht [MIL98].

Das Grenzkriterium basiert auf folgenden Überlegungen. Die Lebensspanne eines Bauteils steigt, je eher ein Defekt gefunden und instandgesetzt wird, sobald er einen kritischen Wert erreicht hat. Wird dieser Defekt nicht gefunden, und vergrößert sich mit der Zeit, so muss er gefunden werden, bevor das Bauteil ausfällt. Die Festlegung des Grenzkriteriums ist nun die Optimierung zwischen den gewählten Prüfintervallen, der strukturellen Integrität des Bauteils (schadenstolerante Bemessung) und der Fähigkeit des Prüfsystems den kritischen Defekt innerhalb eines Konfidenzintervalls zu detektieren.

Dieses Grenzkriterium ist aber für ein dauerhaftigkeitsrelevantes Problem, wie der Korrosion, als ungeeignet zu betrachten. Die folgenden POD-Kurven werden daher im Hinblick auf die Defektgröße mit einer 50-prozentigen Detektionswahrscheinlichkeit a_{50} und mit einer 90-prozentigen Detektionswahrscheinlichkeit a_{90} diskutiert.

7.3 Diskussion der Modellauswahl zur Probability of Detection

Zur Anwendung des Hit-Miss-Modells müssen keine besonderen Anforderungen erfüllt werden. Lediglich die Anzahl der Messungen sollten ausreichend hoch sein. Nach Berens [Br00] sollten 80 % der Defektgrößen im Bereich von $0,1 < \text{POD} < 0,9$ liegen und die Defektgrößen sollten einheitlich variieren. Das entsprechende Handbuch [MIL09] empfiehlt für eine zuverlässige POD-Analyse ein Minimum von 60 Defektgrößen innerhalb des oben genannten Bereiches.

Bevor das a vs. \hat{a} Modell angewendet werden darf, muss nachgewiesen werden, ob die folgenden Kriterien erfüllt sind [MIL09], die sich aus dem zugrunde liegenden statistischen Modell ergeben:

- i. linearer Zusammenhang zwischen der Größe a und der Prüfsystemantwort \hat{a}
- ii. homogene Varianzen der Prüfsystemantworten \hat{a}
- iii. unkorrelierte Prüfsystemantworten \hat{a}
- iv. normalverteilte Prüfsystemantworten \hat{a} .

Wird nur eines dieser vier Kriterien bei der Erstellung der POD(a)-Kurve nicht erfüllt, kommt die anschließende POD(a)-Analyse zu einem falschen Ergebnis, obwohl die erstellte POD(a)-Kurve ein richtiges Erscheinungsbild aufweist. Dies kann zur Folge haben, dass in sicherheitsrelevanten Bereichen Fehler übersehen und somit die gestellten Anforderungen nicht erreicht werden [Fe12].

Zwischen den Prüfsystemantworten \hat{a} (gemessenen Potentialen) und der Defektgröße a (Anodenfläche) muss ein physikalischer Zusammenhang bestehen. Dieser physikalische Zusammenhang muss nicht zwingend linear sein, aber er muss mit Hilfe mathematischer Funktionen in eine lineare Beziehung umgewandelt werden können – Bedingung „i“.

In Bild 7-2 sind zur Prüfung des linearen Zusammenhangs die Prüfsystemantworten den Defektgrößen für den Fall Elektrolytwiderstand 700 Ωm und einem Messraster von 5 x 5 cm^2 bzw. 20 x 20 cm^2 beispielhaft gegenübergestellt. Zur besseren Darstellbarkeit und aufgrund der logarithmischen Abhängigkeiten wurden die gemessenen Potentiale mit (-1) multipliziert.

Generell wurde für die Auswertung der POD-Modelle das Programm mh1823 POD Software Version 4.0.1 von Charles Annis genutzt [MIL09].

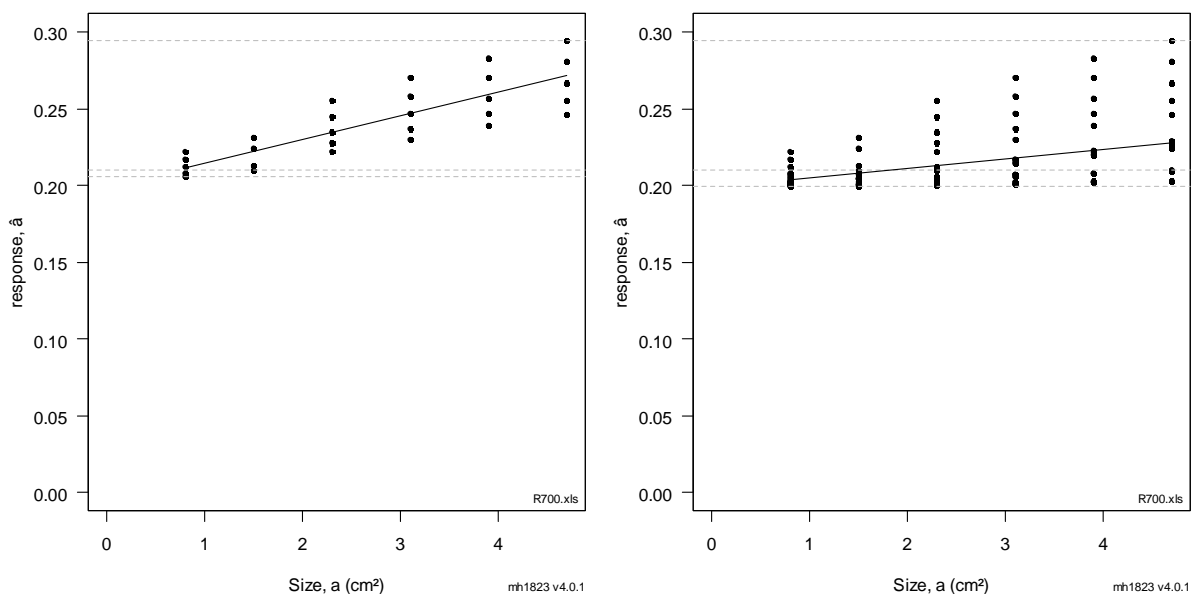


Bild 7-2: Gemessene Potentiale in Abhängigkeit der Defektgröße: Elektrolytwiderstand 700 Ωm ; Messraster 5 x 5 cm^2 (links) und 20 x 20 cm^2 (rechts).

Sowohl für die Ergebnisse aus dem Messraster 5 x 5 cm^2 ($\beta_0=0,19945$; $\beta_1=0,0153$) als auch für ein Messraster von 20 x 20 cm^2 ($\beta_0=0,1985$; $\beta_1=0,0062$) lässt sich ein linearer Zusammenhang zwischen dem gemessenen Potential also der Prüfsystemantwort und der Anodenfläche als Defektgröße mathematisch ableiten. Dies gilt ebenso für alle anderen Parametervariationen. Die Bedingung „i“ ist somit für den in dieser Arbeit ermittelten Datensatz erfüllt.

Nach Bedingung „ii“ müssen die Varianzen der Prüfsystemantworten \hat{a} bei unterschiedlichen Defektgrößen a über den gesamten Messbereich homogen sein. Dieses Kriterium ist jedoch für den Gültigkeitsbereich der POD(a)-Kurve, also zwischen ~10 % und 90 % Detektionswahrscheinlichkeit (POD), einzuhalten. Notwendig ist diese Bedingung, weil die Varianzen der Prüfsystemantworten \hat{a} die Grundlage für die Varianzabschätzung der normalverteilten Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion der POD(a)-Kurve bilden [Fe12].

In Bild 7-3 ist der lineare Zusammenhang zwischen den numerisch ermittelten Potentialen und der Defektgröße für den Elektrolytwiderstand $700 \Omega\text{m}$ und einem Messraster $20 \times 20 \text{ cm}^2$ sowie die davon abgeleitete POD-Kurve nach dem a vs. \hat{a} Modell abgebildet.

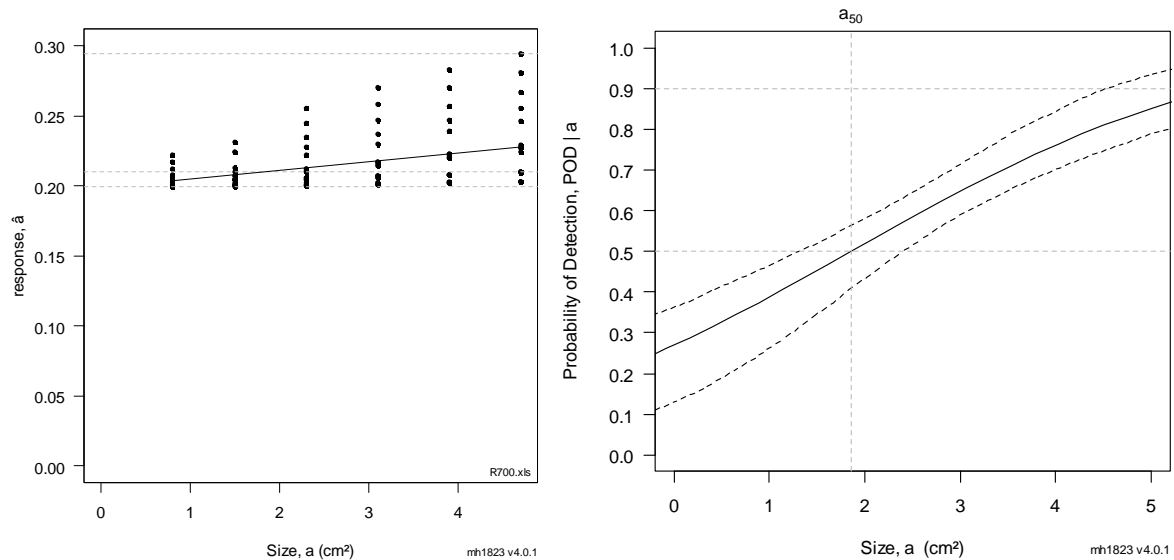


Bild 7-3: Gemessene Potentiale in Abhängigkeit der Defektgröße (links); a vs. \hat{a} Modell (rechts); Elektrolytwiderstand $700 \Omega\text{m}$; Messraster $20 \times 20 \text{ cm}^2$.

Die Varianzen der Prüfsystemantworten sind im Bereich von $0,1 < \text{POD} < 0,9$ nicht homogen. Die Varianz steigt kontinuierlich in Abhängigkeit der Defektgröße an. Liegt die Varianz bei einer Defektgröße von $0,8 \text{ cm}^2$ noch bei $3,72 \cdot 10^{-05}$ so reicht sie einen Wert von $7,64 \cdot 10^{-04}$ bei einer Defektgröße von $4,7 \text{ cm}^2$. Die Bedingung „ii“ wird nicht eingehalten. Die Inhomogenitäten der Varianzen sind auf die Berücksichtigung der Messraster zurückzuführen, da diese eine große Streuung in den gemessenen Potentialen verursachen. Das a vs. \hat{a} Modell sollte aus statistischen Gründen für den vorliegenden Datensatz nicht angewendet werden.

Die weitere Auswertung der POD der Potentialfeldmessung wird auf Basis des Hit-Miss-Modells durchgeführt.

7.3.1 Die POD in Abhängigkeit des Elektrolytwiderstands

Die Auswertung des Hit-Miss Modells zur Bestimmung der POD der Potentialfeldmessung ist in Bild 7-4 in Abhängigkeit des Elektrolytwiderstandes dargestellt. Die Datensätze wurden je nach Elektrolytwiderstand getrennt ausgewertet.

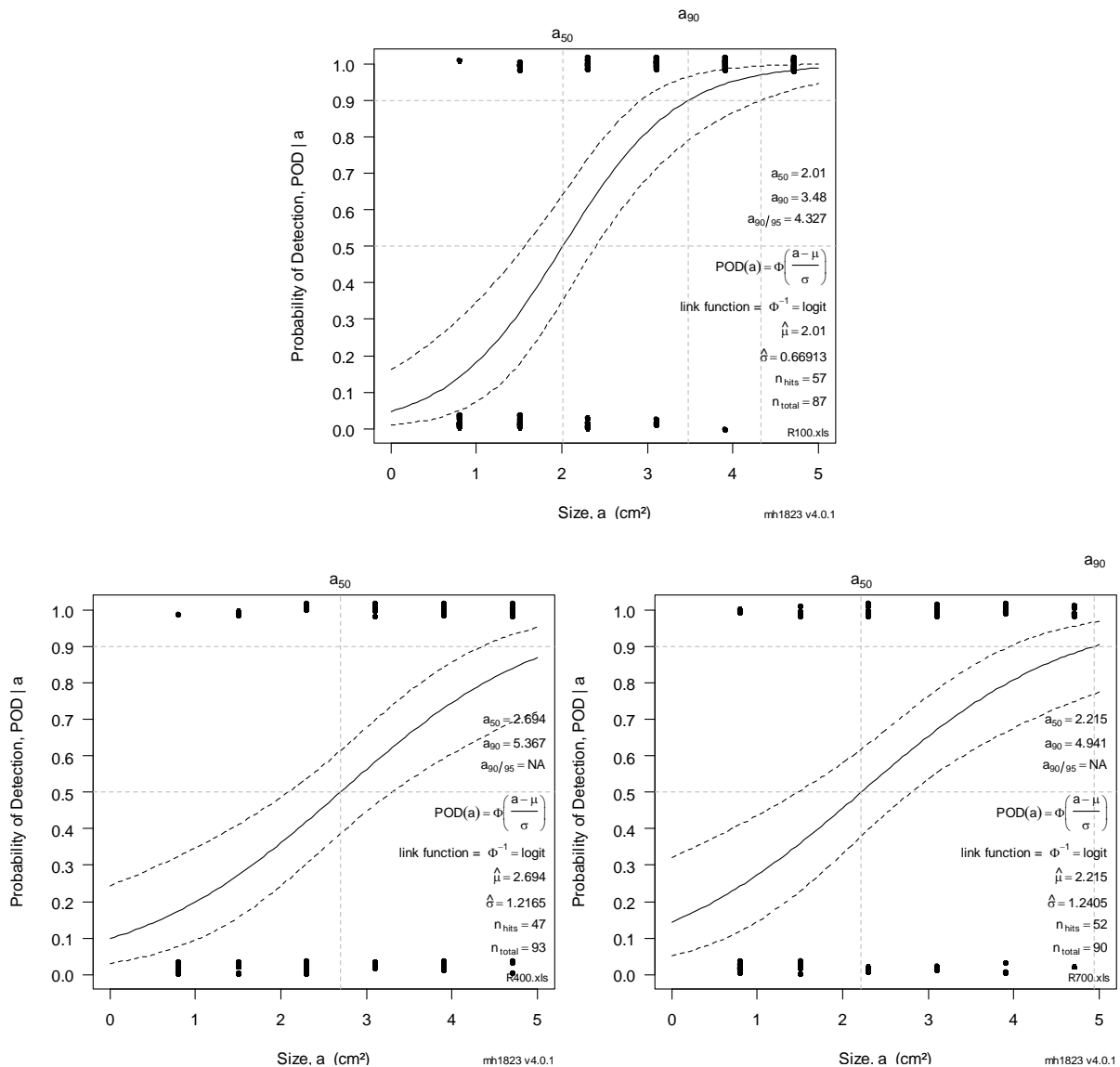


Bild 7-4: POD in Abhängigkeit des Elektrolytwiderstandes: 100 Ωm (oben), 400 Ωm (links), 700 Ωm (rechts); Messraster 15 x 15 cm².

Die POD-Kurven in Abhängigkeit des Elektrolytwiderstands unterschieden sich nur minimal. Die beste Detektierbarkeit von anodischen Bereichen wird bei einem Elektrolytwiderstand von 100 Ωm erreicht, mit 50-prozentiger Wahrscheinlichkeit kann eine Anodenfläche von 2,0 cm² mit dem gewählten Messraster gefunden werden. Bei einem Elektrolytwiderstand von 400 Ωm steigt dieser Wert auf 2,7 cm² und für einen Elektrolytwiderstand von 700 Ωm fällt der Wert auf 2,2 cm².

Die geringe Streuung lässt sich darauf zurückführen, dass die Datensätze getrennt nach Elektrolytwiderstand ausgewertet wurden. Werden durch Feuchteunterschiede am Bauwerk Bereiche

mit unterschiedlichen Elektrolytwiderständen in eine Grundgesamtheit für die Auswertung zusammengefasst, so ergibt sich eine schlechtere POD-Kurve, siehe Bild 7-5.

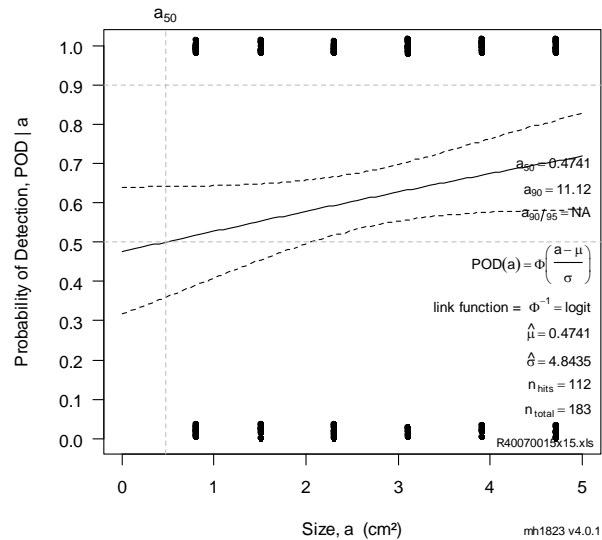


Bild 7-5: POD in Abhängigkeit des Elektrolytwiderstandes: 400 Ω m und 700 Ω m; Messraster 15 x 15 cm².

Werden nun die Datensätze aus den numerischen ermittelten Potentialfeldern für die Elektrolytwiderstände 400 Ω m und 700 Ω m zusammen in einer POD-Kurve ausgewertet, so verbessert sich zwar der Wert für a_{50} auf 0,5 cm², jedoch steigt der Wert für a_{90} auf 11,1 cm². Die POD-Kurve ist auch weit davon entfernt, nahe dem Y-Ursprung zu liegen. Zwar wird eine POD-Kurve, die auf einem non-log-model beruht, niemals die y-Achse im Ursprung kreuzen, aber die Frage ist, wie weit entfernt von diesem Punkt ist akzeptabel. Zunächst werden Annahmen zwischen 0,05 und 0,95 akzeptiert. In den Extremen ist die Normalverteilung mit großen Unsicherheiten behaftet und somit auch die Extremen der daraus resultierenden POD-Kurve. Jedoch ist die POD-Kurve aus Bild 7-5 viel weiter vom Ursprung entfernt als bspw. die POD-Kurven aus Bild 7-4. Dies bedeutet, dass die POD-Kurve aus Bild 7-5 wesentlich größere Unsicherheiten aufweist.

Für die Praxis kann daraus abgeleitet werden, dass nur Potentialdaten aus Bereichen mit vergleichbarem Elektrolytwiderstand zusammen ausgewertet werden sollten.

7.3.2 Die POD in Abhängigkeit des Messrasters

In Bild 7-6 sind verschiedene POD-Kurven mit einem Elektrolytwiderstand von 400 Ω m in Abhängigkeit des Messrasters abgebildet.

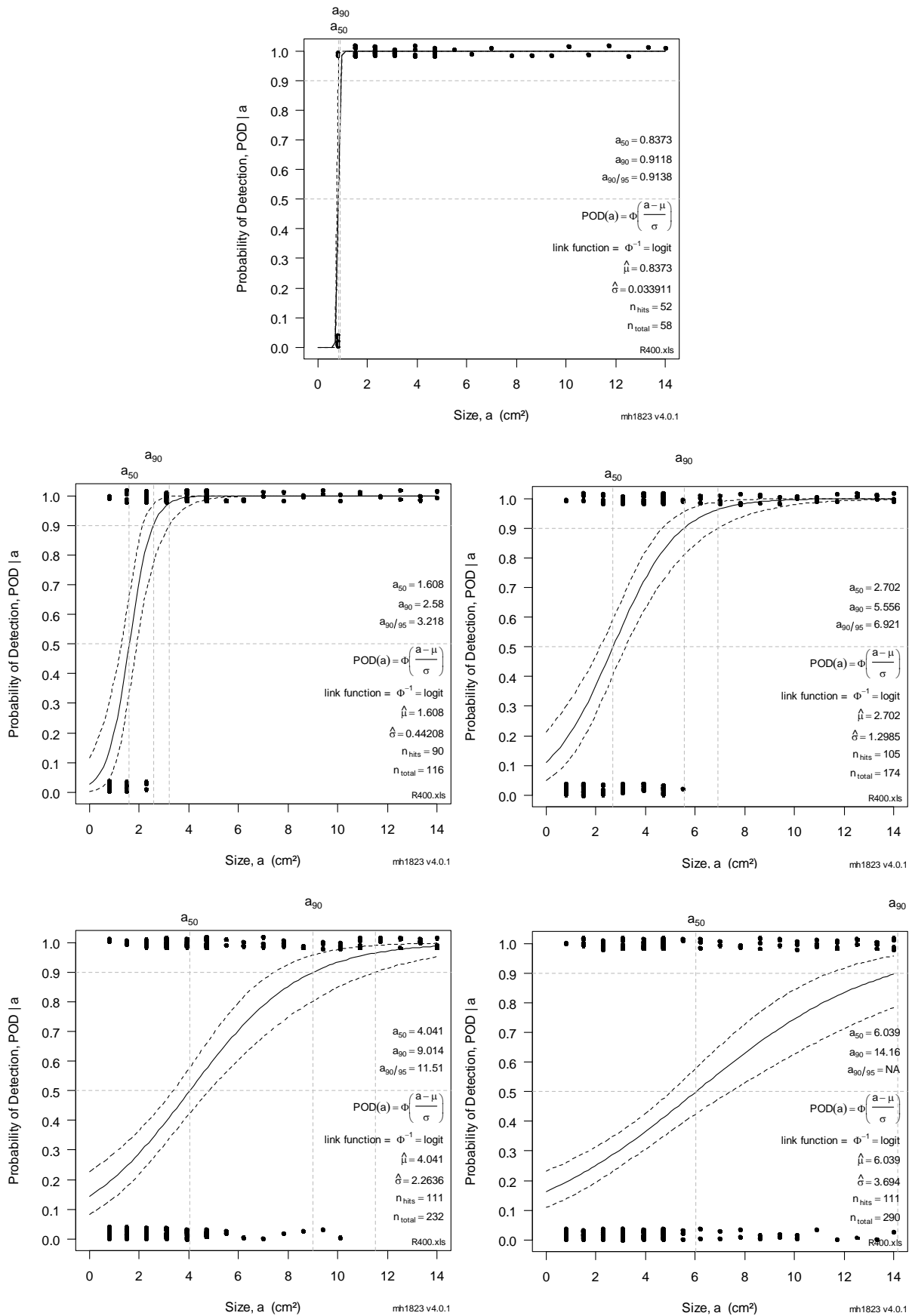


Bild 7-6: POD in Abhängigkeit des Messraster; 5 x 5 cm² (oben), 10 x 10 cm² (2.Reihe links), 15 x 15 cm² (2.Reihe rechts), 20 x 20 cm² (3. Reihe links), 25 x 25 cm² (3.Reihe rechts); R = 400 Ωm.

Mit steigendem Messraster sinkt die Detektionswahrscheinlichkeit. Beispielsweise fällt die Defektgröße a_{50} mit einer 50-prozentigen Detektionswahrscheinlichkeit und demnach auch die Defektgröße a_{90} mit einer 90-prozentigen Detektionswahrscheinlichkeit kontinuierlich ab, Tabelle 7-1.

Tabelle 7-1: Detektionswahrscheinlichkeit a_{50} und a_{90} in Abhängigkeit des Messrasters.

Messraster [cm ²]	a_{50} [cm ²]	a_{90} [cm ²]
5 x 5	0,84	0,91
10 x 10	1,61	2,60
15 x 15	2,70	5,56
20 x 20	4,04	9,01
25 x 25	6,04	14,20

Wird ein Messraster von 15 x 15cm² gewählt, so wird mit 50-prozentiger Wahrscheinlichkeit eine Defektgröße von 2,7 cm² gefunden. Dieser Wert fällt auf 6,0 cm² bei einem Messraster von 25 x 25cm². Die POD der Potentialfeldmessung wird maßgeblich vom gewählten Messraster bestimmt.

Diese Ergebnisse können die Basis bilden, Messrasterempfehlungen in den gängigen Merkblättern [DMB314, SIAM13] zur Potentialfeldmessung neu zu überdenken. Es kann nicht das Ziel sein, ein bestimmtes Messraster zu definieren. Sicher führt ein Messraster von 5 x 5 cm² zur besten Detektionswahrscheinlichkeit, jedoch ist dieses Messraster aus ökonomischen Gründen zu hinterfragen. Aber nun kann ein Messraster je nach gewünschter Detektionswahrscheinlichkeit ausgeschrieben werden.

7.3.3 Die POD in Abhängigkeit der Betondeckung

Die POD der Potentialfeldmessung in Abhängigkeit der Betondeckung ist im folgenden Bild 7-7 zusammengefasst.

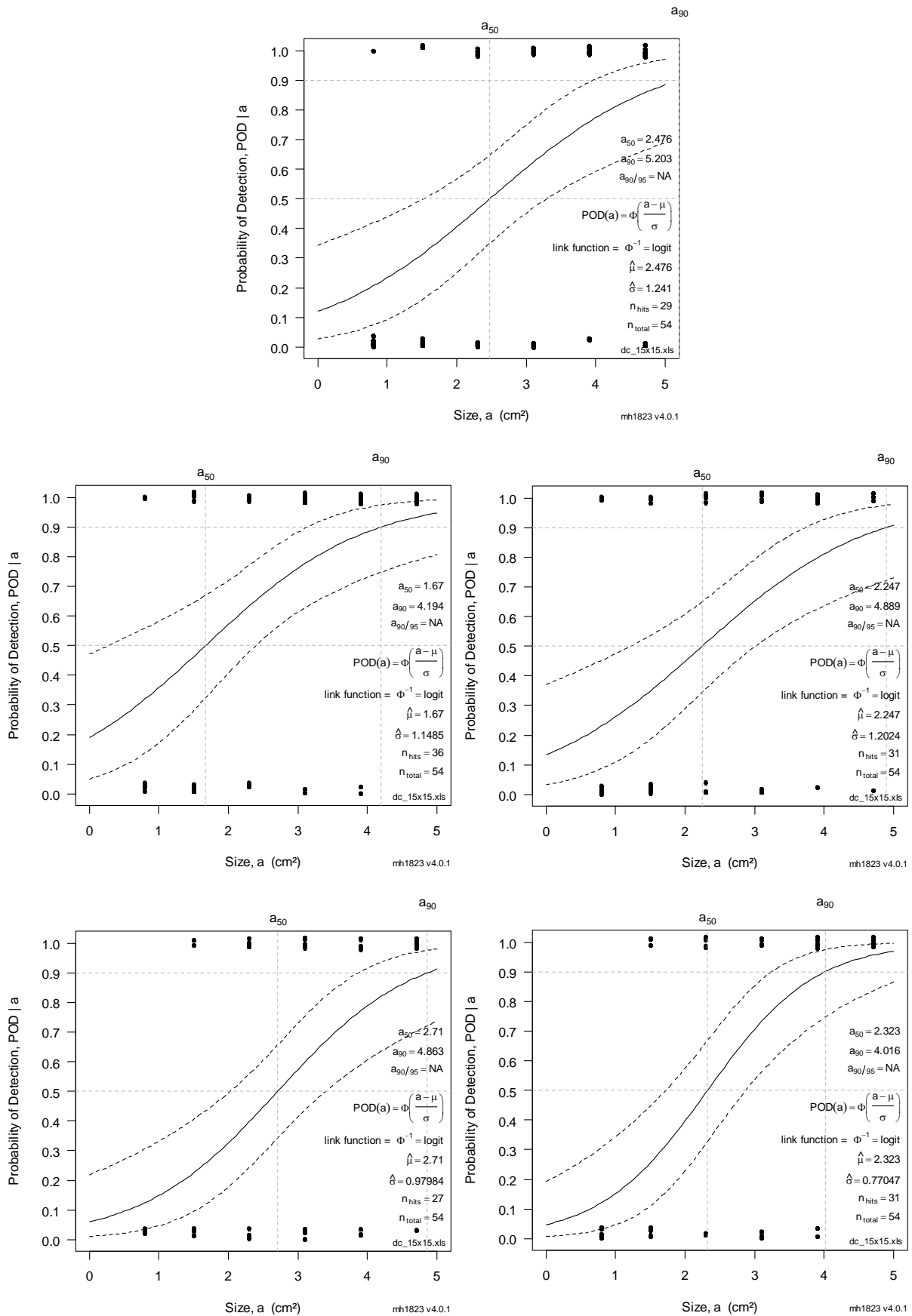


Bild 7-7: POD in Abhängigkeit der Betondeckung; 10 mm (oben), 20 mm (2. Reihe links), 30 mm (2. Reihe rechts), 40 mm (3. Reihe links), 50 mm (3. Reihe rechts); Messraster 15 x 15 cm².

Der Einfluss der Betondeckung auf die POD der Potentialfeldmessung ist vernachlässigbar. Die Verläufe der POD-Kurven streuen kaum. Ebenso lässt sich keine Tendenz an den Kennwerten der 50-prozentigen und 90-prozentigen Detektionswahrscheinlichkeiten ableiten, siehe Tabelle 7-2.

Tabelle 7-2: Detektionswahrscheinlichkeit a_{50} und a_{90} in Abhängigkeit der Betondeckung.

Betondeckung [mm]	a_{50} [cm ²]	a_{90} [cm ²]
10	2,5	5,2
20	1,7	4,2
30	2,2	4,9
40	2,7	4,9
50	2,3	4,0

Die Ergebnisse bestätigen, dass die Betondeckung kein dominanter Einflussparameter auf die Aussagegenauigkeit der Potentialfeldmessung ist. Für weitere Nutzung von POD-Daten der Potentialfeldmessung kann die Betondeckung unberücksichtigt bleiben. Jedoch sind die numerisch gewonnenen Daten auf Basis eines homogenen Elektrolytwiderstandes generiert worden. Die Frage bleibt offen, ob karbonatisierte Randschichten und in Folge die Änderungen des Elektrolytwiderstandes in den Randbereichen Einfluss auf die POD der Potentialfeldmessung haben und dadurch auch die Betondeckung an Einfluss gewinnt.

In weiteren Studien ist zu klären, bis zu welcher maximalen Betondeckung Anodenflächen detektiert werden können. Beispielweise wird in der Literatur [So02] darüber berichtet, dass Anodenflächen an der ersten Bewehrungslage von der Unterseite des Bauteils detektiert wurden. Für diesen Anwendungsfall sind eigene POD-Kurven zu erstellen.

7.4 Zusammenfassung der numerisch bestimmten Prüfqualität der Potentialfeldmessung

In diesem Kapitel wurde eine große Variation an Probability of Detection Kurven für die Potentialfeldmessung auf Basis des Hit-Miss Modells aufgestellt. Die Prüfqualität der Potentialfeldmessung kann nun erstmalig je nach Messraster und Elektrolytwiderstand bestimmt werden.

Die POD-Kurven bestätigen die Ergebnisse aus den vorangegangenen Kapiteln; der Elektrolytwiderstand des Betons und das gewählte Messraster sind die maßgebenden Einflussfaktoren auf die Aussagegenauigkeit der Potentialfeldmessung. Wird eine Potentialfeldmessung ausschließlich nach Bereichen mit vergleichbarem Elektrolytwiderstand ausgewertet, so beeinflusst die Durchführung der Potentialmessung (Einflussgruppe D) wesentlich stärker die Prüfqualität als Materialeigenschaften (Einflussgruppe A, C) des geprüften Stahlbetonbauwerkes. Ein großer Vorteil, den die POD-Kurven bieten, ist, dass nun das Messraster auf Basis der gewünschten bzw. erforderlichen Zuverlässigkeit ausgewählt werden kann.

Die POD-Kurven der Potentialfeldmessung schließen eine große Lücke in probabilistische Zustandsprognose für Stahlbetonbauwerke unter Korrosionsbeanspruchung. Die Ergebnisse aus

diesem Kapitel ermöglichen nun das Update der Lebensdauerprognose auf Basis der qualitativen Potentialfelddaten.

8 Integration der POD der Potentialfeldmessung für die Zustandserfassung und -prognose von Stahlbetonbauteilen

8.1 Einleitung

Der fib Model Code for Service Life Design [FIB06] liefert ein Modell zur voll-probabilistischen Lebensdauerprognose von Stahlbetonbauwerke unter Korrosionsbeanspruchung. Beispielsweise kann für chloridinduzierte Bewehrungskorrosion die Dauer der Einleitungsphase in Form einer Depassivierungswahrscheinlichkeit probabilistisch vorhergesagt werden. Zusätzliche Informationen zum Korrosionszustand von Bauwerken können durch Inspektionen gewonnen werden. Inspektionsdaten aus visueller Inspektion, Betondeckungsmessungen, Chloridprofilen und vor allem Potentialfeldmessungen liefern Daten zur zeitlichen Entwicklung der Korrosion. Mittels Bayes'schen Updating (Gleichung 8-1) ist es möglich, die Lebensdauerprognose $\Pr(F)$ für den Zustand Korrosion, F , mit den Inspektionsdaten, Z , zu aktualisieren.

$$\Pr(F|Z) = \frac{1}{\Pr(Z)} \Pr(Z|F) \Pr(F) \quad (8-1)$$

$\Pr(F)$ ist die a-priori Wahrscheinlichkeit im Fall von Korrosionsbeanspruchung die Depassivierungswahrscheinlichkeit vor der Inspektion. $\Pr(F|Z)$ ist die a-posteriori Wahrscheinlichkeit bedingt durch die Inspektionsergebnisse Z . $\Pr(Z|F)$ ist die Likelihood, die den Informationsgehalt der Inspektionsergebnisse unter dem Ereignis Korrosion beschreibt. Die Likelihood beschreibt somit die Leistungsfähigkeit des Prüfverfahrens unter dem gegebenen Bauwerkszustand. $\Pr(Z)$ ist die a-priori Wahrscheinlichkeit, welche durch Normalisierung erreicht wird. Neben dem Updaten einzelner Modellparameter kann auch die Depassivierungswahrscheinlichkeit zugeschärft werden [FaSt06, Ma02, StMa09, SchoTr11].

Werden bei einer Inspektion Korrosionsprozesse im Stahlbeton detektiert, so wird ein Inspektionsplan zur Überwachung der Korrosionsstellen oder, je nach Ausmaß der Korrosionsstellen, ein Instandsetzungsplan aufgestellt. Werden keine Korrosionsstellen gefunden, so sinkt die Depassivierungswahrscheinlichkeit aufgrund der Reduzierung von Modellunsicherheiten.

Das Updaten der Depassivierungswahrscheinlichkeit mittels Inspektionsdaten aus quantitativen Messmethoden wie Betondeckungsmessung und auch Chloridprofilen ist im Bauwesen bereits etabliert [GeKa04]. Für das Updaten mittels Inspektionsdaten aus qualitativen Messmethoden wie der Potentialfeldmessung fehlten bisher die Kenntnisse über die Likelihood der Messmethode [FaGe02, KeFi14], die Probability of Detection der Potentialfeldmessung. Diese Lücke wird mit den Ergebnissen aus dieser Arbeit geschlossen. Im folgenden Abschnitt wird das Updaten der Lebensdauerprognose mit qualitativen Potentialfelddaten an einem Beispiel demonstriert. Zum Vergleich wird das Update aus den quantitativen Daten aus der Betondeckungsmessung integriert.

8.2 Beispielbauwerk: Stützwand

Das Beispielbauwerk ist ein Teil einer Widerlagerwand entlang einer stark befahrenen Straße in München. Aufgrund des Klimas und der Verkehrssituation, chloridhaltiges Spritzwasser erreicht die Wand, kann das Bauwerk der Expositionsklasse XD3 [DIN08] zugeordnet werden. Diese Expositionsklasse ist charakterisiert durch trocken-feucht Wechsel in Kombination mit Chlorideinwirkung.

Insgesamt ist die Widerlagerwand auf jeder Seite mehr als 200 m lang mit einer variierenden Höhe von 0,5 bis 5 m. Aufgrund der Größe des Stahlbetonbauwerkes wird lediglich ein Segment mit den Maßen 12 x 5 m² für das Update herangezogen, siehe Bild 8-1.

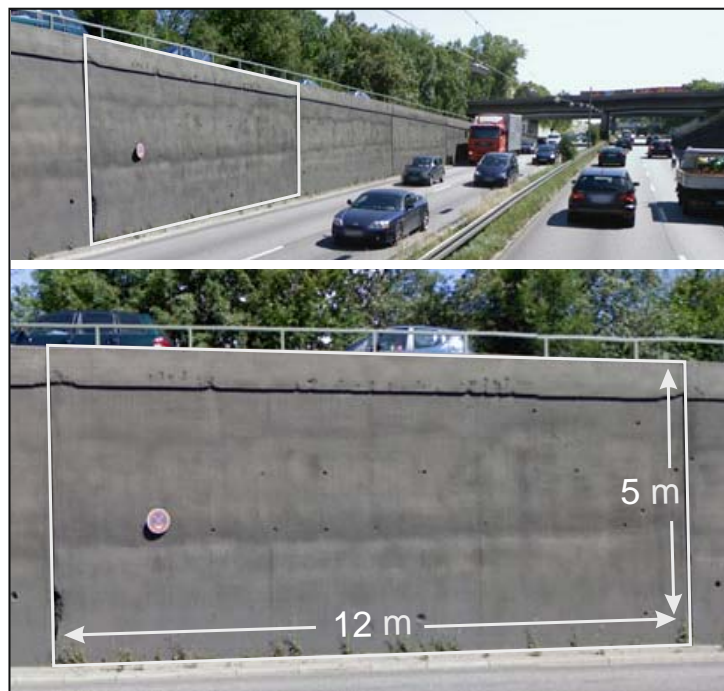


Bild 8-1: Position des ausgewählten Segments [GoogleEarth].

Die Widerlagerwand wurde im Jahr 1961 erbaut. Die für das Update herangezogenen Inspektionsdaten wurden im Jahr 2008 aufgezeichnet. Zu diesem Zeitpunkt war das Bauwerk 47 Jahre alt. Im Zuge von Instandsetzungsarbeiten an der Widerlagerwand konnte im Jahr 2011 die gesamte erste Bewehrungslage visuell auf Korrosionserscheinungen hin überprüft werden, wodurch ein direkter Vergleich der upgedateten Lebensdauerprognose auf Basis von Potentialfelddaten mit dem wahren Zustand der Bewehrung realisiert werden kann.

8.2.1 Berechnung der a-priori-Wahrscheinlichkeit der Stützwand

Zur Berechnung der a-priori Depassivierungswahrscheinlichkeit wird das Einleitungsmodell zur chloridinduzierten Bewehrungskorrosion nach dem fib Model Code for Service Life [FIB06] herangezogen, siehe Gleichung 8-2:

$$p_f = \left\{ C_{\text{crit}} - C_{S,\Delta x} \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{d_c - \Delta x}{2 \sqrt{D_{\text{RCM},0} k_e k_t \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^a \cdot t}} \right) \right] \leq 0 \right\} \quad (8-2)$$

- mit: C_{crit} : kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt [M.-%/z]
 $C_{S,\Delta x}$: Oberflächenersatzkonzentration in Tiefe Δx [M.-%/z]
 d_c : Betondeckung [mm]
 Δx : Tiefenlage der Ersatzoberfläche [mm]
 $D_{\text{RCM},0}$: Chloridmigrationskoeffizient [mm^2/a]
 k_e : Temperaturparameter [-]
 k_t : Transferparameter [-]
 t_0 : Referenzzeit (28 Tage) [a]
 t : Bauteilalter [a]
 a : Altersexponent [-]

Der Temperaturparameter wird folgendermaßen berechnet, Gleichung 8-3.

$$k_e = \exp \left(b_e \cdot \left(\frac{1}{T_{\text{ref}}} - \frac{1}{T_{\text{real}}} \right) \right) \quad (8-3)$$

- mit: T_{real} : Umgebungstemperatur [K]
 T_{ref} : Referenztemperatur [K]
 b_e : Regressionsparameter [K]

Die dem Bauwerk entsprechenden Eingabeparameter für die Lebensdauerprognose sind in Tabelle 8-1 zusammengefasst.

Tabelle 8-1: Eingabeparameter zur Berechnung der a-priori Wahrscheinlichkeit.

Parameter	Einheit	Verteilung	Werte (m; s)
C_{crit}	[M.-%/z]	Beta $0 \leq C_{\text{crit}} \leq 2$	0,6; 0,15
$C_{S,\Delta x}$	[M.-%/z]	Lognormal	2,73; 1,23
d_c	[mm]	Lognormal	40; 13
Δx	[mm]	Beta $0 \leq \Delta x \leq 50$	8,9; 5,6
$D_{\text{RCM},0}$	[$10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$]	Normal	498,3; 99,7
T_{real}	[K]	Normal	282; 3
T_{ref}	[K]	Konstant	1
b_e	[K]	Normal	4800; 700
t_0	[a]	Konstant	0,0767
t_{insp}	[a]	Konstant	47
a	[-]	Beta $0 \leq a \leq 1$	0,3; 0,12

Aufgrund des Alters des Bauwerks sind keine Informationen über die Betonzusammensetzung verfügbar. Unter Betrachtung der Materialien, die im Herstellungsjahr standardmäßig verwendet wurden, wird angenommen, dass das Bauwerk mit einem Portlandzement und einem w/z-Wert von 0,5

errichtet wurde. Die entsprechenden Materialwiderstandsparameter und der Exposition entsprechenden Einwirkungsparameter sind den Literaturstellen [Ge00, FIB06] entnommen.

Die a-priori Depassivierungswahrscheinlichkeit (Bild 8-2) wurde mit dem Programm STRUREL berechnet.

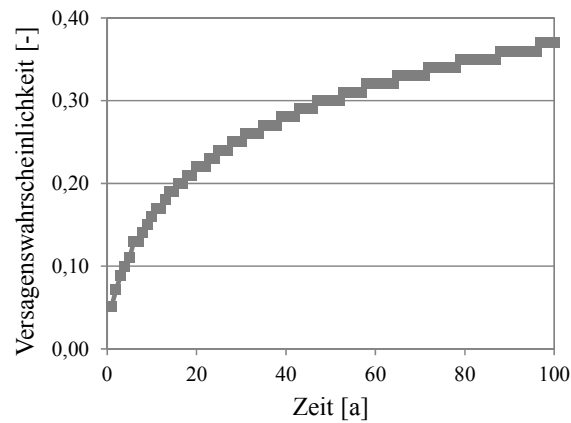


Bild 8-2: Berechnete a-priori Depassivierungswahrscheinlichkeit.

Zum Inspektionszeitpunkt $t_{\text{insp.}} = 47$ Jahre weist die gesamte Bauwerksfläche eine Depassivierungswahrscheinlichkeit von 30 % auf. Dies entspricht einem Zuverlässigkeitsindex $\beta = 0,54$. Nach dem Positionspapier des DAfStb [DAfStb08] wird für XD3 Bauteile ein Zuverlässigkeitsindex von $\beta_0 \geq 0,5$ zum Ende der vereinbarten technischen Lebensdauer für den Grenzzustand der Depassivierung gefordert. Diese Bedingung erfüllt das Segment noch. Falls das Bauteil noch längere Zeit betrieben werden soll, werden Inspektionen und/oder Instandsetzungsmaßnahmen erforderlich, ansonsten würde das Bauteil nach wenigen Jahren die Bedingung $\beta_0 \geq 0,5$ nicht mehr erfüllen.

8.2.2 Inspektionsdaten der Stützwand

Im Jahr 2008 wurde die Stützwand intensiv inspiziert. Während der Inspektion des Segments wurden die Betondeckung mit einem Raster von $0,25 \times 0,5 \text{ m}^2$ und die Potentialfeldmessung mit einem Raster von $0,25 \times 0,25 \text{ m}^2$ aufgenommen. Die visuelle Begutachtung zeigte eine intakte Bauwerksoberfläche. Im folgenden Diagramm, Bild 8-3, sind die Ergebnisse der Betondeckungsmessung zu sehen.

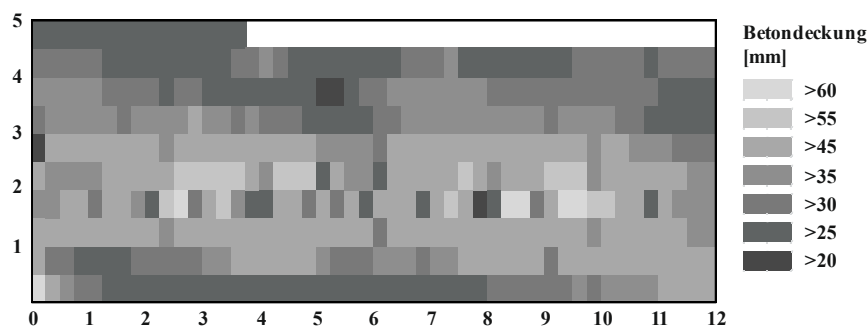


Bild 8-3: Inspektionsergebnisse der Betondeckungsmessung.

Die Betondeckungsmessung streut in einem Bereich von 25 bis 70 mm. In den oberen Bereichen ab 3 m Höhe und in den unteren Bereichen bis 0,5 m Höhe liegt die Betondeckung tendenziell etwas geringer vor als in den mittleren Bereichen. Ansonsten ergibt sich eine gleichmäßige Verteilung der Betondeckung ohne auffallende, kritische Bereiche mit sehr geringen Betondeckungen.

Bild 8-4 zeigt die Ergebnisse der Potentialfeldmessung, die mit einem Messraster von 25 x 25 cm² aufgenommen wurden.

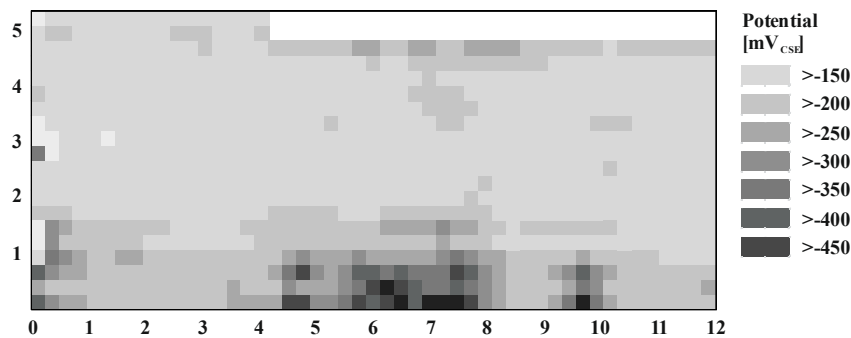


Bild 8-4: Inspektionsergebnisse der Potentialfeldmessung.

Die Ergebnisse der gemessenen Potentiale liegen in einem Bereich von 0 bis -500 mV_{CSE}. Auffällige Bereiche mit niedrigen Potentialen und ausgeprägten Potentialgradienten, die auf eine hohe Korrosionswahrscheinlichkeit hindeuten, befinden sich im Fußbereich der Wand bis 0,5 m Höhe auf den Längenkoordinaten 4,75 m, 5,75-7,75 m und bei ca. 9,75 m. Aufgrund der stetig abnehmenden Höhe des Bauteils liegen für den rechten oberen Teil keine Ergebnisse vor.

Die statistische Auswertung mit Histogramm und Aufteilung der Potentialfelddaten in zwei Normalverteilungen, eine für die aktive und eine für die passive Bewehrung, ist im folgenden Bild 8-5 aufgestellt.

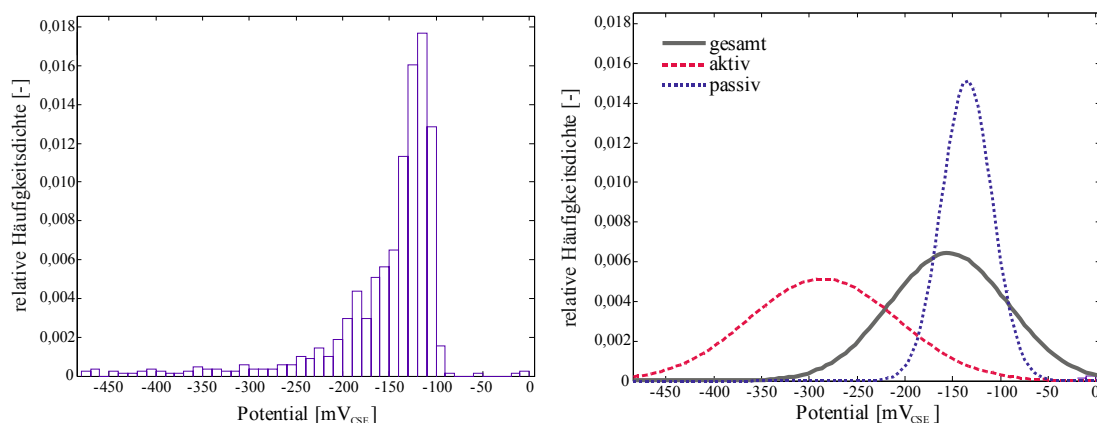


Bild 8-5: Histogramm der Potentialergebnisse (links); Normalverteilungen zur aktiven ($\mu = -285,8$; $\sigma = 77,7$) und passiven Bewehrung ($\mu = -135$; $\sigma = 26,3$) (rechts).

Aus den Ergebnissen aus Bild 8-5 kann abgeleitet werden, dass die Potentiale negativer als ca. -220 mV_{CSE} als Indikator für Korrosion angesehen werden können, denn bis von diesem Wert wird die Verteilung der passiven Bewehrung begrenzt. Im Bereiche der Potentialwerte von -100 mV_{CSE} bis

-220 mV_{CSE} überlappen sich die aktive und die passive Verteilung. Die Potentiale könnten sowohl zur aktiven als auch zur passiven Bewehrung zugeordnet werden. Ab einem Potentialwert positiver als -100 mV_{CSE} kann von nicht korrodierender Bewehrung ausgegangen werden.

8.3 Das Updaten der Lebensdauerprognose

Das Updaten der Lebensdauerprognose kann zwei Dimensionen betreffen, die zeitliche und die räumliche Dimension. Werden zu unterschiedlichen Zeitpunkten Inspektionen durchgeführt und deren Ergebnisse für das Updaten der Lebensdauerprognose verwendet, so wird die zeitliche Dimension des Schädigungsprozesses abgedeckt. Bleiben die räumlichen Informationen aus den Inspektionen vernachlässigt, ergibt sich für die gesamte Bauteilfläche eine upgedatete Versagenswahrscheinlichkeit.

Aber Korrosionsprozesse in Stahlbetonbauwerken streuen räumlich aufgrund der streuenden Geometrie (z. B. Betondeckung), der streuenden Betonwiderstandsparameter (z. B. Chloridmigrationswiderstand) und vor allem durch streuende Einwirkungen (z. B. Chlorideintrag). Zur Festlegung von Inspektions- und Instandsetzungsstrategien ist die Kenntnis der räumlichen Streuung essentiell. Einige Autoren [He92, FaSt06, Ma09] modellieren die räumliche Streuung der Einleitungsphase der Bewehrungskorrosion durch Unterteilung der Bauteilfläche in Elemente. Die räumliche Streuung des dominanten Einflussparameters auf den Korrosionsprozess bestimmt dabei die Elementgröße. Studien von Li et al. [Li04] und Stewart und Mullard [StMu07] zeigen beispielsweise die Modellierung der räumlichen Streuung der Schädigungsphase der Korrosion.

Zur Parametrisierung streuender räumlich korrelierter Modellparametern, z. B. Betondeckung, Chloridmigrationswiderstand, etc., kann die Theorie der Zufallsfelder verwendet werden. Das Modellieren von Zufallsfeldern für Stahlbetonbauwerke unter Korrosionsbeanspruchung zeigen diese Studien [FaSt06, FiSt11, St11]. In dieser Arbeit konnte dieser Ansatz nicht verfolgt werden, da wichtige Informationen zur Beschreibung des räumlich streuenden Verhaltens, die Korrelationslänge, der räumlich streuenden Modelleingabeparameter fehlen.

Inspektionsdaten aus Betondeckungsmessungen und Potentialfeldern liefern durch ihren Flächenscan neben Informationen über die zeitliche Entwicklung des Schadens Informationen zur räumlichen Entwicklung des Schadens. Zur Berücksichtigung der räumlichen Streuung des Korrosionsprozesses im folgenden Beispielbauwerk wird die Bauteiloberfläche ebenfalls in Elemente unterteilt. Da keine Informationen zum räumlichen Verhalten eines nicht bekannten dominanten Einflussparameters auf den Korrosionsprozess vorliegen, wird die Elementgröße auf die Messrastergröße abgestimmt. Die räumliche Abhängigkeit der Elemente untereinander wird vernachlässigt.

Am Beispielbauwerk wird das zeitliche und räumliche Updaten der Lebensdauerprognose mit Inspektionsdaten aus Betondeckungsmessungen und Potentialfeldern realisiert.

8.3.1 Updaten mittels Betondeckungsmessung

Zum Updaten der Lebensdauerprognose bietet sich in einem ersten Schritt die gemessene Betondeckung an, da diese ein direkter Eingabeparameter des Einleitungsmodells darstellt. In Tabelle

8-1 wurde die Betondeckungsmessung als eine Lognormal-Verteilung mit $m = 40$ mm und $s = 13$ mm angenommen. Die reale, gemessene Betondeckung-Verteilung zeigt Bild 8-6.

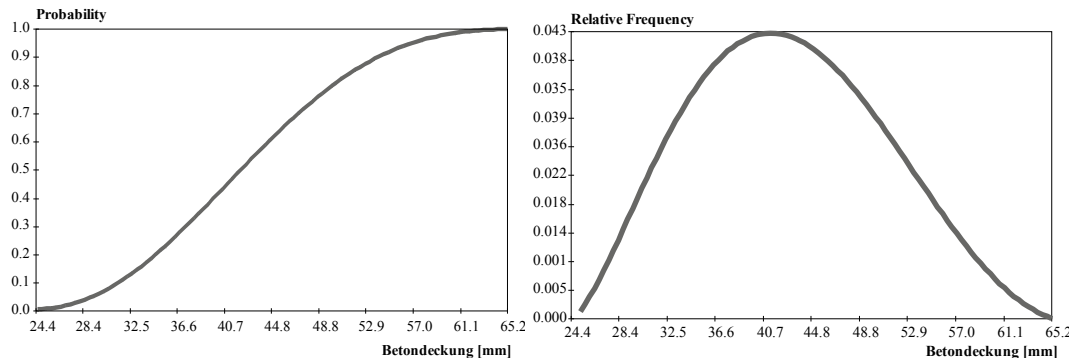


Bild 8-6: Die beta-Verteilung ($m: 42,5$ mm; $s: 8,4$ mm) der gemessenen Betondeckung.

Der Kolmogorov-Smirnov-Test ergab für die gemessenen Betondeckungswerte eine beta-Verteilung mit $m = 42,5$ mm und $s = 8,4$ mm. Die geschätzten Betondeckungswerte liegen nahe an den gemessenen Werten.

Die naheliegende Methode zum Update mittels Betondeckungsdaten ist die Berechnung der Lebensdauerprognose mit der gemessenen Betondeckungsverteilung, Bild 8-7.

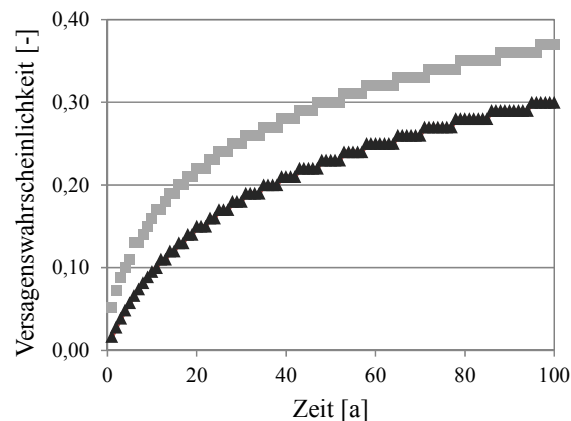


Bild 8-7: Lebensdauerprognose mit der angenommenen Betondeckung (Quadrat) und der realen, gemessenen Betondeckung (Dreieck).

Die zunächst geschätzte Betondeckungsverteilung lag auf der konservativen Seite. Die a-priori Depassivierungswahrscheinlichkeit fällt von 30 % mit Berücksichtigung der realen Betondeckungsdaten auf 22 % zum Zeitpunkt der Inspektion, da die angenommenen Betondeckung etwas niedriger liegt als die reale, gemessene Betondeckung.

Die neu berechnete Depassivierungswahrscheinlichkeit von 22 % gilt wiederum für die gesamte Bauteilfläche. Die Betondeckungsmessung liefert zwar verortete, räumliche Informationen zum Bauteilzustand, jedoch gehen diese räumlichen Informationen auf diese Art des Updatens verloren. Eine einfache Methode diese räumliche Information zu bewahren, ist das Aufteilen der Bauteiloberfläche in Elemente, die beispielsweise dem Messraster der Messdaten entspricht. Je Element wird eine Lebensdauerprognose durchgeführt, deren Eingabeparameter mit den dort

vorliegenden Betondeckungsmesswerten übereinstimmt. Die resultierenden Depassivierungswahrscheinlichkeiten aus diesem Vorgehen für die Stützwand zum Zeitpunkt der Inspektion sind im folgenden Bild 8-8 dargestellt. Die Elementgröße entspricht dem Messraster der Betondeckungsmessung $0,25 \times 0,5 \text{ cm}^2$.

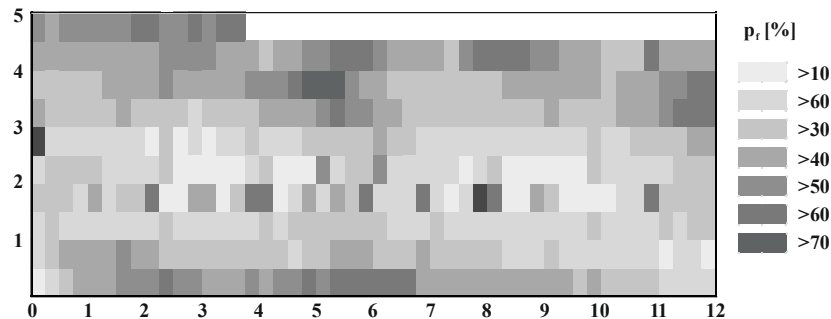


Bild 8-8: Depassivierungswahrscheinlichkeiten (t_{insp}) unter Berücksichtigung der örtlich vorliegenden Betondeckungen.

Aufgrund der Art des Updatens ergibt sich eine zur Betondeckung identische Flächendarstellung. Anstatt der Betondeckung ist nun jedes Element mit einer Versagenswahrscheinlichkeit verknüpft. Ebenso wie bei der Betondeckung liegen die Bereiche mit höheren Depassivierungswahrscheinlichkeiten $< 40 \%$ im unteren und oberen Bereich des Segments. Der Vorteil dieser Darstellungsart ist, dass die Bereiche mit hohen Versagenswahrscheinlichkeiten direkt geortet werden können.

Neben der flächigen Darstellung ist die Verteilung der neu berechneten Depassivierungswahrscheinlichkeiten in Bild 8-9 dargestellt.

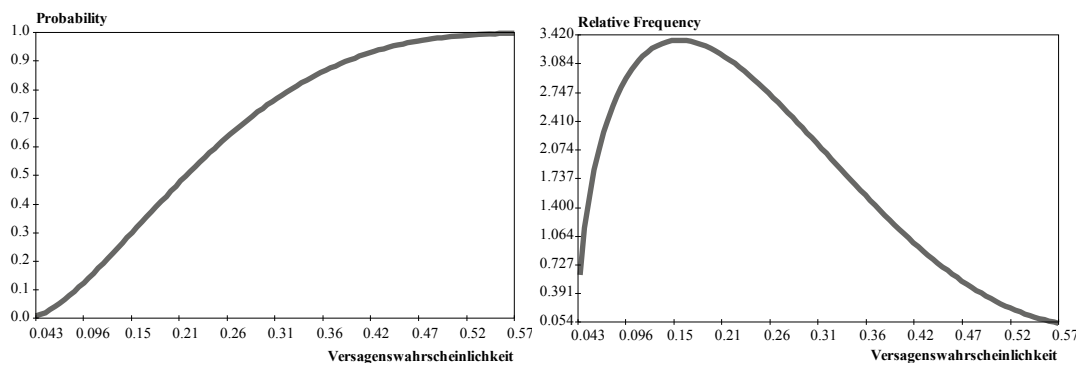


Bild 8-9: Die beta-Verteilung ($m: 22,7 \%$; $s: 11,3 \%$) der neu berechneten Depassivierungswahrscheinlichkeiten zum Zeitpunkt t_{insp} .

Die Verteilung der Depassivierungswahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt der Inspektion nach dem räumlichen Updaten mittels der Betondeckungswerte entspricht nach dem Kolmogorov-Smirnov-Test einer beta-Verteilung ($m: 22,7 \%$; $s: 11,3 \%$). Der Mittelwert der beta-Verteilung von $s = 22,7 \%$ liegt erwartungsgemäß eng an der Versagenswahrscheinlichkeit von 22% resultierend aus dem Updaten mittels der Betondeckungsverteilung. Die Differenz der beiden Versagenswahrscheinlichkeiten beruht auf Rundungsfehlern.

Der Vorteil bei dieser Art der Darstellung der Versagenswahrscheinlichkeit ist, dass der Anteil der Elemente mit einer eventuell zuvor definierten kritischen Versagenswahrscheinlichkeit ersichtlich wird. Wird beispielsweise eine Depassivierungswahrscheinlichkeit von 30 % als kritisch betrachtet, so wären dreißig Prozent der Elemente in einem kritischen, Instandsetzungsbedürftigen Zustand.

8.3.2 Updaten mittels Potentialfelddaten

Das Updaten der Lebensdauerprognose auf Basis qualitativer Messmethoden erfolgt mit Hilfe des Satzes von Bayes, da sowohl das Schädigungsmodell als auch die Inspektionsqualität mit Unsicherheiten behaftet sind. Der Satz von Bayes erlaubt es, a-priori Informationen (Depassivierungswahrscheinlichkeit – C: Korrosion) mit zusätzlichen Informationen (Potentialfelddaten – I: Indikation) zu einem a-posteriori-Modell zu kombinieren. Der Satz von Bayes zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit, dass es korrodiert in Abhängigkeit, dass auch Korrosion identifiziert wird, lautet:

$$P(C|I) = \frac{P(I|C) \cdot P(C)}{P(I|C) \cdot P(C) + P(I|\bar{C}) \cdot P(\bar{C})} \quad (8-4)$$

mit: Pr(C|I): a-posteriori Depassivierungswahrscheinlichkeit
 Pr(C): a-priori Depassivierungswahrscheinlichkeit
 Pr(I|C): Inspektionsqualität in Abhängigkeit des Zustandes - POD
 Pr(I|\bar{C}): Inspektionsqualität in Abhängigkeit des Zustandes - PFA

Der Satz von Bayes kann auch dazu verwendet werden, die Wahrscheinlichkeit zu berechnen, dass es nicht korrodiert und dass auch keine Korrosionsaktivität gemessen wurde:

$$P(\bar{C}|\bar{I}) = \frac{P(\bar{I}|\bar{C}) \cdot P(\bar{C})}{P(\bar{I}|\bar{C}) \cdot P(\bar{C}) + P(\bar{I}|C) \cdot P(C)} \quad (8-5)$$

Das Potentialfeld wurde in einem Raster von 25 x 25 cm² aufgenommen. Zum Elektrolytwiderstand des Betons während der Messung liegen keine Informationen vor. Daher wurde die folgende POD-Kurve (Messraster 25 x 25 cm²; R = 400 Ωm, Bild 8-10) für das Update herangezogen.

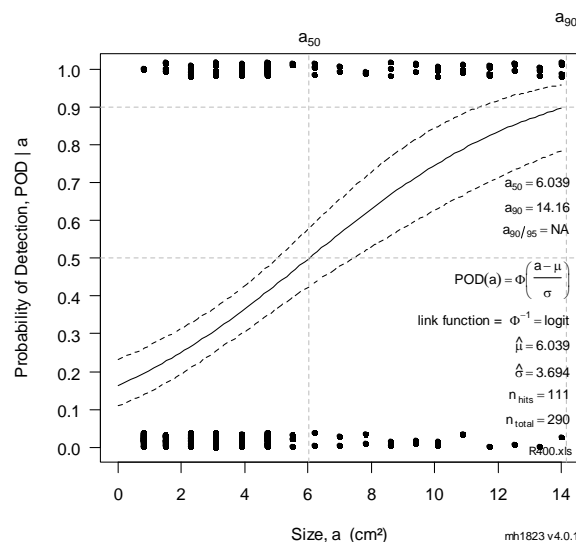


Bild 8-10: POD-Kurve für ein Messraster von 25 x 25 cm²; R = 400 Ωm.

Zunächst wird eine kritische Defektgröße definiert, in deren Abhängigkeit die Detektionswahrscheinlichkeit für das Update der Depassivierungswahrscheinlichkeit ausgedrückt wird. Als kritische Defektgröße wird eine Anodenfläche von $a_{\text{krit}} = 2 \text{ cm}^2$ festgelegt. Die POD ($a_{\text{krit}} \approx 0,25$) kann aus Bild 8-10 abgelesen werden. Für die Fehleralarmwahrscheinlichkeit wurde ein Wert von $\Pr(I|\bar{C}) = 5 \%$ angenommen.

In Bild 8-11 ist die Entwicklung der Lebensdauerprognose unter Vernachlässigung der räumlichen Streuung nach Indikation einer Korrosionsstelle (rot) und nach unauffälliger Inspektion (grün) dargestellt.

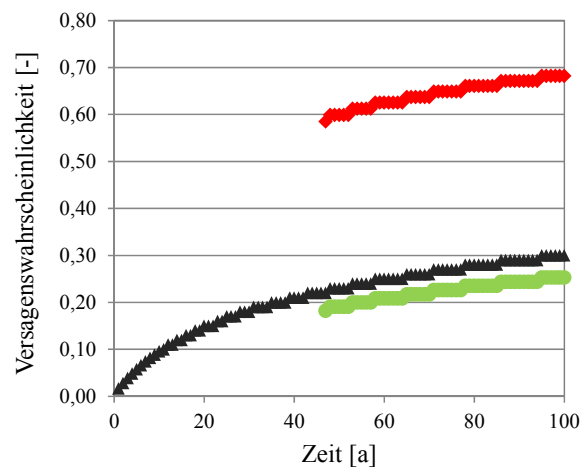


Bild 8-11: Lebensdauerprognose mit der angenommenen POD (a_{krit}) für den Fall „Detektion einer Anodenfläche“ (rot) und für den Fall „keine Anodenfläche nach der Inspektion gefunden“ (grün).

Die Depassivierungswahrscheinlichkeit steigt zum Zeitpunkt der Inspektion sprunghaft von 22 % auf 59 %, wenn eine Korrosionsstelle mittels der Potentialfeldmessung identifiziert wird. Sind die Potentialfelddaten hingegen unauffällig, so fällt die Depassivierungswahrscheinlichkeit lediglich von 22 % auf 18 %. Die in der Lebensdauerprognose beruhenden Unsicherheiten können durch eine unauffällige Inspektion kaum reduziert werden.

Werden nun die räumlich streuenden Depassivierungswahrscheinlichkeiten berücksichtigt, so kann a) die Wahrscheinlichkeit berechnet werden, dass Korrosion vorliegt und diese auch detektiert wird und b) dass keine Korrosion vorliegt und auch keine Korrosion detektiert wird. Diese beiden Wahrscheinlichkeiten sind als relative Häufigkeitsverteilungen in Bild 8-12 zusammengefasst. Diese Wahrscheinlichkeiten beschreiben die Leistungsfähigkeit der Potentialfeldmessung in Abhängigkeit der gegebenen Depassivierungswahrscheinlichkeit in diesem Beispiel.

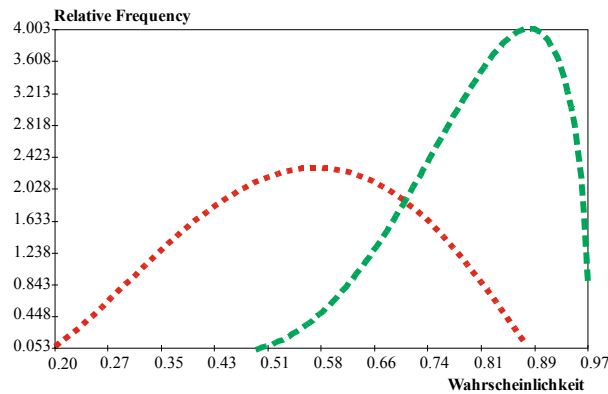


Bild 8-12: Wahrscheinlichkeiten für $P(C|I)$ (rot) und $P(\bar{C}|\bar{I})$ (grün).

Die Wahrscheinlichkeit $P(C|I)$ streut über einen weiten Bereich von 20 bis 90 %, während $P(\bar{C}|\bar{I})$ den Bereich von 50 bis 100 % abdeckt. Der Schwerpunkt von $P(\bar{C}|\bar{I})$ liegt bei ca. 80 %. Dies bedeutet, dass etwa 80 % der Bereiche, die als korrosionsunauffällig eingeschätzt werden, auch unauffällig sind. Hingegen sind nur 55 % der Bereiche am Korrodieren, die als korrosionsgefährdet identifiziert wurden.

Im nächsten Schritt wird das gemessene Potentialfeld in das Update integriert. Zunächst wird ein Grenzpotential festgelegt, das die gemessenen aktiven (korrosionsgefährdeten) Potentialwerte von den gemessenen passiven Ergebnissen trennt. Die Festlegung des Grenzpotentials ist eine Optimierungsfrage, die mit Hilfe der ROC-Kurven dargestellt werden kann. Wird das Grenzpotential zu hoch angesetzt, würden nicht-korrozierende Bereiche unnötigerweise instand gesetzt. Ist hingegen das Grenzpotential zu niedrig gewählt, so würden Korrosionsstellen übersehen, der Schaden könnte sich unbemerkt weiter entwickeln.

Das gewählte Grenzpotential ist das 80%-Quantil der aktiven Normalverteilung und entspricht einem Wert von $-220 \text{ mV}_{\text{CSE}}$, siehe Bild 8-10. Die mit dem gewählten Grenzpotential verknüpfte Receiver Operating Characteristic (ROC) Kurve, ist ebenfalls dargestellt.

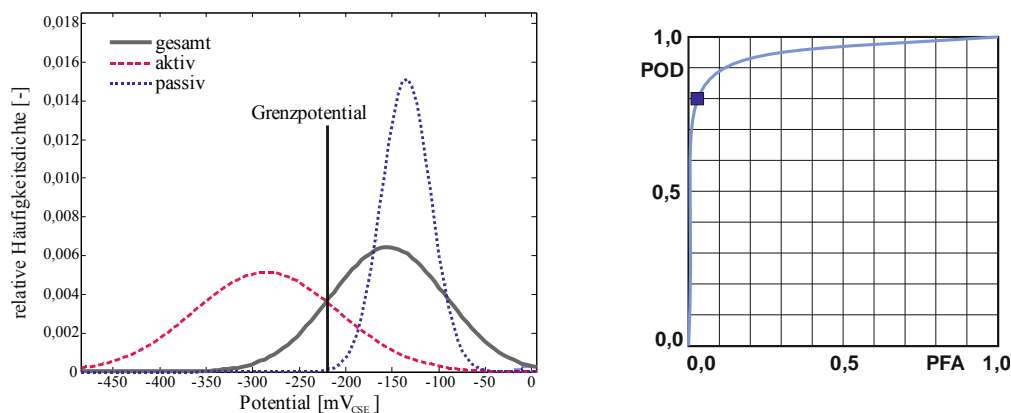


Bild 8-13: Gewähltes Grenzpotential (links) mit entsprechender ROC-Kurve (rechts).

Das hier festgelegte Grenzpotential führt zu einer hohen Probability of Detection von 80 % in Kombination mit einer Probability of False Alarm von ca. 0 %. Es besteht zwar die Gefahr, dass Korrosionsstellen unentdeckt bleiben, jedoch ist die Fehleralarmwahrscheinlichkeit sehr gering.

Aus der Wahl des Grenzpotentials lassen sich folgende Bedingungen ableiten:

$$P(IIC) = 0,8$$

$$P(\bar{I}IC) = 0,2$$

Im Fall des Inspektionsergebnisses „keine Korrosion“ entsprechen die folgenden Bedingungen gemäß dem Grenzpotential:

$$P(\bar{I}|\bar{C}) \approx 0,99$$

$$P(II\bar{C}) \approx 0,01$$

Die a-priori-Depassivierungswahrscheinlichkeit wird nun mit dem gemessenen Potentialen und der Leistungsfähigkeit der Potentialfeldmessung mittels des Satzes von Bayes verknüpft. Die resultierende a-posteriori Depassivierungswahrscheinlichkeit ist in Bild 8-14 dargestellt. Die Elementgröße entspricht dem Messraster der Potentialfeldmessung 0,25 x 0,25 cm².

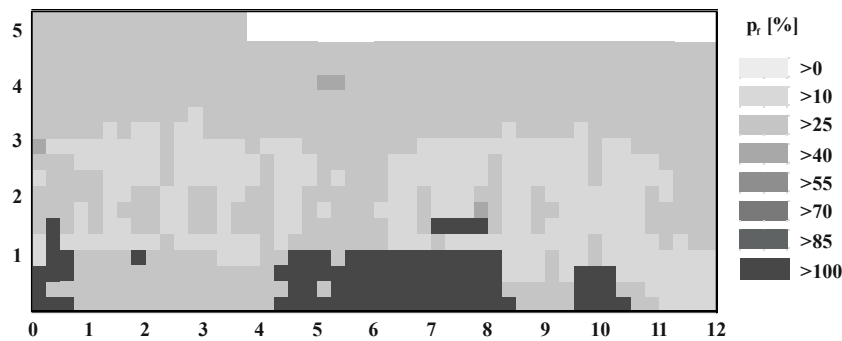


Bild 8-14: A-posteriori Depassivierungswahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt t_{insp} auf Basis der Betondeckungsmessung und Potentialfeldmessung.

Nach dem Update der Depassivierungswahrscheinlichkeit mittels der Betondeckungsmessung und der Potentialfelddaten ergibt sich ein viel differenzierteres Ergebnis als nach dem Update nur auf Basis der Betondeckungsmessung. Hohe Depassivierungswahrscheinlichkeiten größer 85 % treten lediglich bis zu einer Höhe bis 1,75 m auf. Alle Bereiche oberhalb dieser Höhe sind unauffällig. Besonders auffällige, korrosionsgefährdete Bereiche befinden sich auf den Längenkoordinaten 0-0,5 m, 4,25-8,25 m und 9,5-10,25 m

Wird nun die Depassivierungswahrscheinlichkeit nach dem Update mit der Betondeckungsmessung (Bild 8-8) mit der Depassivierungswahrscheinlichkeit nach dem Update mit der Betondeckungsmessung und den Potentialfelddaten miteinander verglichen, so zeigt sich, dass die auffälligen Bereiche aus dem Update mit der Betondeckungsmessung im Update der Potentialfeldmessung nicht mehr erscheinen. Die Betondeckungsmessung kann nicht direkt den Zustand eines Stahlbetonbauwerkes beschreiben, sondern die Interpretation des Zustandes hängt vom gewählten Modell ab. Das Modell berücksichtigt nicht die aktuelle räumliche Streuung des Chlorideintrages und etwaige Inhomogenitäten, wie bspw. Fugen, Risse, etc.. Mit steigendem Bauwerksalter reflektiert die Potentialfeldmessung indirekt die räumliche Abhängigkeit der Chloridbeaufschlagung. Beispielsweise sind in Bild 8-14 keine korrosionsauffälligen Ergebnisse über

einer Höhe von ca. 1,75 m zu finden. Dies könnte darauf zurückgeführt werden, dass das korrosionsverursachende, chloridhaltige Spritzwasser aus dem Straßenverkehr keine größeren Höhen erreicht. Im Fall eines korrosionsaktiven Stahlbetonbauwerkes liefert die Potentialfeldmessung wesentlich mehr Informationen zum Bauwerkszustand als die Betondeckungsmessung.

Generell ist die Depassivierungswahrscheinlichkeit in den auffälligen Bereichen sehr hoch, obwohl die $POD(a_{krit}=2\text{cm}^2)$ lediglich 25 % beträgt. Dafür ergibt sich aber eine gute Trennbarkeit der aktiven und passiven Potentiale (Bild 8-10), die sich auch in der dazugehörigen ROC-Kurve widerspiegelt. Der sich aus dieser Analyse abgeleitete Wert von $P(IIC) = 80\%$ verbunden mit $P(\bar{IIC}) \approx 099\%$ deutet auf eine sehr gute Detektierbarkeit hin. Zudem ist das Bauwerk mit ca. 50 Jahren relativ alt und kann einer der aggressivsten Expositionsklassen zugeordnet werden.

8.3.3 Vergleich der upgedateten Zustandsbewertung mit dem realen Bauwerkszustand

Im Jahr 2011 fanden umfangreiche Instandsetzungsarbeiten an der Widerlagerwand statt, im Zuge derer die Betondeckung bis zur ersten Bewehrungslage abgetragen wurde. Dies ermöglichte die visuelle Untersuchung der ersten Bewehrungslage auf Korrosionserscheinungen, siehe Bild 8-15.

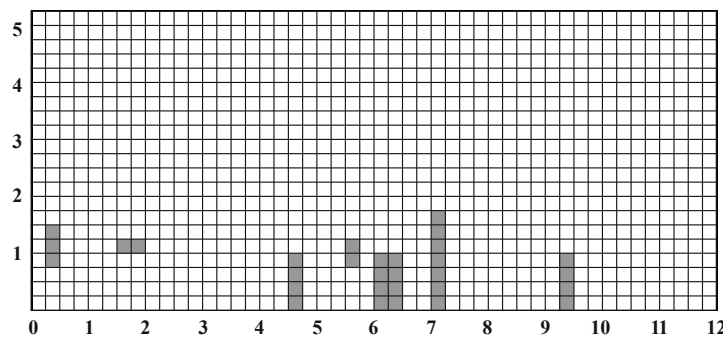


Bild 8-15: Ergebnis zur Untersuchung des Bewehrungszustandes: graue Elemente – Querschnittsverlust, weiße Elemente – keine Korrosionserscheinungen.

Die in Grau gehaltenen Elemente weisen Korrosionserscheinungen in Form von oberflächlicher Korrosion bis hin zu 50 % Querschnittsverlust auf, während die weißen Elemente korrosionsunauffällig sind. Kleinere Korrosionsherde befinden sich im linken Bereich auf circa 1 m Höhe. Vermehrt liegen Korrosionserscheinungen zwischen 4,5 m bis 7,5 m. Ab einer Höhe von 1,5 m Höhe sind keine Querschnittsverluste detektiert worden.

Der Vergleich zwischen der upgedateten Depassivierungswahrscheinlichkeit mit dem wahren Korrosionszustand der Bewehrung zeigt, dass die prognostizierte, korrosionsgefährdete Fläche kleiner ist als die wahren Korrosionsbereiche nach der visuellen Inspektion. Jedoch wurde mit Hilfe des probabilistischen Updates der Depassivierungswahrscheinlichkeit mit Daten der Potentialfeldmessung kein korrodierender Bereich übersehen. Auch ist kein nicht-korrodierender Bereich als korrosionsaktiv prognostiziert worden. Die hier gewählten Kriterien zum Updaten der Depassivierungswahrscheinlichkeit scheinen auf der sicheren, konservativen Seite zu liegen.

8.4 Zusammenfassung zur Integration der Potentialfeldmessung in die Zustandsbewertung

Die Erhaltung der Gebrauchstauglichkeit unserer alternden Infrastruktur ist die wesentliche Aufgabe des Bauwerksmanagements. Die probabilistische Zustandsbewertung und –prognose unter Berücksichtigung von Inspektionsdaten ist ein wichtiges Werkzeug, diese Aufgabe zu unterstützen.

Dieses Kapitel zeigt eine Fallstudie zum Update der Lebensdauerprognose eines Stahlbetonbauwerkes mit Daten aus Potentialfeldmessung und mit Hilfe der zuvor ermittelten POD-Kurven. Mit einem einfachen Ansatz, der Unterteilung der Bauwerksoberfläche in Elemente in Elementgrößen entsprechend dem Messraster, können für das Update die flächigen Informationen aus der Potentialfeldmessung für die Zustandsbewertung erhalten werden. Die flächige Streuung des Schädigungsprozesses Korrosion bleibt berücksichtigt. Inspektionen und nötige Instandsetzungsmaßnahmen können nun optimal und kostensparend geplant und umgesetzt werden.

Die in der Praxis übliche empirische Auswertung der Potentialfeldmessung nun durch das zuvor beschriebene probabilistische Auswertekonzept ersetzt werden. Die Daten der Potentialfeldmessung können in die probabilistische Zustandsbewertung integriert werden.

Weiterer Forschungsbedarf besteht bei der Beschreibung der räumlichen Streuungen. Der Ansatz der Gaußschen Zufallfelder (random fields) ist zu untersuchen, bzw. die dafür nötigen Korrelationslängen der dominanten Parameter zu Beschreibung der räumlichen Streuungen sind zu quantifizieren. Jedoch kann nicht nur der Schädigungsprozess räumliche Korrelationen aufweisen auch die Messverfahren an sich, sind auf ihre räumliche Charakteristik hin zu untersuchen.

Neben der Potentialfeldmessung und der Betondeckungsmessung ist es oft sinnvoll, noch weitere Daten am Bauwerk zu gewinnen, z. B. Chloridprofilentnahme, visuelle Inspektion, etc.. Zur Implementierung dieser Informationen in das vorgestellte probabilistische Auswertekonzept bieten sich beispielsweise Bayes'sche Netzwerke [Je01] an.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die Vorhersage von Schädigungsprozessen infolge von Bewehrungskorrosion in Stahlbetonbauwerken ist mit großen Unsicherheiten behaftet. Korrosion führt zwar sehr langsam aber stetig zu einem Verlust der Dauerhaftigkeit bis hin zur Tragfähigkeit und somit zu einer steigenden Versagenswahrscheinlichkeit im Laufe der Zeit. Der sichere Betrieb eines korrodierenden Bauwerkes erfordert Inspektionen und Instandhaltungen, deren primäres Ziel ist, das Ausfallrisiko des Bauwerkes unter Kontrolle zu halten. Für die Festlegung von optimalen Inspektionsintervallen ist die Wahl des Inspektionsverfahren und dessen Prüfqualität von Bedeutung. Die Vernachlässigung der Unsicherheiten aus der Inspektion kann zu fehlgeleiteten Entscheidungen führen, die entweder unnötige Instandsetzungen verursachen oder zu Schäden mit erhöhten Kosten in der Instandsetzung.

Die Potentialfeldmethode ist die meist angewandte, zerstörungsfreie Prüfmethode zur Detektion von korrosionsgefährdeten Bereichen in Stahlbetonbauwerken. Ziel dieser Arbeit war die Analyse der mit dieser Inspektionsanalyse verknüpften Prüfqualität. Die Prüfqualität, die Probability of Detection (POD), wird in Abhängigkeit der Defektgröße, die im Fall der Potentialfeldmessung der Anodenfläche entspricht, ausgedrückt. Wird die Messmethode von weiteren Einflussfaktoren maßgeblich bestimmt, so sollte die POD auch in Abhängigkeit dieser Einflussfaktoren ausgedrückt werden. Versuche an praxisnahen, korrodierenden Bauteilen (Kapitel 6) und numerische Parameterstudien (Kapitel 5) haben gezeigt, dass die POD der Potentialfeldmessung neben der Anodenfläche auch in Abhängigkeit von Elektrolytwiderstand und Messraster auszuwerten sind. Dies hat sich bei der Auswertung der POD-Kurven in Kapitel 7 bestätigt. Die Durchführung der Potentialmessung hat einen größeren Einfluss als die Materialeigenschaften des untersuchten Objektes. Dies bedeutet, dass nun auf Grundlage der POD-Kurven die gewünschte Aussagegenauigkeit der Potentialfeldmessung mit Wahl des Messrasters festgelegt werden kann. Die berechneten POD-Kurven sind aber nur für rissfreien Beton gültig.

Die in dieser Arbeit ermittelten POD-Kurven beruhen auf einem numerischen Modell, in dem der dominante Einflussparameter Elektrolytwiderstand homogen ist. Es ist anzunehmen, dass mit steigender Inhomogenität des Elektrolytwiderstandes (bspw. aufgrund von karbonatisierten Randschichten, Feuchteunterschieden, Rissen etc.) sich die Probability of Detection verschlechtert. Weiterer Forschungsbedarf ist bei der Abhängigkeit der Ruhepotentiale vom Elektrolytwiderstand gegeben, damit die numerischen Eingabeparameter optimiert werden können.

Laut Warkus [Wa12] hat die Geometrie einen Einfluss auf das Makrozellelement. Als Folge muss die Geometrie auch einen Einfluss auf die Potentialverteilung in einem Elektrolyten haben und somit auf die POD der Potentialverteilung. Neben der Variation der Bauteilgeometrien (z. B. Stütze) sind auch weitere Geometrieparameter (z. B. Anoden/ Kathodenverhältnis, Bewehrungsdichte, etc.) zu untersuchen. Diese Untersuchungen können zum Teil auch numerisch durchgeführt werden, jedoch sind auch ergänzende experimentelle Untersuchungen zur Zuschärfung der POD notwendig.

Experimente an Proben mit bekannten Defekten, die für eine POD-Analyse benötigt werden, sind, wie im Fall der Potentialfeldmessung, oft nur unter großem Zeitaufwand und mit erheblichen Kosten durchzuführen. Simulationen des Inspektionsprozesses vereinfachen die POD-Analyse und können das Verständnis für den elektrochemischen Hintergrund der Messung fördern. Jedoch wird die

Aussagefähigkeit der POD rein auf Basis numerischer Daten als beschränkt betrachtet [Pa12]. Aber sie bietet erste Informationen zur Prüfqualität eines qualitativen Messverfahrens. Es ist davon auszugehen, dass die numerisch generierte POD aufgrund der Homogenität im Modell den unteren Bereich der Prüfqualität abgrenzt, da eine POD auf Basis künstlicher oder realer Defekte höhere Streuungen aufweist.

Die Prüfaussagen aus einer Potentialfeldmessung dienen zunächst zur Abschätzung der Dauerhaftigkeit eines Stahlbetonbauwerkes und werden meist mit weiteren Ergebnissen aus visueller Inspektion, Chloridprofilentnahme und auch der Betondeckungsmessung ergänzt. Dadurch, dass die Ergebnisse einer Potentialfeldmessung i. d. R. nicht für standsicherheitsrelevante Fragestellungen herangezogen werden, ist die Verwendung der numerisch generierten $POD_{\text{numerisch}}$ trotz ihrer Einschränkungen zulässig.

Einem auf dieser Arbeit aufbauenden Schritt ist die Entwicklung einer POD auf Basis künstlicher Defekte. Im Fall der Potentialfeldmessung können dies unterschiedliche Anodenflächen in Stahlbetonprüfkörpern sein, die durch äußere Polarisierung anodisches Verhalten aufweisen. Diese $POD_{\text{künstlich}}$ entsteht praktisch unter Laborbedingungen. Jedoch sind die Bedingungen am Bauwerk während einer Inspektion als schwieriger anzusehen und mit größeren Unsicherheiten bei der Fehlerdetektion behaftet. Eine weitere Analyse einer POD ist notwendig, eine POD_{real} , die auf Basis realer Fehler an Bauwerken entsteht.

Die Daten aus den unterschiedlich generierten $POD_{\text{numerisch}}$, $POD_{\text{künstlich}}$ und POD_{real} sind nicht direkt mischbar. Sie können aber auf Basis der Bayes'schen Statistik miteinander zur einer finalen POD verknüpft werden [Ka13].

Innerhalb der Experimente zur POD_{real} kann auch der Faktor Mensch berücksichtigt werden, der in numerisch generierten POD's unbeachtet bleibt. Es ist davon auszugehen, dass wie in den meisten anderen qualitativen Messmethoden [Br00, Mü03] auch der Prüfer bei der Potentialfeldmessung einen entscheidenden Einfluss auf die Prüfqualität ausübt. Untersuchungen von Bertovic et al. [Be13] haben gezeigt, dass bspw. Messungen unter Zeitdruck und unter starker Arbeitsbelastung die Prüfqualität verschlechtern können. Ebenso hatte die Arbeitskonstellation, ob Single- oder Teamarbeit, Einfluss auf die POD.

In dieser Arbeit basieren die POD-Kurven auf dem Hit-Miss Modell. Für die Verwendung des a vs. \hat{a} Modells fehlte die Homogenität der Varianzen in Abhängigkeit der Defektgröße. Es ist zu untersuchen, ob die Streuung der Varianzen mittels Log-Transformationen oder durch Wahl einer geeigneten gewichteten Fehlerquadratminimierung soweit vereinheitlicht werden können, dass auch POD-Kurven der Potentialfeldmessung auf Basis des a vs. \hat{a} Modells aufgestellt werden können.

Der Schädigungsprozess der Bewehrungskorrosion in Stahlbetonbauwerken ist räumlichen Streuungen unterworfen. Aufgrund der räumlichen Streuung der Anodenflächen [KeHu10; KeHu11] ist nach Schoefs et al. [Sch09] anzunehmen, dass auch die Probability of Detection räumliche Abhängigkeiten aufweist. Die räumliche Streuung der POD der Potentialfeldmessung ist zukünftig zu untersuchen.

Literaturverzeichnis

- [An96] Andrade, C.; Alonso, C.; Feliu, S.; Gonzales, J.A.: On-Site Measurement of the Corrosion Rate. Barcelona : CIMNE, International Center for Numerical Methods in Engineering, 1996. In: Recent Advances in Bridge Engineering: Evaluation, Management and Repair; Proceedings of the US-Europe Workshop on Bridge Engineering, organized by the Technical University of Catalonia and the Iowa State University, Barcelona, 1996, (Casas, J.R. (Ed.)), S. 352-366
- [An09] Angst, U.; Vennesland, O.; Myrdal, R.: Diffusion potentials as source of error in electrochemical measurements in concrete. In: Materials and Structures 42, 365-375, 2009
- [An10] Angst, U.; Elsener, B.; Larsen, C.; Vennesland, O.: Potentiometric determination of the chloride ion activity in cement based materials. In: Journal of Applied Electrochemistry 40 (2010) 561–573
- [AnVe09] Angst, U.; Vennesland, Ø: Detecting critical chloride content in concrete using embedded ion selective electrodes – effects of liquid junction and membrane potentials. In: Materials and Corrosion 2009, 60, No.8
- [ArSö92] Arup, H.; Sörensen, B.: Corrosion (NACE) paper 208, 1992
- [As08] Assouli, B.; Ballivy, G.; Rivard, P.: Influence of environmental parameters on application of standard ASTM C876-91: half-cell potential measurements. In: Corrosion Engineering, Science and Technology Vol. 43, No1. 2008
- [ASTMC876] ASTM C876 -09, 2009: Standards Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel, Concrete American Society for Testing and Materials
- [ASTM12] ASTM E2862 – 12, 2012: Standard Practice for Probability of Detection Analysis for Hit/Miss Data
- [Ba79] Bazant, Z.P.: Physical Model for Steel Corrosion in Concrete Sea Structures—Theory. In: Journal of the Structural Division, Vol. 105, No. 6, June 1979, pp. 1137-1153
- [Be04] Bertolini L.; Elsener B.; Pedferri P.; Polder R.B.: Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004
- [Be10] Beck, M.: Zur Entwicklung der Eigenkorrosion von Stahl in Beton, Diss. RWTH Aachen, 2010
- [Be12] Beck, M.; Burkert, A.; Harnisch, J.; Isecke, B.; Osterminski, K.; Raupach, M.; Schießl, P.; Tian, W.; Warkus, J.: Deterioration model and input parameters for reinforcement corrosion. In: Structural Concrete 13 (2012), No. 3, 145-155
- [Be13] Bertovic, M.; Fahlbruch, B.; Müller, C.: Human Factors Perspective on the Reliability of NDT in Nuclear Application. In: Materials Testing 55 (2013) 4
- [BEA12] BEASY, BEASY CP 8.1 Userguide, Computational Mechanics, 2012
- [BöE191] Böhni, H.; Elsener, B.: Früherkennung von Bewehrungskorrosion: Potentialfeldmessung und galvanostatische Impulstechnik. Symposium zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen der DGZfP, Berlin S. 101-122, 1991

- [Breb84] Brebbia, C.A.; Telles, J.C.F.; Wrobel, L.C: Boundary Element Techniques – Theory and application in engineering. Springer Verlag 1984.
- [Br89] Berens, A.P.: NDE Reliability Analysis, Metals Handbook Volume 17, 9th Edition: Nondestructive Evaluation and Quality Control, University of Dayton Research Institute, ASM International, 1989
- [Br00] Berens, A.P.: Probability of Detection (POD) Analyses for the advanced retirement for cause (RFC) Engine structural integrity program (ENSIP) nondestructive evaluation (NDE) system development, Volume 1 POD Analysis, 2000
- [Br04] Brem, M.: Numerische Modellierung der Korrosion in Stahlbetonbauten. Anwendung der Boundary Element Methode. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2004.- Diss. ETH Nr. 15567
- [Bü96] Büchler, D.: Der elektrische Widerstand von zementösen Werkstoffen: Modell, Einflussgrößen und Bedeutung für die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton, Diss ETH Nr. 11876, (1996), ETH Zürich, Zürich.
- [BüSc07] Büchler, M.; Schiegg, Y.: Untersuchungen zur Potenzialfeldmessung an Stahlbetonbauten, SGK, Schweizer Gesellschaft für Korrosionsschutz, Zürich, 2007
- [DAfStb08] Positionspapier des DAfStb zur Umsetzung des Konzepts von leistungsbezogenen Entwurfsverfahren unter Berücksichtigung von DIN EN 206-1, Anhang J. In: Beton- und Stahlbetonbau 103 (2008), Heft 12
- [DIN87] DIN 55 350-13: Juli 1987: Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik, Begriffe zur Genauigkeit von Ermittlungsverfahren und Ermittlungsergebnissen
- [DIN97] DIN ISO 5725: November 1997: Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen
- [DIN02] DIN 50900-2: Juni 2002: Korrosion der Metalle: Begriffe, Teil 2: Elektrochemische Begriffe
- [DIN08] DIN 1045: August 2008: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton
- [DMB314] DGZfP Merkblatt B3: Elektrochemische Potentialmessungen zur Detektion von Bewehrungsstahlkorrosion, 2014
- [Do89] Dorner, H.: Anleitung zur Bestimmung des Chloridgehaltes von Beton, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 401, Berlin, 1989
- [El01] Elsener, B. 2001: Half-cell potential mapping to assess repair work on RS structures. In: Construction and Building Materials 15 133-139
- [ElBö87] Elsener B.; Böhni, H.: Location of corrosion in reinforced concrete: potential mapping – possibilities and limitations, Schweizer Ingenieur und Architekten 105 (1987) 528-533
- [ElBö92] Elsener, B.; Böhni, H. 1992: Electrochemical methods for the inspection of reinforcement corrosion in concrete structures – field experience. In: Materials Science Forum Vol. 111-112 pp. 635-646, Trans Tech Publications, Switzerland.

- [ElBö97] Elsener, B.; Böhni, H.: Half-cell potential measurements - From theory to condition assessment of RC structures. In: Proc. Int. Conference "Understanding Corrosion Mechanisms of Metals in Concrete - A Key to improving Infrastructure Durability", Massachusetts Institute of Technology, MIT (Cambridge, USA) 27-31 July 1997
- [Fa06] Fawcett, T.: An introduction to ROC analysis. In: Pattern Recognition Letters 27 (2006) 861-874
- [Fe12] Feistkorn, S.: Gütebewertung qualitativer Prüfaufgaben in der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen am Beispiel des Impulsradars. In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 603, Beuth Verlag, Berlin (2012), Dissertation
- [FaGe02] Faber, M.H., Gehlen, C.: Probabilistischer Ansatz zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von bestehenden Stahlbetonbauten. In: Beton- und Stahlbetonbau 97, Heft 8, 421-429, 2002
- [FaSo02] Faber, M.H.; Sorensen J.D.: Indicators for inspection and maintenance planning of concrete structures, In: Structural Safety 24, 377-396, 2002
- [FaSt06] Faber, M.H.; Straub, D.; Maes; M.A.: A computational framework for risk assessment of RC structures using indicators. In: Comput-Aided Civ. Inf. 2006; 21:216–30
- [FIB06] Schießl, P.; Bamforth, P.; Baroghel-Bouny, V.; Corley, G.; Faber, M.; et al.: Model code for service life design. Fib Bull 2006:34.
- [FIB11] Gehlen, C. et al.: Condition Control and Assessment of Reinforced Concrete Structures Exposed to Corrosive Environments (Carbonation / Chlorides), fib bulletin 59, 2011
- [FiSt11] Fischer, J.; Straub, D.: Reliability assessment of corroding reinforced concrete slabs with inspection data. In: 9th international probabilistic workshop Braunschweig; 2011.
- [Ga05] Garcés, P.; Andrade, C.; Saez, A.; Alonso, M.C.: Corrosion of reinforcing steel in neutral and acid solutions simulating the electrolytic environments in the microspores of concrete in the propagation period. In: Corrosion Science 47 (2005) 289–306
- [Ge00] Gehlen, C.: Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken – Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion Dissertation, RWTH Aachen, 2000
- [Ge06] Georgiou, G.A.: Probability of Detection (PoD) curves - Derivation, applications and limitations. Prepared by Jacobi Consulting Limited for the Health and Safety Executive 2006, RESEARCH REPORT 454
- [GeGr10] Gehlen, C.; von Greve-Dierfeld, S.: Optimierte Zustandsprognose durch kombinierte Verfahren. In: Beton- und Stahlbetonbau 105, Heft 5, 2010
- [GeKa04] Gehlen, C.; Kapteina, G.: Updating of Sensitive Variables through Measurement. DARTS-Durable and Reliable Tunnel Structures, European commission, Growths 2000, Contract G1RD-CT-2000-00467, Project GrD1- 25633, 2004
- [GeIs07] Ge, J.; Isgor O.B.: Effects of Tafel slope, exchange current density and electrode potential on the corrosion of steel in concrete. In: Materials and Corrosion 2007, 58, No. 8
- [Gr86] Grimaldi, G.; Brevet, P.; Pannier, G.; Raharinaivo, A.: Factors influencing electrode potential of steel in concrete. In: Br. Corros. J. Vol.21 No.I, 1986

- [Gu03] Gulikers, J.: Problems encountered in the detection of reinforcement corrosion in concrete tunnel linings – theoretical considerations. In: *Materials and Corrosion* 54, 545-459, 2003
- [GuEl09] Gulikers, J.; Elsener, B.: Development of a calculation procedure for the statistical interpretation of the results of potential mapping performed on reinforced concrete structures. In: *Materials and Corrosion* 2009, 60, No. 2
- [GuRa06] Gulikers J.; Raupach M.: Numerical models for the propagation period of reinforcement corrosion - Comparison of a case study calculated by different researchers. In: *Materials and Corrosion* 2006, 57, No. 8
- [Ha12] Harnisch, J.: Zeitabhängige Kenngrößen bei der chloridinduzierten Korrosion, Diss. RWTH Aachen, 2012
- [HaVi98] Hamann, C.H.; Vielstich, W.: *Elektrochemie* 3. Auflage Weinheim: Wiley-VCH, 1998
- [He92] Hergenröder M.: Zur Statistischen Instandhaltungsplanung für bestehende Bauwerke bei Karbonatisierung des Betons und möglicher Korrosion der Bewehrung. *Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau* 4/92. TU München; 1992.
- [Ho97] Hong, H.P.: Reliability with non-destructive inspection. In: *Structural Safety* Vol. 19, No. 4, pp. 383-395, 1997
- [Ho12] Hornbostel, K.; Larsen, C.K.; Geiker, M.R.: Relationship between concrete resistivity and corrosion rate – a literature review. In: *Proceedings International Conference on Durability of concrete*, Trondheim, 2012
- [Jä01] Jäggi, S.: Experimentelle und numerische Modellierung der lokalen Korrosion von Stahl in Beton unter besonderer Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit. Diss. ETH Nr. 14058, (2001), ETH Zürich, Zürich.
- [Je01] Jensen, F.V.: *Bayesian Networks and Decision Graphs*. Springer-Verlag, New York 2001
- [Ka13] Kanzler, D.; Müller, C.; Ewert, U., Pitkänen, J.: Einsatz der Bayes'schen Statistik in der Zuverlässigkeitsbestimmung von zerstörungsfreien Prüfsystemen. In: *Materials Testing* 55, S. 254-260, 2013
- [Kaes03] Kaesche, H.: *Corrosion of Metals*, (2003), Berlin, Springer Verlag.
- [KeEb11] Keßler, S.; Ebell, G.; Gehlen, C.; Burkert, A.: Die Aussagegenauigkeit der Potentialfeldmessung. In: *Beton- und Stahlbetonbau* Volume 106, Issue 7 481–489, 2011.
- [KeFi12] Keßler, S; Fischer, J.; Straub, D.; Gehlen, C.: Updating of service life prediction of reinforced concrete structures with potential mapping. *ICDC, International conference on durability of concrete*, Trondheim Norway June 18-21, 2012
- [KeFi14] Keßler, S.; Fischer, J.; Straub, D.; Gehlen, C.: Updating of service-life prediction of reinforced concrete structures with potential mapping. In: *Cement & Concrete Composites* 47 (2014) 47–52
- [KeGe10] Keßler, S.; Gehlen, C.: Potential mapping - Possibilities and limits. In: *8th fib PhD Symposium* 20-23 June 2010 in Lyngby, Denmark.

- [KeHu10] Keßler, S.; Huber, M.; Straub, D.; Gehlen, C.; Moormann, C.: Stochastic evaluation of active corroding areas in concrete structures. In: 8th Int. Probabilistic Workshop, 18./19.11.2010, Szczecin, Poland.
- [KeHu11] Keßler, S.; Huber, M.; Straub, D.; Gehlen, C.: Spatial variability of potential fields in reinforced concrete structures. In: ICASP, 01.-04.08.2011, Zürich.
- [KeGe12] Keßler, S.; Gehlen, C.: The impact of resistivity on potential mapping. Proceedings of IALCCE 2012 (International Association for Life-Cycle Civil Engineering), 2013 Taylor & Francis Group, 2012 The third Symposium of the IALCCE series, the International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering 2012, 3.-6.10.12, Wien, Austria
- [KeGe13] Keßler, S.; Gehlen, C.: Studie zur Potentialfeldmessung an 40 Jahre alten Stahlbetonbauteilen vom Olympiastadion München - Einfluss des Elektrolytwiderstands und des Messrasters. In: Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013), Heft 9
- [KrSa01] Kranc, S.C.; Sagüés, A.A.: Detailed modeling of corrosion macrocells on steel reinforcing in concrete. In: Corrosion Science 43 (2001) 1355-1372
- [Le01] Lentz, A.: Potentialmessungen zur Unterhaltungsplanung bei Stahlbetonbauten. Diplomarbeit, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, 2001
- [Li04] Li, Y.; Vrouwenvelder, T.; Wijnants, G.H.; Walraven, J.: Spatial variability of concrete deterioration and repair strategies. In: Struct Concr 2004;5(3):121–9.
- [LoSi80] Locke, C.; Siman, A.: Electrochemistry of Reinforcing Steel in Salt-Contaminated Concrete. In: STP 713 Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete (ASTM International), 1980
- [Ma02] Maes, M.A.: Updating performance and reliability of concrete structures using discrete empirical Bayes methods. In: J Offshore Mech Arct Eng 2002;124(4):239–46
- [Ma09] Malioka, V.: Condition indicators for the assessment of local and spatial deterioration of concrete structures. Diss ETH No. 18333, ETH Zürich; 2009
- [Me94] Menzel, K.; Freitag, P.; Sonnentag, D.: Advanced techniques for corrosion monitoring of steel in concrete. Otto Graf Journal, 1994
- [MePr89] Menzel, K.; Preusker, H.: Potentialmessung: Eine Methode zur zerstörungsfreien Feststellung von Korrosion an der Bewehrung. In: Bauingenieur 64, 181-186, 1989
- [MIL98] MIL-HDBK-5H, Military Handbook: Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures, 1998
- [MIL09] MIL-HDBK-1823A, Department of Defence Handbook, Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment. 7. April 2009
- [Mü03] Müller, Ch. et al: Performance demonstration for humanitarian demining. In: MP Materialprüfung Jahrg. 45, Carl Hanser Verlag, München, 2003
- [Mü09] Müller, C.; Bertovic, M.; Gaal, M.; Heidt, H.; Pavlovic, M.; Rosenthal, M.; Takahashi, K.; Pitkänen, J.; Ronneteg, U.: Progress in Evaluating the Reliability of NDE Systems – Paradigm Shift, Proceedings of the 4th European-American Workshop on Reliability on NDE, Berlin, 2009

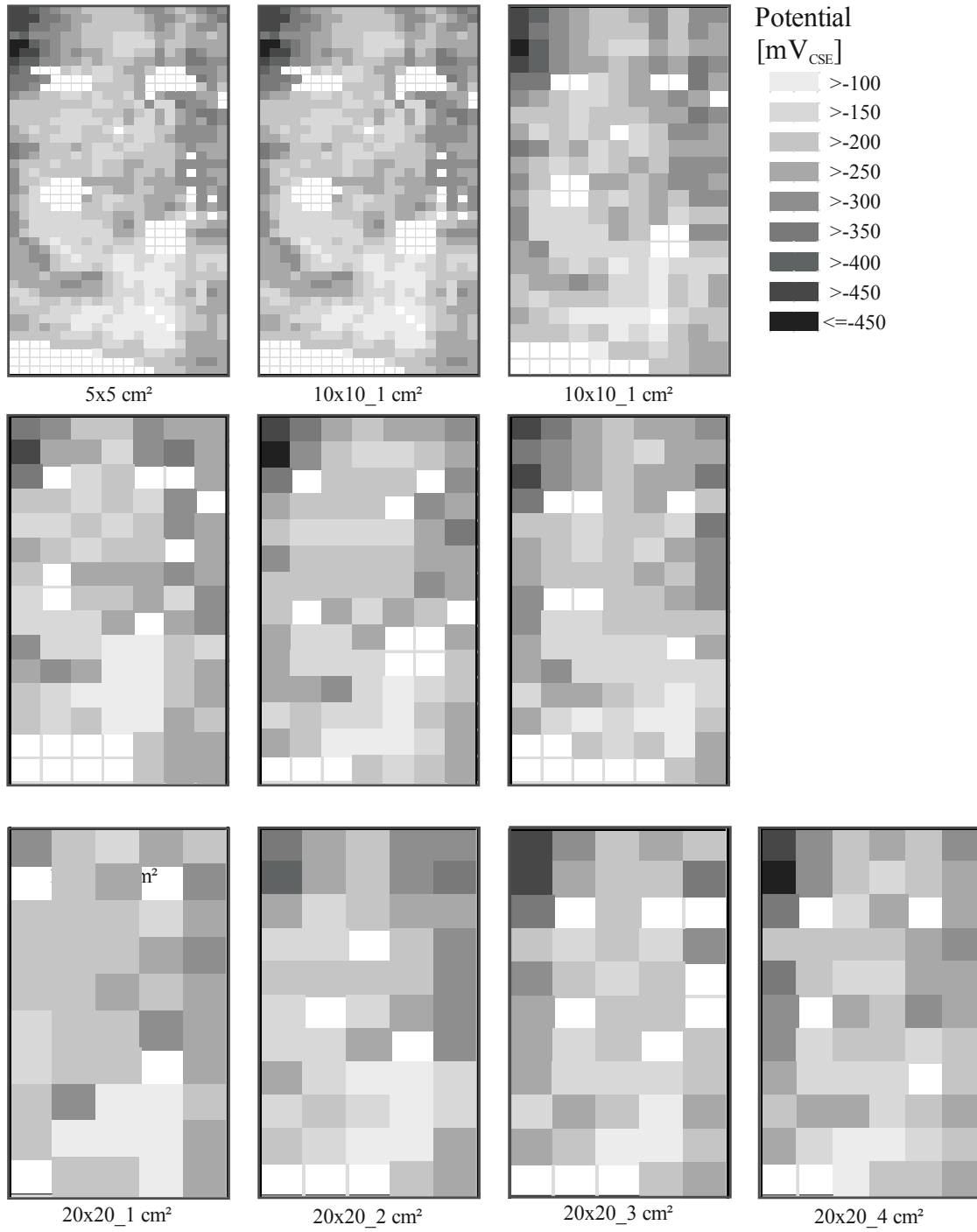
- [My96] Myrdal, R.: Corrosion (NACE) paper nr. 339 (1996)
- [Na90] Naish, C.C.; Harker, A.H.; Carney, R.F.A: Concrete Inspection - Interpretation of Potential and Resistivity Measurements. In: Page, CL and Treadaway, KWJ and Bamforth, PB, (eds.) (Proceedings) 3rd International Symposium on Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, Wishaw, England, 1990. (pp. 314 - 332), 1990
- [Nö90] Nöggerath, J.: Zur Makroelementkorrosion von Stahl in Beton. Dissertation ETH Nr. 9310, 1990
- [Nü91] Nürnberger, U.: Betontechnologische Einflüsse auf Stahl/Beton-Potentiale. Symposium zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen der DGZfP, Berlin S. 312-217, 1991
- [Nü95] Nürnberger, U.: Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen. Band 1: Grundlagen, Betonbau. Band 2: Metallbau, Korrosionsprüfung. Bauverlag, 1995
- [Or94] Oreskes, N.; Shrader-Frechette, K.; Belitz, K.: Verification, Validation, and Confirmation on Numerical Models in the Earth Sciences. In: Science Vol. 263, 1994
- [Os12] Osterminski, K.; Tian, W.; Schießl P.; Gehlen C.: Elektrolytwiderstand von Beton und Korrosion in gerissenem Beton. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. (Hrsg.): Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonbauteilen auf Bewehrungskorrosion. Beuth Verlag, 2012, S. 101-118, 2012
- [OsPoSc12] Osterminski, K.; Polder, R.B.; Schießl, P.: Long term behavior of the resistivity of concrete. In: HERON Vol. 57 (2012) No. 3
- [Os13] Osterminski, K.: Zur voll-probabilistischen Modellierung der Korrosion von Stahl in Beton - Ein Beitrag zur Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonbauteilen, TU München Diss., 2013
- [Ou05] Ouglova, A.; Raharinaivo, A.; Berthaud, Y.; Petre-Lazar, I.; Boukhenfouf, H.: Numerical simulation of potential distribution due to the corrosion of reinforcement in concrete structures. In: Materials and Structures 38 (2005) 711-719
- [Pa12] Pavlovic, M.; Takahashi, K.; Müller, C.: Probability of detection as a function of multiple influencing parameters. In: Insight Vol 54 No 11 November 2012
- [PaTr82] Page, C.L.; Treadaway, K.W.J.: Aspects of the electrochemistry of steel in concrete. In: Nature Vol. 297, page 109, 1982
- [PGIG09] Pour-Ghaz, M.; Isgor O.B.; Ghods, P.: Quantitative Interpretation of Half-Cell Potential Measurements in Concrete Structures. In: J. Mater. Civ. Eng. 2009.21:467-475
- [Po01] Polder, R.B.: Test methods for onsite measurement of resistivity of concrete - a RILEM TC-154 technical recommendation. In: Construction and Building Materials 15 2001. 125-131
- [Pou63] Pourbaix, M.: Atlas d'équilibres électrochimiques. Paris: Gauthier-Villars & Cie, 1963
- [PoHa09] Poursaeae, A.; Hansson, C.M.: Potential pitfalls in assessing chloride-induced corrosion of steel in concrete. In: Cement and Concrete Research 39 (2009) 391-400

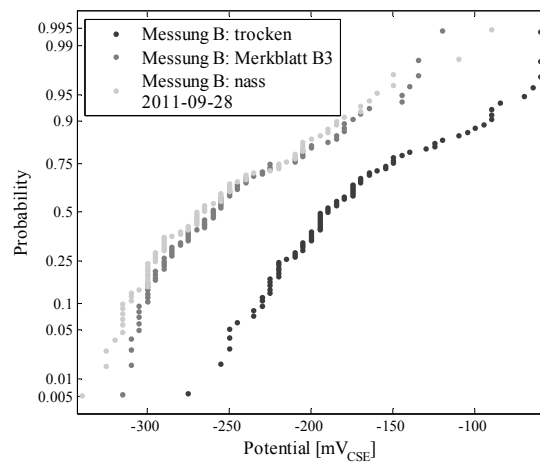
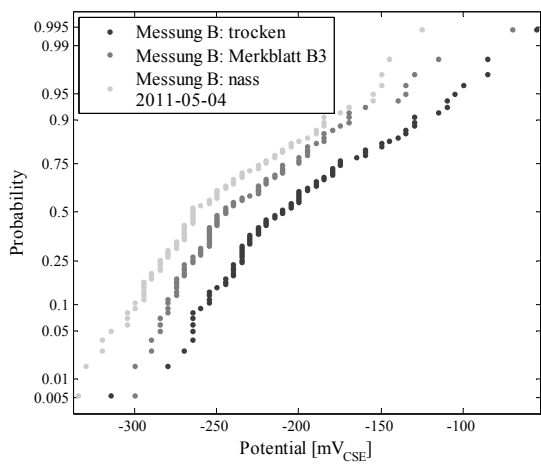
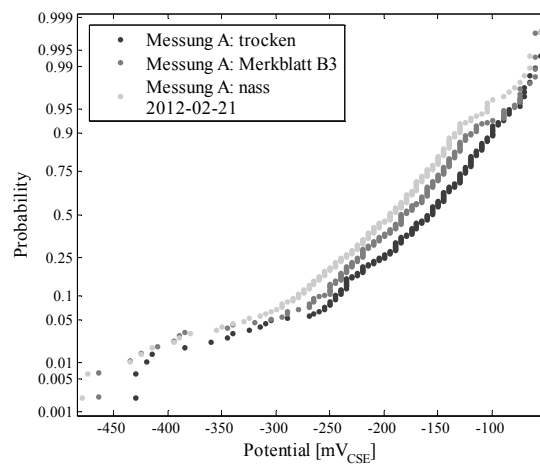
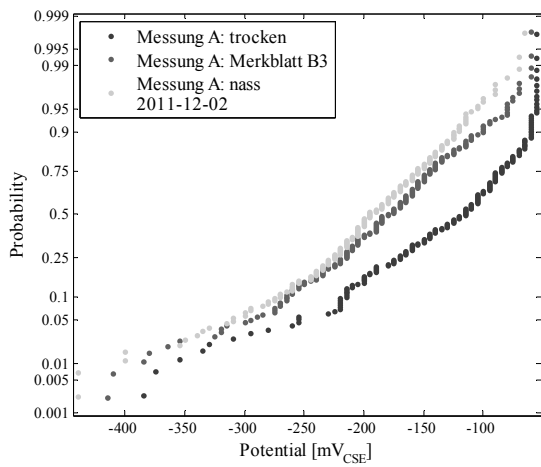
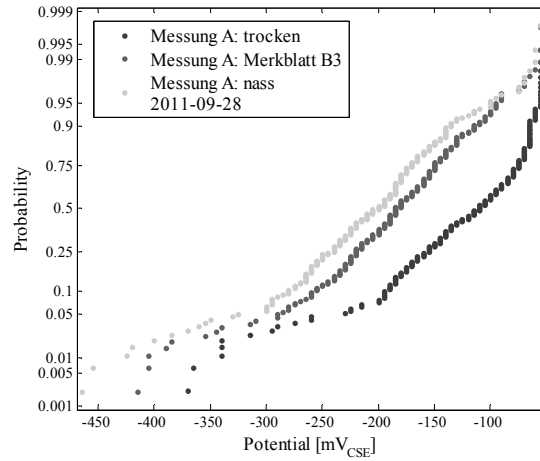
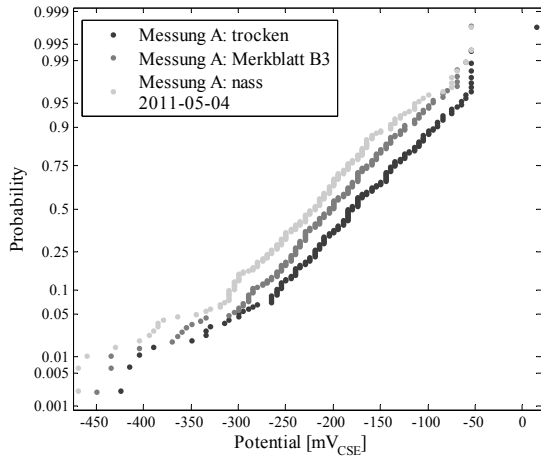
- [PoKe91] Polder, R.B.; Ketelaars, M.: Electrical resistance of blast furnace slag cement and ordinary Portland cement concretes. In: Swamy RN. Editor. Proc. of the Int. Conf. on Blended Cements in Construction. Sheffield, 1991:401–15.
- [Pou09] Pour-Ghaz, M.; Isgor, O.B.; Ghods, P.: The Effect of temperature on the corrosion of steel in concrete. Part 1: Simulated polarization resistance tests and model development. In: Corrosion Science 51 (2009) 415-425
- [Ra92] Raupach, M.: Zur chloridinduzierten Makroelementkorrosion von Stahl in Beton. Berlin: Beuth. Schriftenreihe des deutschen Ausschusses für Stahlbeton Nr. 433 = Diss, 1992
- [RaGu01] Raupach, M.; Gulikers, J.: Zum Einfluss der kathodischen Reaktion auf die chloridinduzierte Bewehrungskorrosion. In: Materials and Corrosion 52, 766-770 (2001)
- [RITC03] Elsener, B.; Andrade, C.; Gulikers, J.; Raupach, M.: Half-Cell Potential Measurements - Potential Mapping on Reinforced Concrete Structures; RILEM TC 154-EMC. In: Materials and Structures (RILEM) 36 (2003), Nr. 261, S. 461-47
- [RoScho03] Rouhana, A.; Schoefs, F.: Probabilistic modeling of inspection results for offshore structures. In: Structural Safety 25 (2003) 379–399
- [Schi07] Schiegg, Y.; Büchler, M.; Brem, M.: Potential mapping technique for the detection of corrosion in reinforced concrete structures: Investigation of parameters influencing the measurement and determination of the reliability of the method, EUROCORR, 2007
- [Schi08] Schiegg, Y.; Büchler, M.; Brem, M.: Potential mapping technique for the detection of corrosion in reinforced concrete structures: Investigation of parameters influencing the measurement and determination of the reliability of the method. In: Materials and Corrosion. Volume 60, Issue 2, 2009
- [Scho09] Schoefs, F.; Clément, A.; Nouy, A.: Assessment of ROC curves for inspection of random fields. In: Structural Safety 31 (2009) 409–419
- [SchoTr11] Schoefs, F.; Tran, T.V.; Bastidas-Arteaga, E.: Optimization of inspection and monitoring of structures in case of spatial fields of deterioration properties. In: Proceeding ICASP, Zürich; 2011.
- [SIAM13] SIA Merkblatt 2006: Planung, Durchführung und Interpretation der Potentialfeldmessung an Stahlbetonbauten, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, 2013
- [So02] Sodeikat, C.; Gehlen, C.; Schießl, P.: Auffinden von Bewehrungskorrosion mit Hilfe der Potentialfeldmessung. In: Beton- und Stahlbetonbau 97, Heft 9, 2002
- [St73] Stratfull, R.: Half-cell potentials and the corrosion of steel in concrete, Washington National Research Council. In: Highway Research Record Nr.433 p. 12-21, 1973
- [St11] Straub, D.: Spatial reliability assessment of deteriorating reinforced concrete surfaces with inspection data. In: Proceeding ICASP, Zürich; 2011
- [StMa09] Straub, D.; Malioka, V.; Faber, M.H.: A framework for the asset integrity management of large deteriorating concrete structures. In: Struct Inf Eng 2009; 5(3):199–213

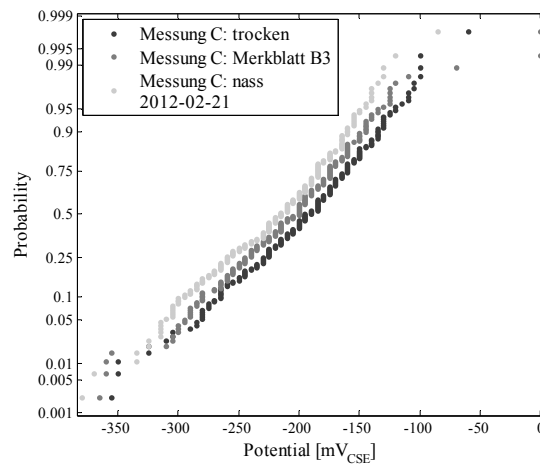
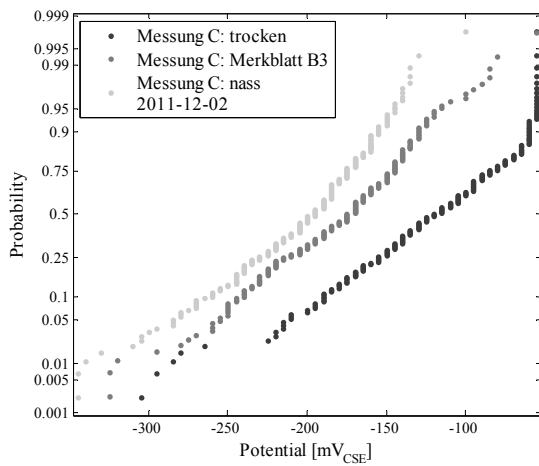
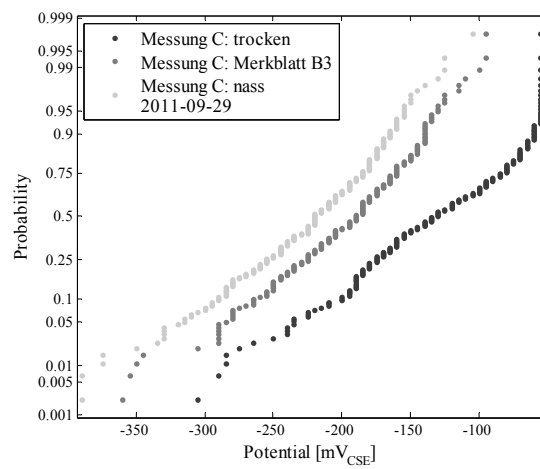
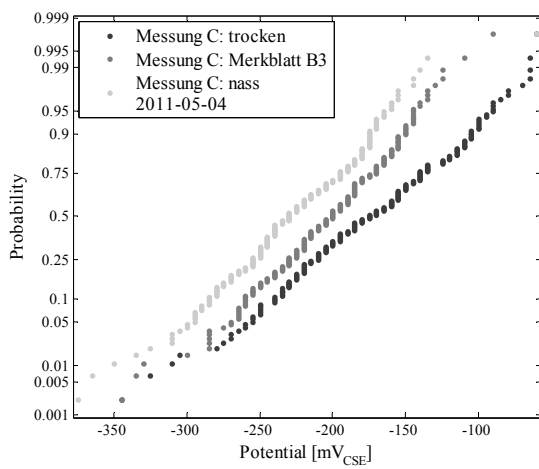
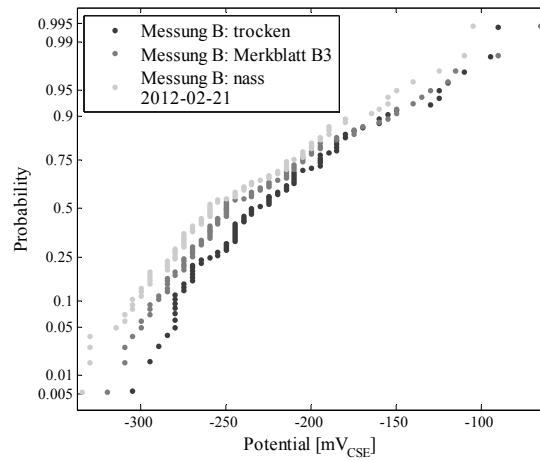
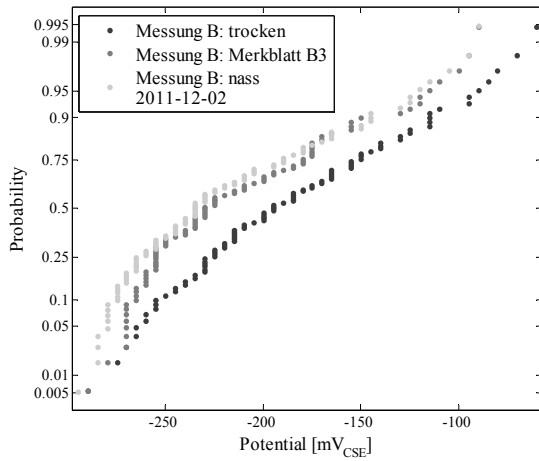
- [StMu07] Stewart, M.G.; Mullard, J.A.: Spatial time-dependent reliability analysis of corrosion damage and the timing of first repair for RC structures. In: Eng Struct 2007; 29(7):1457–64
- [Stre84] Streblow, H.H.: Breakdown of passivity and localized corrosion: Theoretical concepts and fundamental experimental results. In: Werkstoffe und Korrosion 35, 437-448, 1984
- [Ta08] Taffe, A.: Zur Validierung quantitativer zerstörungsfreier Prüfverfahren im Stahlbetonbau am Beispiel der Laufzeitmessung. In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 574, Beuth Verlag, Berlin (2008), Dissertation
- [TaFe13] Taffe, A.; Feistkorn, S.: Methoden zur Gütebewertung von ZfPBau-Verfahren. In: Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013), Heft 4, 237-251
- [WaRa10] Warkus, J.; Raupach, M.: Modelling of reinforcement corrosion – geometrical effects on macrocell corrosion. In: Materials and Corrosion 2010, 61, No. 6
- [Wa12] Warkus, J.: Einfluss der Bauteilgeometrie auf die Korrosionsgeschwindigkeit von Stahl in Beton bei Makroelementbildung, Dissertation RWTH Aachen, 2012
- [Wo97] Wojtas, H.: Elektrochemische, zerstörungsfreie Prüfmethode und Qualitätssicherung bei Instandsetzung von Stahlbetonbauten. In: Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen, 3. Jahrgang 581-602, 1997
- [Za09] Zhang, X.L.; Jiang, Z.H.; Yao, Z.P.; Song, Y.; Wu, Z.D.: Effect of scan rate on the potentiodynamic polarization curve obtained to determine the Tafel slopes and corrosion current density. In: Corrosion Science 51 (2009) 581-587

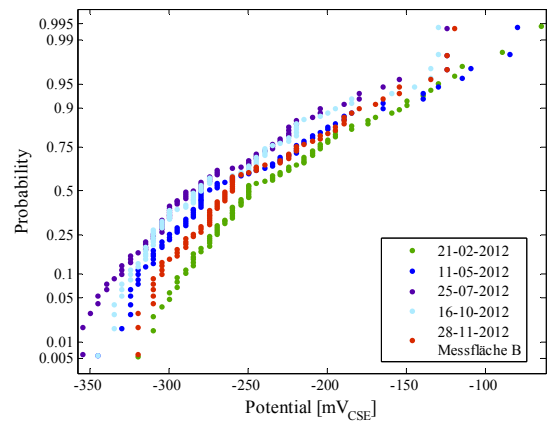
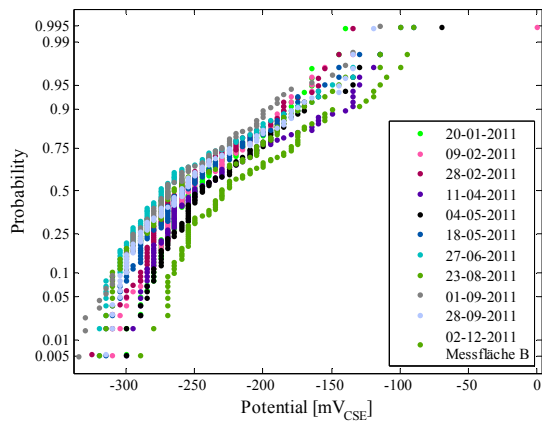
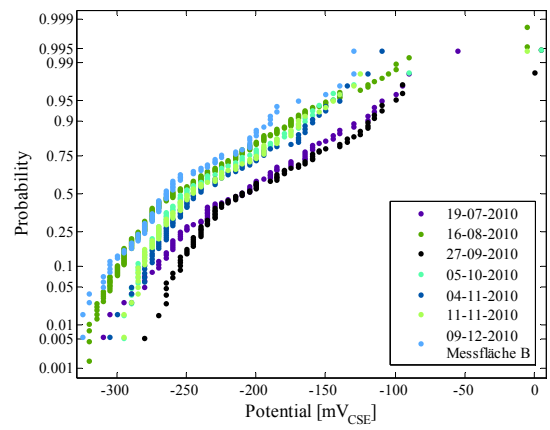
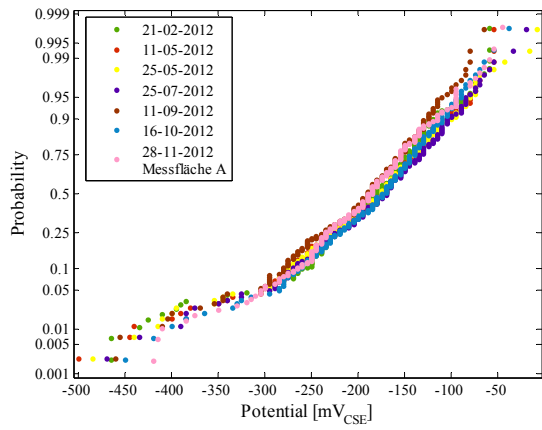
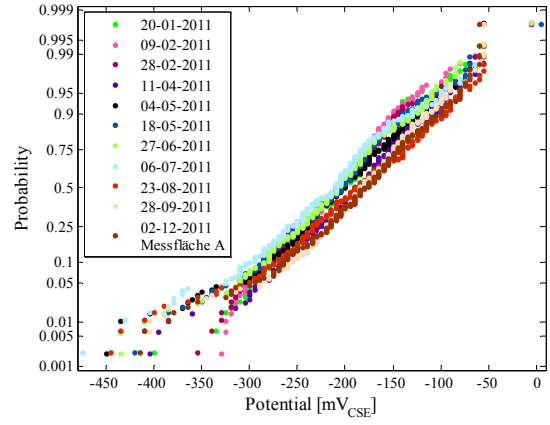
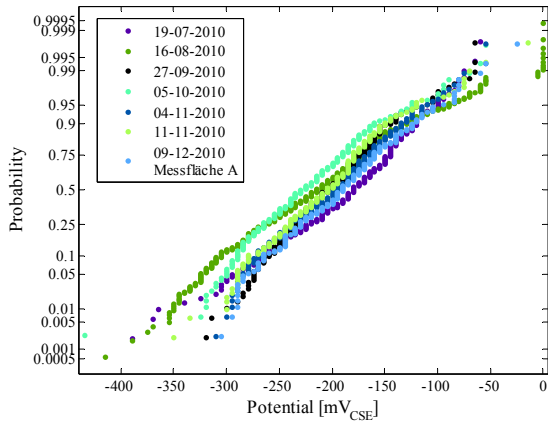
ANHANG A: Ergebnisse zu den Randbalken aus dem Olympiastadion

Fläche A









ANHANG B: Zusammenstellung der numerischen Studie

A_A	d_c	R	R_a	β_c, i_0	ΔE	Messraster	Hit/Miss
[cm ²]	[mm]	[Ωm]	[Ωm^2]	[V/dec] [$\mu A/cm^2$]	[mV]	[cm x cm]	[-]
0,8	10	100	1,3	285; 0,147	375	5x5	0
0,8	10	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	0
0,8	10	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	0
0,8	10	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	0
0,8	10	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	0
0,8	10	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
0,8	10	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	0
0,8	10	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	0
0,8	10	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
0,8	10	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
0,8	10	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	0
0,8	10	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	0
0,8	10	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
0,8	10	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
0,8	10	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
1,5	10	100	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
1,5	10	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
1,5	10	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	0
1,5	10	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
1,5	10	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	0
1,5	10	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
1,5	10	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
1,5	10	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	0
1,5	10	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
1,5	10	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
1,5	10	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
1,5	10	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	0
1,5	10	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
1,5	10	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
1,5	10	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
2,3	10	100	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
2,3	10	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
2,3	10	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
2,3	10	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
2,3	10	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
2,3	10	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
2,3	10	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
2,3	10	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
2,3	10	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
2,3	10	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
2,3	10	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
2,3	10	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
2,3	10	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
2,3	10	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
2,3	10	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0

A_A	d_c	R	R_a	β_c, i_0	ΔE	Messraster	Hit/Miss
[cm ²]	[mm]	[Ω m]	[Ω m ²]	[V/dec] [μ A/cm ²]	[mV]	[cm x cm]	[-]
3,1	10	100	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
3,1	10	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
3,1	10	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
3,1	10	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
3,1	10	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
3,1	10	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
3,1	10	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
3,1	10	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
3,1	10	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
3,1	10	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
3,1	10	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
3,1	10	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
3,1	10	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
3,1	10	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
3,1	10	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
3,9	10	100	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
3,9	10	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
3,9	10	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
3,9	10	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
3,9	10	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
3,9	10	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	1
3,9	10	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
3,9	10	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
3,9	10	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	1
3,9	10	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
3,9	10	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
3,9	10	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
3,9	10	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	1
3,9	10	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
3,9	10	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
4,7	10	100	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
4,7	10	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
4,7	10	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
4,7	10	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
4,7	10	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
4,7	10	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	1
4,7	10	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
4,7	10	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
4,7	10	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	1
4,7	10	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
4,7	10	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
4,7	10	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
4,7	10	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	1
4,7	10	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
4,7	10	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
0,8	20	100	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
0,8	20	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
0,8	20	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	0
0,8	20	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
0,8	20	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	0
0,8	20	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
0,8	20	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
0,8	20	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	0
0,8	20	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
0,8	20	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
0,8	20	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1

A_A	d_c	R	R_a	β_c, i_0	ΔE	Messraster	Hit/Miss
[cm ²]	[mm]	[Ωm]	[Ωm^2]	[V/dec] [$\mu A/cm^2$]	[mV]	[cm x cm]	[-]
0,8	20	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	0
0,8	20	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
0,8	20	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
0,8	20	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
1,5	20	100	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
1,5	20	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
1,5	20	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
1,5	20	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
1,5	20	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
1,5	20	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
1,5	20	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
1,5	20	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
1,5	20	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
1,5	20	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
1,5	20	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
1,5	20	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
1,5	20	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
1,5	20	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
1,5	20	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
2,3	20	100	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
2,3	20	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
2,3	20	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
2,3	20	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
2,3	20	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
2,3	20	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
2,3	20	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
2,3	20	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
2,3	20	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
2,3	20	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
2,3	20	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
2,3	20	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
2,3	20	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
2,3	20	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
2,3	20	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
3,1	20	100	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
3,1	20	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
3,1	20	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
3,1	20	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
3,1	20	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
3,1	20	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	1
3,1	20	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
3,1	20	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
3,1	20	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	1
3,1	20	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
3,1	20	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
3,1	20	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
3,1	20	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	1
3,1	20	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
3,1	20	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
3,9	20	100	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
3,9	20	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
3,9	20	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
3,9	20	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
3,9	20	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
3,9	20	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	1
3,9	20	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1

A_A	d_c	R	R_a	β_c, i_0	ΔE	Messraster	Hit/Miss
[cm ²]	[mm]	[Ωm]	[Ωm^2]	[V/dec] [$\mu A/cm^2$]	[mV]	[cm x cm]	[-]
3,9	20	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
3,9	20	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	1
3,9	20	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
3,9	20	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
3,9	20	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
3,9	20	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	1
3,9	20	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
3,9	20	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
4,7	20	100	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
4,7	20	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
4,7	20	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
4,7	20	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
4,7	20	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
4,7	20	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	1
4,7	20	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
4,7	20	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
4,7	20	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	1
4,7	20	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
4,7	20	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
4,7	20	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
4,7	20	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	1
4,7	20	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
4,7	20	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
0,8	30	100	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
0,8	30	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
0,8	30	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	0
0,8	30	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
0,8	30	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	0
0,8	30	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
0,8	30	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
0,8	30	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	0
0,8	30	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
0,8	30	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
0,8	30	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
0,8	30	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	0
0,8	30	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
0,8	30	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
0,8	30	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
1,5	30	100	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
1,5	30	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
1,5	30	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	0
1,5	30	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
1,5	30	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	0
1,5	30	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
1,5	30	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
1,5	30	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	0
1,5	30	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
1,5	30	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
1,5	30	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
1,5	30	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	0
1,5	30	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
1,5	30	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
1,5	30	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
2,3	30	100	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
2,3	30	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
2,3	30	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1

A_A	d_c	R	R_a	β_c, i_0	ΔE	Messraster	Hit/Miss
[cm ²]	[mm]	[Ωm]	[Ωm^2]	[V/dec] [$\mu A/cm^2$]	[mV]	[cm x cm]	[-]
2,3	30	100	1,3	285; 0,147	375	15x15_1	1
2,3	30	100	1,3	285; 0,147	375	15x15_2	1
2,3	30	100	1,3	285; 0,147	375	15x15_3	0
2,3	30	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_1	1
2,3	30	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_2	1
2,3	30	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_3	0
2,3	30	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_4	0
2,3	30	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_1	1
2,3	30	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_2	1
2,3	30	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_3	0
2,3	30	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_4	0
2,3	30	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_5	0
3,1	30	100	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
3,1	30	100	1,3	285; 0,147	375	10x10_1	1
3,1	30	100	1,3	285; 0,147	375	10x10_2	1
3,1	30	100	1,3	285; 0,147	375	15x15_1	1
3,1	30	100	1,3	285; 0,147	375	15x15_2	1
3,1	30	100	1,3	285; 0,147	375	15x15_3	1
3,1	30	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_1	1
3,1	30	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_2	1
3,1	30	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_3	1
3,1	30	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_4	0
3,1	30	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_1	1
3,1	30	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_2	1
3,1	30	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_3	1
3,1	30	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_4	0
3,1	30	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_5	0
3,9	30	100	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
3,9	30	100	1,3	285; 0,147	375	10x10_1	1
3,9	30	100	1,3	285; 0,147	375	10x10_2	1
3,9	30	100	1,3	285; 0,147	375	15x15_1	1
3,9	30	100	1,3	285; 0,147	375	15x15_2	1
3,9	30	100	1,3	285; 0,147	375	15x15_3	1
3,9	30	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_1	1
3,9	30	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_2	1
3,9	30	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_3	1
3,9	30	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_4	0
3,9	30	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_1	1
3,9	30	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_2	1
3,9	30	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_3	1
3,9	30	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_4	0
3,9	30	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_5	0
4,7	30	100	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
4,7	30	100	1,3	285; 0,147	375	10x10_1	1
4,7	30	100	1,3	285; 0,147	375	10x10_2	1
4,7	30	100	1,3	285; 0,147	375	15x15_1	1
4,7	30	100	1,3	285; 0,147	375	15x15_2	1
4,7	30	100	1,3	285; 0,147	375	15x15_3	1
4,7	30	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_1	1
4,7	30	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_2	1
4,7	30	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_3	1
4,7	30	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_4	0
4,7	30	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_1	1
4,7	30	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_2	1
4,7	30	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_3	1
4,7	30	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_4	0

A_A	d_c	R	R_a	β_c, i_0	ΔE	Messraster	Hit/Miss
[cm ²]	[mm]	[Ωm]	[Ωm^2]	[V/dec] [$\mu A/cm^2$]	[mV]	[cm x cm]	[-]
4,7	30	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_5	0
0,8	40	100	1,3	285; 0,147	375	5x5	0
0,8	40	100	1,3	285; 0,147	375	10x10_1	0
0,8	40	100	1,3	285; 0,147	375	10x10_2	0
0,8	40	100	1,3	285; 0,147	375	15x15_1	0
0,8	40	100	1,3	285; 0,147	375	15x15_2	0
0,8	40	100	1,3	285; 0,147	375	15x15_3	0
0,8	40	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_1	0
0,8	40	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_2	0
0,8	40	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_3	0
0,8	40	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_4	0
0,8	40	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_1	0
0,8	40	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_2	0
0,8	40	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_3	0
0,8	40	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_4	0
0,8	40	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_5	0
1,5	40	100	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
1,5	40	100	1,3	285; 0,147	375	10x10_1	1
1,5	40	100	1,3	285; 0,147	375	10x10_2	0
1,5	40	100	1,3	285; 0,147	375	15x15_1	1
1,5	40	100	1,3	285; 0,147	375	15x15_2	0
1,5	40	100	1,3	285; 0,147	375	15x15_3	0
1,5	40	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_1	1
1,5	40	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_2	0
1,5	40	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_3	0
1,5	40	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_4	0
1,5	40	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_1	1
1,5	40	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_2	0
1,5	40	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_3	0
1,5	40	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_4	0
1,5	40	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_5	0
2,3	40	100	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
2,3	40	100	1,3	285; 0,147	375	10x10_1	1
2,3	40	100	1,3	285; 0,147	375	10x10_2	0
2,3	40	100	1,3	285; 0,147	375	15x15_1	1
2,3	40	100	1,3	285; 0,147	375	15x15_2	0
2,3	40	100	1,3	285; 0,147	375	15x15_3	0
2,3	40	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_1	1
2,3	40	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_2	0
2,3	40	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_3	0
2,3	40	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_4	0
2,3	40	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_1	1
2,3	40	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_2	0
2,3	40	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_3	0
2,3	40	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_4	0
2,3	40	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_5	0
3,1	40	100	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
3,1	40	100	1,3	285; 0,147	375	10x10_1	1
3,1	40	100	1,3	285; 0,147	375	10x10_2	1
3,1	40	100	1,3	285; 0,147	375	15x15_1	1
3,1	40	100	1,3	285; 0,147	375	15x15_2	1
3,1	40	100	1,3	285; 0,147	375	15x15_3	0
3,1	40	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_1	1
3,1	40	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_2	1
3,1	40	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_3	0
3,1	40	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_4	0

A_A	d_c	R	R_a	β_c, i_0	ΔE	Messraster	Hit/Miss
[cm ²]	[mm]	[Ωm]	[Ωm^2]	[V/dec] [$\mu A/cm^2$]	[mV]	[cm x cm]	[-]
3,1	40	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
3,1	40	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
3,1	40	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
3,1	40	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
3,1	40	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
3,9	40	100	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
3,9	40	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
3,9	40	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
3,9	40	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
3,9	40	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
3,9	40	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
3,9	40	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
3,9	40	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
3,9	40	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
3,9	40	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
3,9	40	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
3,9	40	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
3,9	40	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
3,9	40	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
3,9	40	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
4,7	40	100	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
4,7	40	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
4,7	40	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
4,7	40	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
4,7	40	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
4,7	40	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	1
4,7	40	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
4,7	40	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
4,7	40	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	1
4,7	40	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
4,7	40	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
4,7	40	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
4,7	40	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	1
4,7	40	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
4,7	40	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
0,8	50	100	1,3	285; 0,147	375	5x5	0
0,8	50	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	0
0,8	50	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	0
0,8	50	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	0
0,8	50	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	0
0,8	50	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
0,8	50	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	0
0,8	50	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	0
0,8	50	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
0,8	50	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
0,8	50	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	0
0,8	50	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	0
0,8	50	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
0,8	50	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
0,8	50	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
1,5	50	100	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
1,5	50	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
1,5	50	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	0
1,5	50	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
1,5	50	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	0
1,5	50	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0

A_A	d_c	R	R_a	β_c, i_0	ΔE	Messraster	Hit/Miss
[cm ²]	[mm]	[Ωm]	[Ωm^2]	[V/dec] [$\mu A/cm^2$]	[mV]	[cm x cm]	[-]
1,5	50	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_1	1
1,5	50	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_2	0
1,5	50	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_3	0
1,5	50	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_4	0
1,5	50	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_1	1
1,5	50	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_2	0
1,5	50	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_3	0
1,5	50	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_4	0
1,5	50	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_5	0
2,3	50	100	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
2,3	50	100	1,3	285; 0,147	375	10x10_1	1
2,3	50	100	1,3	285; 0,147	375	10x10_2	1
2,3	50	100	1,3	285; 0,147	375	15x15_1	1
2,3	50	100	1,3	285; 0,147	375	15x15_2	1
2,3	50	100	1,3	285; 0,147	375	15x15_3	0
2,3	50	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_1	1
2,3	50	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_2	1
2,3	50	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_3	0
2,3	50	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_4	0
2,3	50	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_1	1
2,3	50	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_2	1
2,3	50	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_3	0
2,3	50	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_4	0
2,3	50	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_5	0
3,1	50	100	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
3,1	50	100	1,3	285; 0,147	375	10x10_1	1
3,1	50	100	1,3	285; 0,147	375	10x10_2	1
3,1	50	100	1,3	285; 0,147	375	15x15_1	1
3,1	50	100	1,3	285; 0,147	375	15x15_2	1
3,1	50	100	1,3	285; 0,147	375	15x15_3	0
3,1	50	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_1	1
3,1	50	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_2	1
3,1	50	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_3	0
3,1	50	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_4	0
3,1	50	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_1	1
3,1	50	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_2	1
3,1	50	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_3	0
3,1	50	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_4	0
3,1	50	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_5	0
3,9	50	100	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
3,9	50	100	1,3	285; 0,147	375	10x10_1	1
3,9	50	100	1,3	285; 0,147	375	10x10_2	1
3,9	50	100	1,3	285; 0,147	375	15x15_1	1
3,9	50	100	1,3	285; 0,147	375	15x15_2	1
3,9	50	100	1,3	285; 0,147	375	15x15_3	1
3,9	50	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_1	1
3,9	50	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_2	1
3,9	50	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_3	1
3,9	50	100	1,3	285; 0,147	375	20x20_4	0
3,9	50	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_1	1
3,9	50	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_2	1
3,9	50	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_3	1
3,9	50	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_4	0
3,9	50	100	1,3	285; 0,147	375	25x25_5	0
4,7	50	100	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
4,7	50	100	1,3	285; 0,147	375	10x10_1	1

A_A	d_c	R	R_a	β_c, i_0	ΔE	Messraster	Hit/Miss
[cm ²]	[mm]	[Ωm]	[Ωm^2]	[V/dec] [$\mu A/cm^2$]	[mV]	[cm x cm]	[-]
4,7	50	100	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
4,7	50	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
4,7	50	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
4,7	50	100	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	1
4,7	50	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
4,7	50	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
4,7	50	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	1
4,7	50	100	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
4,7	50	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
4,7	50	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
4,7	50	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	1
4,7	50	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
4,7	50	100	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
3,1	10	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
3,1	10	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
3,1	10	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
3,1	10	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
3,1	10	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
3,1	10	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
3,1	10	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
3,1	10	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
3,1	10	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
3,1	10	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
3,1	10	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
3,1	10	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
3,1	10	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
3,1	10	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
3,1	10	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
0,8	10	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	0
0,8	10	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	0
0,8	10	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	0
0,8	10	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	0
0,8	10	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	0
0,8	10	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
0,8	10	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	0
0,8	10	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	0
0,8	10	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
0,8	10	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
0,8	10	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	0
0,8	10	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	0
0,8	10	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
0,8	10	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
0,8	10	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
1,5	10	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
1,5	10	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
1,5	10	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	0
1,5	10	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
1,5	10	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	0
1,5	10	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
1,5	10	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
1,5	10	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	0
1,5	10	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
1,5	10	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
1,5	10	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
1,5	10	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	0
1,5	10	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0

A_A	d_c	R	R_a	β_c, i_0	ΔE	Messraster	Hit/Miss
[cm ²]	[mm]	[Ωm]	[Ωm^2]	[V/dec] [$\mu A/cm^2$]	[mV]	[cm x cm]	[-]
1,5	10	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
1,5	10	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
2,3	10	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
2,3	10	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
2,3	10	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	0
2,3	10	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
2,3	10	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	0
2,3	10	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
2,3	10	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
2,3	10	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	0
2,3	10	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
2,3	10	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
2,3	10	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
2,3	10	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	0
2,3	10	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
2,3	10	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
2,3	10	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
3,9	10	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
3,9	10	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
3,9	10	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
3,9	10	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
3,9	10	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
3,9	10	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
3,9	10	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
3,9	10	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
3,9	10	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
3,9	10	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
3,9	10	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
3,9	10	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
3,9	10	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
3,9	10	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
3,9	10	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
4,7	10	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
4,7	10	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
4,7	10	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
4,7	10	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
4,7	10	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
4,7	10	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
4,7	10	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
4,7	10	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
4,7	10	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
4,7	10	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
4,7	10	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
4,7	10	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
4,7	10	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
4,7	10	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
4,7	10	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
3,1	20	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
3,1	20	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
3,1	20	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
3,1	20	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
3,1	20	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
3,1	20	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
3,1	20	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
3,1	20	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
3,1	20	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0

A_A	d_c	R	R_a	β_c, i_0	ΔE	Messraster	Hit/Miss
[cm ²]	[mm]	[Ωm]	[Ωm^2]	[V/dec] [$\mu A/cm^2$]	[mV]	[cm x cm]	[-]
3,1	20	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
3,1	20	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
3,1	20	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
3,1	20	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
3,1	20	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
3,1	20	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
0,8	20	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
0,8	20	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
0,8	20	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	0
0,8	20	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
0,8	20	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	0
0,8	20	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
0,8	20	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
0,8	20	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	0
0,8	20	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
0,8	20	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
0,8	20	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
0,8	20	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	0
0,8	20	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
0,8	20	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
0,8	20	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
1,5	20	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
1,5	20	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
1,5	20	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	0
1,5	20	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
1,5	20	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	0
1,5	20	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
1,5	20	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
1,5	20	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	0
1,5	20	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
1,5	20	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
1,5	20	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
1,5	20	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	0
1,5	20	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
1,5	20	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
1,5	20	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
2,3	20	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
2,3	20	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
2,3	20	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
2,3	20	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
2,3	20	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
2,3	20	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
2,3	20	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
2,3	20	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
2,3	20	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
2,3	20	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
2,3	20	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
2,3	20	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
2,3	20	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
2,3	20	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
2,3	20	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
3,9	20	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
3,9	20	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
3,9	20	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
3,9	20	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
3,9	20	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1

A_A	d_c	R	R_a	β_c, i_0	ΔE	Messraster	Hit/Miss
[cm ²]	[mm]	[Ωm]	[Ωm^2]	[V/dec] [$\mu A/cm^2$]	[mV]	[cm x cm]	[-]
3,9	20	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
3,9	20	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
3,9	20	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
3,9	20	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
3,9	20	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
3,9	20	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
3,9	20	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
3,9	20	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
3,9	20	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
3,9	20	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
4,7	20	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
4,7	20	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
4,7	20	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
4,7	20	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
4,7	20	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
4,7	20	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	1
4,7	20	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
4,7	20	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
4,7	20	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	1
4,7	20	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
4,7	20	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
4,7	20	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
4,7	20	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	1
4,7	20	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
4,7	20	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
3,1	30	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
3,1	30	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
3,1	30	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
3,1	30	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
3,1	30	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
3,1	30	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
3,1	30	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
3,1	30	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
3,1	30	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
3,1	30	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
3,1	30	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
3,1	30	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
3,1	30	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
3,1	30	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
3,1	30	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
0,8	30	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	0
0,8	30	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	0
0,8	30	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	0
0,8	30	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	0
0,8	30	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	0
0,8	30	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
0,8	30	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	0
0,8	30	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	0
0,8	30	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
0,8	30	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
0,8	30	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	0
0,8	30	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	0
0,8	30	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
0,8	30	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
0,8	30	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
1,5	30	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1

A_A	d_c	R	R_a	β_c, i_0	ΔE	Messraster	Hit/Miss
[cm ²]	[mm]	[Ωm]	[Ωm^2]	[V/dec] [$\mu A/cm^2$]	[mV]	[cm x cm]	[-]
1,5	30	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
1,5	30	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	0
1,5	30	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
1,5	30	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	0
1,5	30	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
1,5	30	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
1,5	30	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	0
1,5	30	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
1,5	30	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
1,5	30	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
1,5	30	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	0
1,5	30	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
1,5	30	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
1,5	30	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
2,3	30	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
2,3	30	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
2,3	30	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	0
2,3	30	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
2,3	30	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	0
2,3	30	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
2,3	30	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
2,3	30	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	0
2,3	30	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
2,3	30	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
2,3	30	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
2,3	30	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	0
2,3	30	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
2,3	30	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
2,3	30	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
3,1	30	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
3,1	30	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
3,1	30	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
3,1	30	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
3,1	30	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
3,1	30	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
3,1	30	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
3,1	30	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
3,1	30	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
3,1	30	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
3,1	30	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
3,1	30	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
3,1	30	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
3,1	30	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
3,1	30	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
3,9	30	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
3,9	30	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
3,9	30	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
3,9	30	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
3,9	30	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
3,9	30	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
3,9	30	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
3,9	30	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
3,9	30	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
3,9	30	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
3,9	30	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
3,9	30	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1

A_A	d_c	R	R_a	β_c, i_0	ΔE	Messraster	Hit/Miss
[cm ²]	[mm]	[Ωm]	[Ωm^2]	[V/dec] [$\mu A/cm^2$]	[mV]	[cm x cm]	[-]
3,9	30	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
3,9	30	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
3,9	30	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
4,7	30	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
4,7	30	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
4,7	30	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
4,7	30	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
4,7	30	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
4,7	30	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
4,7	30	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
4,7	30	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
4,7	30	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
4,7	30	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
4,7	30	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
4,7	30	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
4,7	30	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
4,7	30	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
4,7	30	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
0,8	40	400	2	285; 0,147	375	5x5	0
0,8	40	400	2	285; 0,147	375	10x10 1	0
0,8	40	400	2	285; 0,147	375	10x10 2	0
0,8	40	400	2	285; 0,147	375	15x15 1	0
0,8	40	400	2	285; 0,147	375	15x15 2	0
0,8	40	400	2	285; 0,147	375	15x15 3	0
0,8	40	400	2	285; 0,147	375	20x20 1	0
0,8	40	400	2	285; 0,147	375	20x20 2	0
0,8	40	400	2	285; 0,147	375	20x20 3	0
0,8	40	400	2	285; 0,147	375	20x20 4	0
0,8	40	400	2	285; 0,147	375	25x25 1	0
0,8	40	400	2	285; 0,147	375	25x25 2	0
0,8	40	400	2	285; 0,147	375	25x25 3	0
0,8	40	400	2	285; 0,147	375	25x25 4	0
0,8	40	400	2	285; 0,147	375	25x25 5	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	325	5x5	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	325	10x10 1	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	325	10x10 2	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	325	15x15 1	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	325	15x15 2	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	325	15x15 3	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	325	20x20 1	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	325	20x20 2	0

A_A	d_c	R	R_a	β_c, i_0	ΔE	Messraster	Hit/Miss
[cm ²]	[mm]	[Ωm]	[Ωm^2]	[V/dec] [$\mu A/cm^2$]	[mV]	[cm x cm]	[-]
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	325	20x20 3	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	325	20x20 4	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	325	25x25 1	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	325	25x25 2	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	325	25x25 3	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	325	25x25 4	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	325	25x25 5	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	425	5x5	1
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	425	10x10 1	1
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	425	10x10 2	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	425	15x15 1	1
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	425	15x15 2	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	425	15x15 3	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	425	20x20 1	1
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	425	20x20 2	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	425	20x20 3	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	425	20x20 4	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	425	25x25 1	1
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	425	25x25 2	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	425	25x25 3	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	425	25x25 4	0
0,8	40	400	1,3	285; 0,147	425	25x25 5	0
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	0
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	0
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	0
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	0
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
1,5	40	400	2	285; 0,147	375	5x5	1
1,5	40	400	2	285; 0,147	375	10x10 1	1
1,5	40	400	2	285; 0,147	375	10x10 2	0
1,5	40	400	2	285; 0,147	375	15x15 1	1
1,5	40	400	2	285; 0,147	375	15x15 2	0
1,5	40	400	2	285; 0,147	375	15x15 3	0
1,5	40	400	2	285; 0,147	375	20x20 1	1
1,5	40	400	2	285; 0,147	375	20x20 2	0
1,5	40	400	2	285; 0,147	375	20x20 3	0
1,5	40	400	2	285; 0,147	375	20x20 4	0
1,5	40	400	2	285; 0,147	375	25x25 1	1
1,5	40	400	2	285; 0,147	375	25x25 2	0
1,5	40	400	2	285; 0,147	375	25x25 3	0
1,5	40	400	2	285; 0,147	375	25x25 4	0
1,5	40	400	2	285; 0,147	375	25x25 5	0
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	325	5x5	1
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	325	10x10 1	1
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	325	10x10 2	0
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	325	15x15 1	1

A_A	d_c	R	R_a	β_c, i_0	ΔE	Messraster	Hit/Miss
[cm ²]	[mm]	[Ωm]	[Ωm^2]	[V/dec] [$\mu A/cm^2$]	[mV]	[cm x cm]	[-]
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	325	15x15 2	0
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	325	15x15 3	0
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	325	20x20 1	1
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	325	20x20 2	0
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	325	20x20 3	0
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	325	20x20 4	0
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	325	25x25 1	1
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	325	25x25 2	0
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	325	25x25 3	0
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	325	25x25 4	0
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	325	25x25 5	0
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	425	5x5	1
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	425	10x10 1	1
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	425	10x10 2	0
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	425	15x15 1	1
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	425	15x15 2	0
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	425	15x15 3	0
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	425	20x20 1	1
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	425	20x20 2	0
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	425	20x20 3	0
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	425	20x20 4	0
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	425	25x25 1	1
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	425	25x25 2	0
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	425	25x25 3	0
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	425	25x25 4	0
1,5	40	400	1,3	285; 0,147	425	25x25 5	0
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	0
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	0
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	0
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	0
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
2,3	40	400	2	285; 0,147	375	5x5	1
2,3	40	400	2	285; 0,147	375	10x10 1	1
2,3	40	400	2	285; 0,147	375	10x10 2	0
2,3	40	400	2	285; 0,147	375	15x15 1	1
2,3	40	400	2	285; 0,147	375	15x15 2	0
2,3	40	400	2	285; 0,147	375	15x15 3	0
2,3	40	400	2	285; 0,147	375	20x20 1	1
2,3	40	400	2	285; 0,147	375	20x20 2	0
2,3	40	400	2	285; 0,147	375	20x20 3	0
2,3	40	400	2	285; 0,147	375	20x20 4	0
2,3	40	400	2	285; 0,147	375	25x25 1	1
2,3	40	400	2	285; 0,147	375	25x25 2	0
2,3	40	400	2	285; 0,147	375	25x25 3	0
2,3	40	400	2	285; 0,147	375	25x25 4	0
2,3	40	400	2	285; 0,147	375	25x25 5	0

A_A	d_c	R	R_a	β_c, i_0	ΔE	Messraster	Hit/Miss
[cm ²]	[mm]	[Ωm]	[Ωm^2]	[V/dec] [$\mu A/cm^2$]	[mV]	[cm x cm]	[-]
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	325	5x5	1
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	325	10x10 1	1
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	325	10x10 2	1
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	325	15x15 1	1
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	325	15x15 2	1
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	325	15x15 3	0
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	325	20x20 1	1
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	325	20x20 2	1
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	325	20x20 3	0
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	325	20x20 4	0
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	325	25x25 1	1
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	325	25x25 2	1
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	325	25x25 3	0
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	325	25x25 4	0
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	325	25x25 5	0
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	425	5x5	1
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	425	10x10 1	1
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	425	10x10 2	1
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	425	15x15 1	1
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	425	15x15 2	1
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	425	15x15 3	0
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	425	20x20 1	1
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	425	20x20 2	1
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	425	20x20 3	0
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	425	20x20 4	0
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	425	25x25 1	1
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	425	25x25 2	1
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	425	25x25 3	0
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	425	25x25 4	0
2,3	40	400	1,3	285; 0,147	425	25x25 5	0
3,1	40	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
3,1	40	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
3,1	40	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
3,1	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
3,1	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
3,1	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
3,1	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
3,1	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
3,1	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
3,1	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
3,1	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
3,1	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
3,1	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
3,1	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
3,1	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
3,9	40	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
3,9	40	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
3,9	40	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
3,9	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
3,9	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
3,9	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
3,9	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
3,9	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
3,9	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
3,9	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
3,9	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1

A_A	d_c	R	R_a	β_c, i_0	ΔE	Messraster	Hit/Miss
[cm ²]	[mm]	[Ωm]	[Ωm^2]	[V/dec] [$\mu A/cm^2$]	[mV]	[cm x cm]	[-]
3,9	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
3,9	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
3,9	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
3,9	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
5,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
5,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
5,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
5,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
5,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
5,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
5,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
5,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
5,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
5,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
5,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
5,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
5,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
5,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
5,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
6,2	40	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
6,2	40	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
6,2	40	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
6,2	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
6,2	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
6,2	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	1
6,2	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
6,2	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
6,2	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	1
6,2	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
6,2	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
6,2	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
6,2	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	1
6,2	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
6,2	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
7,0	40	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
7,0	40	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
7,0	40	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
7,0	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
7,0	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
7,0	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	1
7,0	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1

A_A	d_c	R	R_a	β_c, i_0	ΔE	Messraster	Hit/Miss
[cm ²]	[mm]	[Ωm]	[Ωm^2]	[V/dec] [$\mu A/cm^2$]	[mV]	[cm x cm]	[-]
7,0	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
7,0	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	1
7,0	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
7,0	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
7,0	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
7,0	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	1
7,0	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
7,0	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
4,7	40	400	1,3	120; 0,003	375	5x5	1
4,7	40	400	1,3	120; 0,003	375	10x10 1	1
4,7	40	400	1,3	120; 0,003	375	10x10 2	1
4,7	40	400	1,3	120; 0,003	375	15x15 1	1
4,7	40	400	1,3	120; 0,003	375	15x15 2	1
4,7	40	400	1,3	120; 0,003	375	15x15 3	1
4,7	40	400	1,3	120; 0,003	375	20x20 1	1
4,7	40	400	1,3	120; 0,003	375	20x20 2	1
4,7	40	400	1,3	120; 0,003	375	20x20 3	1
4,7	40	400	1,3	120; 0,003	375	20x20 4	1
4,7	40	400	1,3	120; 0,003	375	25x25 1	1
4,7	40	400	1,3	120; 0,003	375	25x25 2	1
4,7	40	400	1,3	120; 0,003	375	25x25 3	1
4,7	40	400	1,3	120; 0,003	375	25x25 4	1
4,7	40	400	1,3	120; 0,003	375	25x25 5	0
4,7	40	400	1,3	200; 0,127	375	5x5	1
4,7	40	400	1,3	200; 0,127	375	10x10 1	1
4,7	40	400	1,3	200; 0,127	375	10x10 2	1
4,7	40	400	1,3	200; 0,127	375	15x15 1	1
4,7	40	400	1,3	200; 0,127	375	15x15 2	1
4,7	40	400	1,3	200; 0,127	375	15x15 3	0
4,7	40	400	1,3	200; 0,127	375	20x20 1	1
4,7	40	400	1,3	200; 0,127	375	20x20 2	1
4,7	40	400	1,3	200; 0,127	375	20x20 3	0
4,7	40	400	1,3	200; 0,127	375	20x20 4	0
4,7	40	400	1,3	200; 0,127	375	25x25 1	1
4,7	40	400	1,3	200; 0,127	375	25x25 2	1
4,7	40	400	1,3	200; 0,127	375	25x25 3	0
4,7	40	400	1,3	200; 0,127	375	25x25 4	0
4,7	40	400	1,3	200; 0,127	375	25x25 5	0
4,7	40	400	2	285; 0,147	375	5x5	1
4,7	40	400	2	285; 0,147	375	10x10 1	1
4,7	40	400	2	285; 0,147	375	10x10 2	1
4,7	40	400	2	285; 0,147	375	15x15 1	1
4,7	40	400	2	285; 0,147	375	15x15 2	1
4,7	40	400	2	285; 0,147	375	15x15 3	0
4,7	40	400	2	285; 0,147	375	20x20 1	1
4,7	40	400	2	285; 0,147	375	20x20 2	1
4,7	40	400	2	285; 0,147	375	20x20 3	0
4,7	40	400	2	285; 0,147	375	20x20 4	0
4,7	40	400	2	285; 0,147	375	25x25 1	1
4,7	40	400	2	285; 0,147	375	25x25 2	1
4,7	40	400	2	285; 0,147	375	25x25 3	0
4,7	40	400	2	285; 0,147	375	25x25 4	0
4,7	40	400	2	285; 0,147	375	25x25 5	0
4,7	40	400	0,5	285; 0,147	375	5x5	1
4,7	40	400	0,5	285; 0,147	375	10x10 1	1
4,7	40	400	0,5	285; 0,147	375	10x10 2	1

A_A	d_c	R	R_a	β_c, i_0	ΔE	Messraster	Hit/Miss
[cm ²]	[mm]	[Ωm]	[Ωm^2]	[V/dec] [$\mu A/cm^2$]	[mV]	[cm x cm]	[-]
4,7	40	400	0,5	285; 0,147	375	15x15 1	1
4,7	40	400	0,5	285; 0,147	375	15x15 2	1
4,7	40	400	0,5	285; 0,147	375	15x15 3	1
4,7	40	400	0,5	285; 0,147	375	20x20 1	1
4,7	40	400	0,5	285; 0,147	375	20x20 2	1
4,7	40	400	0,5	285; 0,147	375	20x20 3	1
4,7	40	400	0,5	285; 0,147	375	20x20 4	0
4,7	40	400	0,5	285; 0,147	375	25x25 1	1
4,7	40	400	0,5	285; 0,147	375	25x25 2	1
4,7	40	400	0,5	285; 0,147	375	25x25 3	1
4,7	40	400	0,5	285; 0,147	375	25x25 4	0
4,7	40	400	0,5	285; 0,147	375	25x25 5	0
4,7	40	400	10	285; 0,147	375	5x5	0
4,7	40	400	10	285; 0,147	375	10x10 1	0
4,7	40	400	10	285; 0,147	375	10x10 2	0
4,7	40	400	10	285; 0,147	375	15x15 1	0
4,7	40	400	10	285; 0,147	375	15x15 2	0
4,7	40	400	10	285; 0,147	375	15x15 3	0
4,7	40	400	10	285; 0,147	375	20x20 1	0
4,7	40	400	10	285; 0,147	375	20x20 2	0
4,7	40	400	10	285; 0,147	375	20x20 3	0
4,7	40	400	10	285; 0,147	375	20x20 4	0
4,7	40	400	10	285; 0,147	375	25x25 1	0
4,7	40	400	10	285; 0,147	375	25x25 2	0
4,7	40	400	10	285; 0,147	375	25x25 3	0
4,7	40	400	10	285; 0,147	375	25x25 4	0
4,7	40	400	10	285; 0,147	375	25x25 5	0
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	325	5x5	1
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	325	10x10 1	1
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	325	10x10 2	1
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	325	15x15 1	1
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	325	15x15 2	1
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	325	15x15 3	0
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	325	20x20 1	1
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	325	20x20 2	1
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	325	20x20 3	0
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	325	20x20 4	0
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	325	25x25 1	1
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	325	25x25 2	1
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	325	25x25 3	0
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	325	25x25 4	0
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	325	25x25 5	0
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	425	5x5	1
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	425	10x10 1	1
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	425	10x10 2	1
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	425	15x15 1	1
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	425	15x15 2	1
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	425	15x15 3	0
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	425	20x20 1	1
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	425	20x20 2	1
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	425	20x20 3	0
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	425	20x20 4	0
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	425	25x25 1	1
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	425	25x25 2	1
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	425	25x25 3	0
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	425	25x25 4	0

A_A	d_c	R	R_a	β_c, i_0	ΔE	Messraster	Hit/Miss
[cm ²]	[mm]	[Ωm]	[Ωm^2]	[V/dec] [$\mu A/cm^2$]	[mV]	[cm x cm]	[-]
4,7	40	400	1,3	285; 0,147	425	25x25 5	0
7,8	40	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
7,8	40	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
7,8	40	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
7,8	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
7,8	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
7,8	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	1
7,8	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
7,8	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
7,8	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	1
7,8	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
7,8	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
7,8	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
7,8	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	1
7,8	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
7,8	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
8,6	40	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
8,6	40	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
8,6	40	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
8,6	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
8,6	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
8,6	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	1
8,6	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
8,6	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
8,6	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	1
8,6	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
8,6	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
8,6	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
8,6	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	1
8,6	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
8,6	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
9,4	40	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
9,4	40	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
9,4	40	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
9,4	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
9,4	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
9,4	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	1
9,4	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
9,4	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
9,4	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	1
9,4	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
9,4	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
9,4	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
9,4	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	1
9,4	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
9,4	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
10,1	40	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
10,1	40	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
10,1	40	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
10,1	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
10,1	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
10,1	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	1
10,1	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
10,1	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
10,1	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	1
10,1	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0

A_A	d_c	R	R_a	β_c, i_0	ΔE	Messraster	Hit/Miss
[cm ²]	[mm]	[Ωm]	[Ωm^2]	[V/dec] [$\mu A/cm^2$]	[mV]	[cm x cm]	[-]
10,1	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
10,1	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
10,1	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	1
10,1	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
10,1	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
10,9	40	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
10,9	40	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
10,9	40	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
10,9	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
10,9	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
10,9	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	1
10,9	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
10,9	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
10,9	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	1
10,9	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	1
10,9	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
10,9	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
10,9	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	1
10,9	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	1
10,9	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
11,7	40	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
11,7	40	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
11,7	40	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
11,7	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
11,7	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
11,7	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	1
11,7	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
11,7	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
11,7	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	1
11,7	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	1
11,7	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
11,7	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
11,7	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	1
11,7	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	1
11,7	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
12,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
12,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
12,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
12,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
12,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
12,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	1
12,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
12,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
12,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	1
12,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	1
12,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
12,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
12,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	1
12,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	1
12,5	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
13,3	40	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
13,3	40	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
13,3	40	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
13,3	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
13,3	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
13,3	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	1

A_A	d_c	R	R_a	β_c, i_0	ΔE	Messraster	Hit/Miss
[cm ²]	[mm]	[Ωm]	[Ωm^2]	[V/dec] [$\mu A/cm^2$]	[mV]	[cm x cm]	[-]
13,3	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
13,3	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
13,3	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	1
13,3	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	1
13,3	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
13,3	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
13,3	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	1
13,3	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	1
13,3	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
14,0	40	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
14,0	40	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
14,0	40	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
14,0	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
14,0	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
14,0	40	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	1
14,0	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
14,0	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
14,0	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	1
14,0	40	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	1
14,0	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
14,0	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
14,0	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	1
14,0	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	1
14,0	40	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
3,1	50	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
3,1	50	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
3,1	50	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
3,1	50	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
3,1	50	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
3,1	50	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
3,1	50	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
3,1	50	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
3,1	50	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
3,1	50	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
3,1	50	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
3,1	50	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
3,1	50	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
3,1	50	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
3,1	50	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
0,8	50	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	0
0,8	50	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	0
0,8	50	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	0
0,8	50	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	0
0,8	50	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	0
0,8	50	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
0,8	50	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	0
0,8	50	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	0
0,8	50	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
0,8	50	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
0,8	50	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	0
0,8	50	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	0
0,8	50	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
0,8	50	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
0,8	50	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
1,5	50	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
1,5	50	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1

A_A	d_c	R	R_a	β_c, i_0	ΔE	Messraster	Hit/Miss
[cm ²]	[mm]	[Ωm]	[Ωm^2]	[V/dec] [$\mu A/cm^2$]	[mV]	[cm x cm]	[-]
1,5	50	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	0
1,5	50	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
1,5	50	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	0
1,5	50	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
1,5	50	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
1,5	50	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	0
1,5	50	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
1,5	50	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
1,5	50	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
1,5	50	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	0
1,5	50	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
1,5	50	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
1,5	50	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
2,3	50	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
2,3	50	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
2,3	50	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
2,3	50	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
2,3	50	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
2,3	50	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
2,3	50	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
2,3	50	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
2,3	50	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
2,3	50	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
2,3	50	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
2,3	50	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
2,3	50	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
2,3	50	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
2,3	50	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
3,9	50	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
3,9	50	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
3,9	50	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
3,9	50	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
3,9	50	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
3,9	50	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
3,9	50	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
3,9	50	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
3,9	50	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
3,9	50	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
3,9	50	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
3,9	50	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
3,9	50	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
3,9	50	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
3,9	50	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
4,7	50	400	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
4,7	50	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
4,7	50	400	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
4,7	50	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
4,7	50	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
4,7	50	400	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	1
4,7	50	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
4,7	50	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
4,7	50	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	1
4,7	50	400	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
4,7	50	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
4,7	50	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
4,7	50	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	1

A_A	d_c	R	R_a	β_c, i_0	ΔE	Messraster	Hit/Miss
[cm ²]	[mm]	[Ωm]	[Ωm^2]	[V/dec] [$\mu A/cm^2$]	[mV]	[cm x cm]	[-]
4,7	50	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
4,7	50	400	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
0,8	10	700	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
0,8	10	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
0,8	10	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	0
0,8	10	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
0,8	10	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	0
0,8	10	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
0,8	10	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
0,8	10	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	0
0,8	10	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
0,8	10	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
0,8	10	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
0,8	10	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	0
0,8	10	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
0,8	10	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
0,8	10	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
1,5	10	700	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
1,5	10	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
1,5	10	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	0
1,5	10	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
1,5	10	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	0
1,5	10	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
1,5	10	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
1,5	10	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	0
1,5	10	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
1,5	10	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
1,5	10	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
1,5	10	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	0
1,5	10	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
1,5	10	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
1,5	10	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
2,3	10	700	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
2,3	10	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
2,3	10	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
2,3	10	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
2,3	10	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
2,3	10	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
2,3	10	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
2,3	10	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
2,3	10	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
2,3	10	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
2,3	10	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
2,3	10	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
2,3	10	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
2,3	10	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
2,3	10	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
3,1	10	700	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
3,1	10	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
3,1	10	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
3,1	10	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
3,1	10	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
3,1	10	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
3,1	10	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
3,1	10	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
3,1	10	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0

A_A	d_c	R	R_a	β_c, i_0	ΔE	Messraster	Hit/Miss
[cm ²]	[mm]	[Ωm]	[Ωm^2]	[V/dec] [$\mu A/cm^2$]	[mV]	[cm x cm]	[-]
3,1	10	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
3,1	10	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
3,1	10	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
3,1	10	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
3,1	10	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
3,1	10	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
3,9	10	700	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
3,9	10	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
3,9	10	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
3,9	10	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
3,9	10	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
3,9	10	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
3,9	10	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
3,9	10	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
3,9	10	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
3,9	10	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
3,9	10	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
3,9	10	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
3,9	10	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
3,9	10	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
3,9	10	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
4,7	10	700	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
4,7	10	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
4,7	10	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
4,7	10	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
4,7	10	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
4,7	10	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
4,7	10	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
4,7	10	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
4,7	10	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
4,7	10	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
4,7	10	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
4,7	10	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
4,7	10	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
4,7	10	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
4,7	10	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
0,8	20	700	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
0,8	20	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
0,8	20	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	0
0,8	20	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
0,8	20	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	0
0,8	20	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
0,8	20	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
0,8	20	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	0
0,8	20	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
0,8	20	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
0,8	20	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
0,8	20	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	0
0,8	20	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
0,8	20	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
0,8	20	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
1,5	20	700	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
1,5	20	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
1,5	20	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	0
1,5	20	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
1,5	20	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	0

A_A	d_c	R	R_a	β_c, i_0	ΔE	Messraster	Hit/Miss
[cm ²]	[mm]	[Ωm]	[Ωm^2]	[V/dec] [$\mu A/cm^2$]	[mV]	[cm x cm]	[-]
1,5	20	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
1,5	20	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
1,5	20	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	0
1,5	20	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
1,5	20	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
1,5	20	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
1,5	20	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	0
1,5	20	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
1,5	20	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
1,5	20	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
2,3	20	700	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
2,3	20	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
2,3	20	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
2,3	20	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
2,3	20	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
2,3	20	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
2,3	20	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
2,3	20	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
2,3	20	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
2,3	20	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
2,3	20	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
2,3	20	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
2,3	20	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
2,3	20	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
2,3	20	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
3,1	20	700	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
3,1	20	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
3,1	20	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
3,1	20	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
3,1	20	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
3,1	20	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
3,1	20	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
3,1	20	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
3,1	20	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
3,1	20	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
3,1	20	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
3,1	20	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
3,1	20	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
3,1	20	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
3,1	20	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
3,9	20	700	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
3,9	20	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
3,9	20	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
3,9	20	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
3,9	20	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
3,9	20	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
3,9	20	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
3,9	20	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
3,9	20	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
3,9	20	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
3,9	20	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
3,9	20	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
3,9	20	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
3,9	20	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
3,9	20	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
4,7	20	700	1,3	285; 0,147	375	5x5	1

A_A	d_c	R	R_a	β_c, i_0	ΔE	Messraster	Hit/Miss
[cm ²]	[mm]	[Ωm]	[Ωm^2]	[V/dec] [$\mu A/cm^2$]	[mV]	[cm x cm]	[-]
4,7	20	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
4,7	20	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
4,7	20	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
4,7	20	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
4,7	20	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	1
4,7	20	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
4,7	20	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
4,7	20	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	1
4,7	20	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
4,7	20	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
4,7	20	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
4,7	20	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	1
4,7	20	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
4,7	20	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
0,8	30	700	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
0,8	30	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
0,8	30	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	0
0,8	30	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
0,8	30	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	0
0,8	30	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
0,8	30	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
0,8	30	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	0
0,8	30	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
0,8	30	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
0,8	30	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
0,8	30	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	0
0,8	30	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
0,8	30	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
0,8	30	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
1,5	30	700	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
1,5	30	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
1,5	30	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	0
1,5	30	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
1,5	30	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	0
1,5	30	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
1,5	30	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
1,5	30	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	0
1,5	30	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
1,5	30	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
1,5	30	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
1,5	30	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	0
1,5	30	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
1,5	30	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
1,5	30	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
2,3	30	700	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
2,3	30	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
2,3	30	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
2,3	30	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
2,3	30	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
2,3	30	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
2,3	30	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
2,3	30	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
2,3	30	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
2,3	30	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
2,3	30	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
2,3	30	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1

A_A	d_c	R	R_a	β_c, i_0	ΔE	Messraster	Hit/Miss
[cm ²]	[mm]	[Ωm]	[Ωm^2]	[V/dec] [$\mu A/cm^2$]	[mV]	[cm x cm]	[-]
2,3	30	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
2,3	30	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
2,3	30	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
3,1	30	700	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
3,1	30	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
3,1	30	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
3,1	30	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
3,1	30	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
3,1	30	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
3,1	30	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
3,1	30	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
3,1	30	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
3,1	30	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
3,1	30	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
3,1	30	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
3,1	30	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
3,1	30	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
3,1	30	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
3,9	30	700	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
3,9	30	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
3,9	30	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
3,9	30	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
3,9	30	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
3,9	30	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
3,9	30	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
3,9	30	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
3,9	30	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
3,9	30	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
3,9	30	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
3,9	30	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
3,9	30	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
3,9	30	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
3,9	30	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
4,7	30	700	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
4,7	30	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
4,7	30	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
4,7	30	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
4,7	30	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
4,7	30	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	1
4,7	30	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
4,7	30	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
4,7	30	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	1
4,7	30	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
4,7	30	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
4,7	30	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
4,7	30	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	1
4,7	30	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
4,7	30	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
0,8	40	700	1,3	285; 0,147	375	5x5	0
0,8	40	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	0
0,8	40	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	0
0,8	40	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	0
0,8	40	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	0
0,8	40	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
0,8	40	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	0
0,8	40	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	0

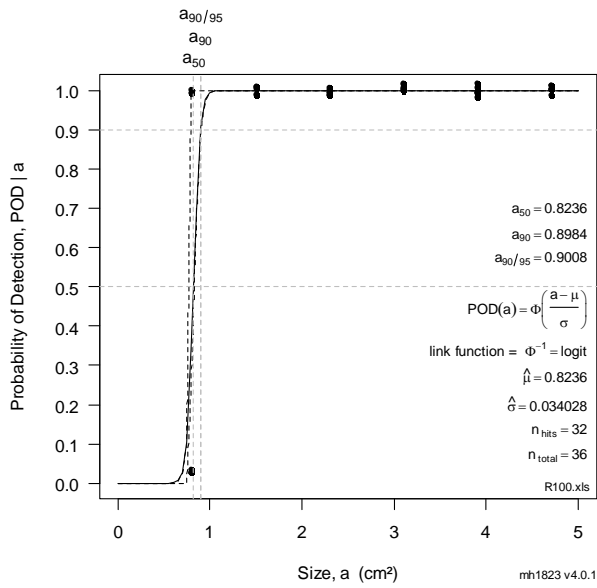
A_A	d_c	R	R_a	β_c, i_0	ΔE	Messraster	Hit/Miss
[cm ²]	[mm]	[Ωm]	[Ωm^2]	[V/dec] [$\mu A/cm^2$]	[mV]	[cm x cm]	[-]
0,8	40	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
0,8	40	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
0,8	40	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	0
0,8	40	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	0
0,8	40	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
0,8	40	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
0,8	40	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
1,5	40	700	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
1,5	40	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
1,5	40	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	0
1,5	40	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
1,5	40	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	0
1,5	40	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
1,5	40	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
1,5	40	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	0
1,5	40	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
1,5	40	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
1,5	40	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
1,5	40	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	0
1,5	40	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
1,5	40	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
1,5	40	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
2,3	40	700	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
2,3	40	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
2,3	40	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
2,3	40	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
2,3	40	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
2,3	40	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
2,3	40	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
2,3	40	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
2,3	40	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
2,3	40	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
2,3	40	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
2,3	40	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
2,3	40	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
2,3	40	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
2,3	40	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
3,1	40	700	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
3,1	40	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
3,1	40	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
3,1	40	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
3,1	40	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
3,1	40	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
3,1	40	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
3,1	40	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
3,1	40	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
3,1	40	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
3,1	40	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
3,1	40	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
3,1	40	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
3,1	40	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
3,1	40	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
3,9	40	700	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
3,9	40	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
3,9	40	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
3,9	40	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1

A_A	d_c	R	R_a	β_c, i_0	ΔE	Messraster	Hit/Miss
[cm ²]	[mm]	[Ωm]	[Ωm^2]	[V/dec] [$\mu A/cm^2$]	[mV]	[cm x cm]	[-]
3,9	40	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
3,9	40	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
3,9	40	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
3,9	40	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
3,9	40	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
3,9	40	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
3,9	40	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
3,9	40	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
3,9	40	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
3,9	40	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
3,9	40	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
4,7	40	700	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
4,7	40	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
4,7	40	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
4,7	40	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
4,7	40	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
4,7	40	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	1
4,7	40	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
4,7	40	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
4,7	40	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	1
4,7	40	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
4,7	40	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
4,7	40	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
4,7	40	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	1
4,7	40	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
4,7	40	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
0,8	50	700	1,3	285; 0,147	375	5x5	0
0,8	50	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	0
0,8	50	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	0
0,8	50	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	0
0,8	50	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	0
0,8	50	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
0,8	50	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	0
0,8	50	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	0
0,8	50	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
0,8	50	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
0,8	50	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	0
0,8	50	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	0
0,8	50	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
0,8	50	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
0,8	50	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
1,5	50	700	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
1,5	50	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
1,5	50	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	0
1,5	50	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
1,5	50	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	0
1,5	50	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
1,5	50	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
1,5	50	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	0
1,5	50	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
1,5	50	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
1,5	50	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
1,5	50	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	0
1,5	50	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
1,5	50	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
1,5	50	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0

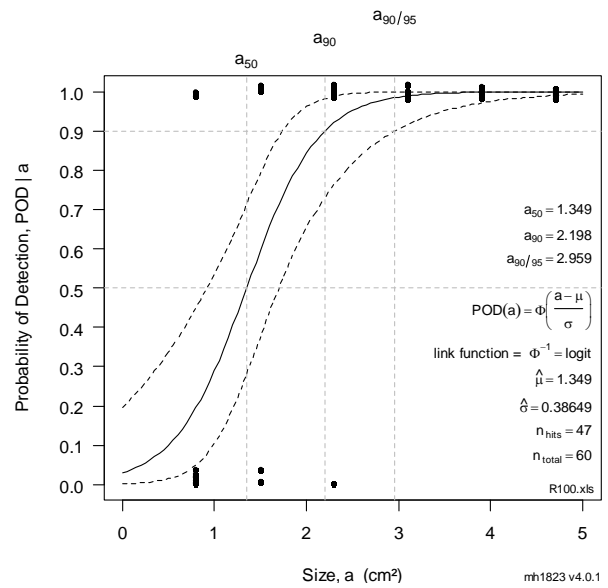
A_A	d_c	R	R_a	β_c, i_0	ΔE	Messraster	Hit/Miss
[cm ²]	[mm]	[Ωm]	[Ωm^2]	[V/dec] [$\mu A/cm^2$]	[mV]	[cm x cm]	[-]
2,3	50	700	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
2,3	50	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
2,3	50	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
2,3	50	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
2,3	50	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
2,3	50	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
2,3	50	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
2,3	50	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
2,3	50	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
2,3	50	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
2,3	50	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
2,3	50	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
2,3	50	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
2,3	50	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
2,3	50	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
3,1	50	700	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
3,1	50	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
3,1	50	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
3,1	50	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
3,1	50	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
3,1	50	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
3,1	50	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
3,1	50	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
3,1	50	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
3,1	50	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
3,1	50	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
3,1	50	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
3,1	50	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
3,1	50	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
3,1	50	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
3,9	50	700	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
3,9	50	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
3,9	50	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
3,9	50	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
3,9	50	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
3,9	50	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	0
3,9	50	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
3,9	50	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
3,9	50	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	0
3,9	50	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
3,9	50	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1
3,9	50	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
3,9	50	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	0
3,9	50	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
3,9	50	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0
4,7	50	700	1,3	285; 0,147	375	5x5	1
4,7	50	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 1	1
4,7	50	700	1,3	285; 0,147	375	10x10 2	1
4,7	50	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 1	1
4,7	50	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 2	1
4,7	50	700	1,3	285; 0,147	375	15x15 3	1
4,7	50	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 1	1
4,7	50	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 2	1
4,7	50	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 3	1
4,7	50	700	1,3	285; 0,147	375	20x20 4	0
4,7	50	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 1	1

A_A	d_c	R	R_a	β_c, i_0	ΔE	Messraster	Hit/Miss
[cm ²]	[mm]	[Ωm]	[Ωm^2]	[V/dec] [$\mu A/cm^2$]	[mV]	[cm x cm]	[-]
4,7	50	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 2	1
4,7	50	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 3	1
4,7	50	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 4	0
4,7	50	700	1,3	285; 0,147	375	25x25 5	0

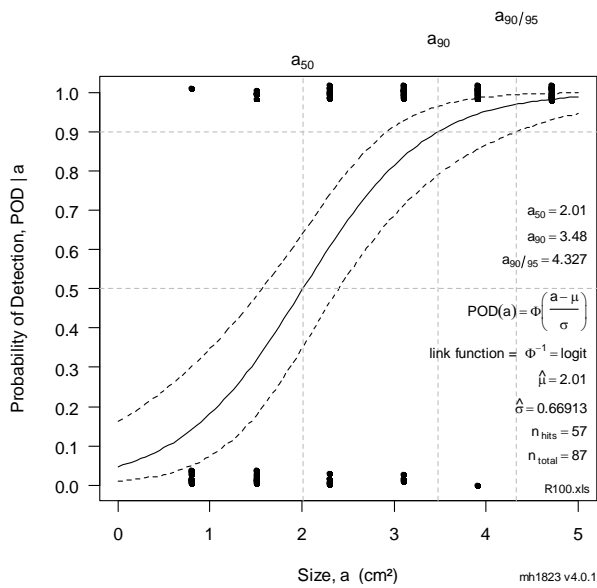
ANHANG C: POD-Kurven



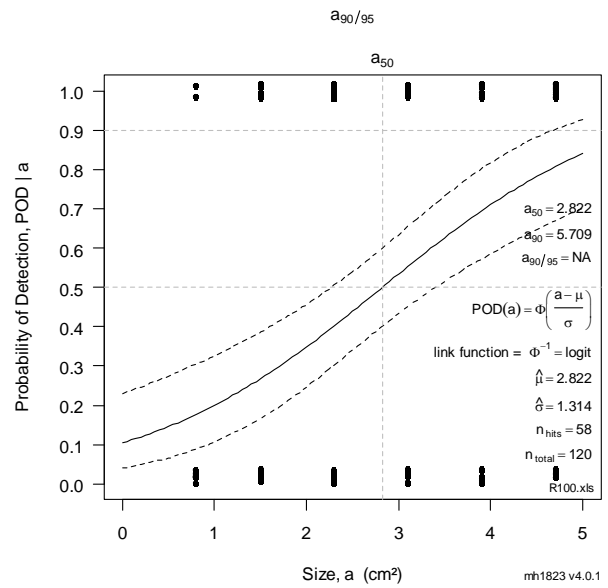
R 100; Messraster 5 x 5 cm²



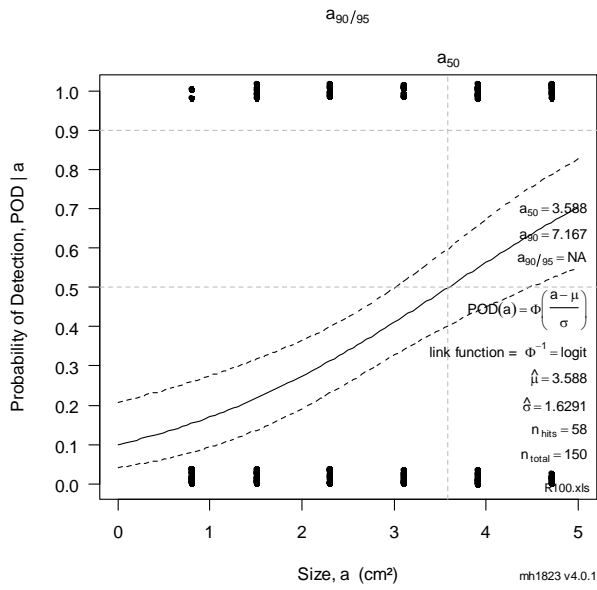
R 100; Messraster 10 x 10 cm²



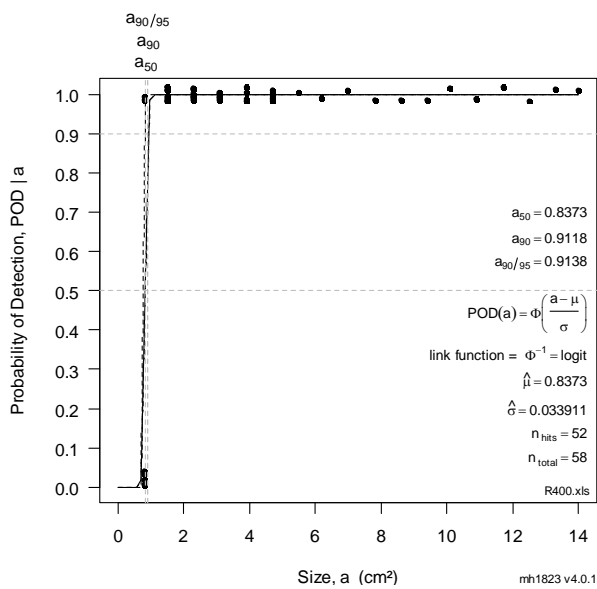
R 100; Messraster 15 x 15 cm²



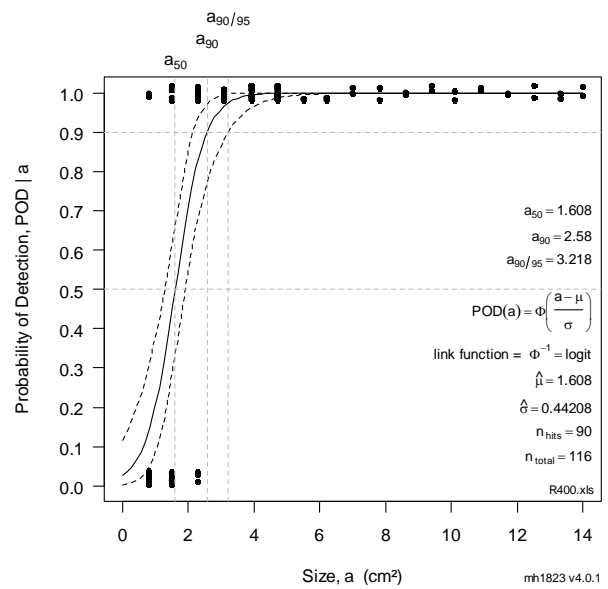
R 100; Messraster 20 x 20 cm²



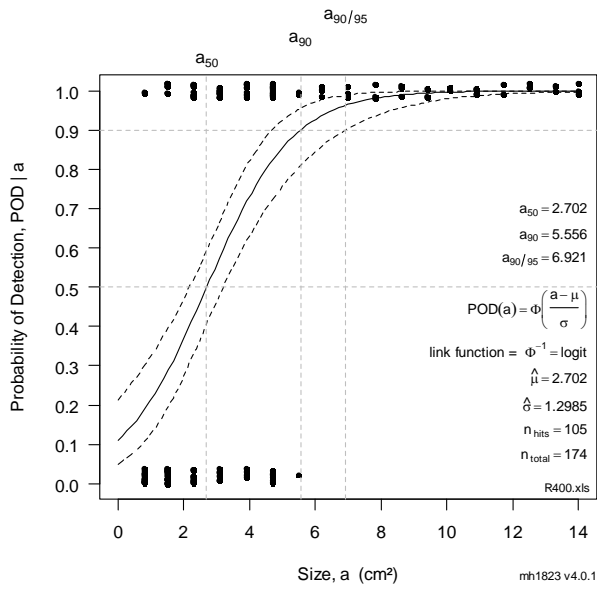
R 100; Messraster 25 x 25 cm²



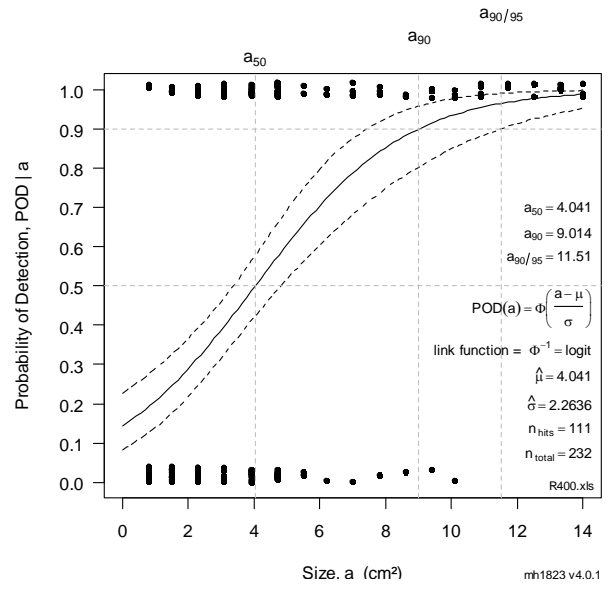
R 400; Messraster 5 x 5 cm²



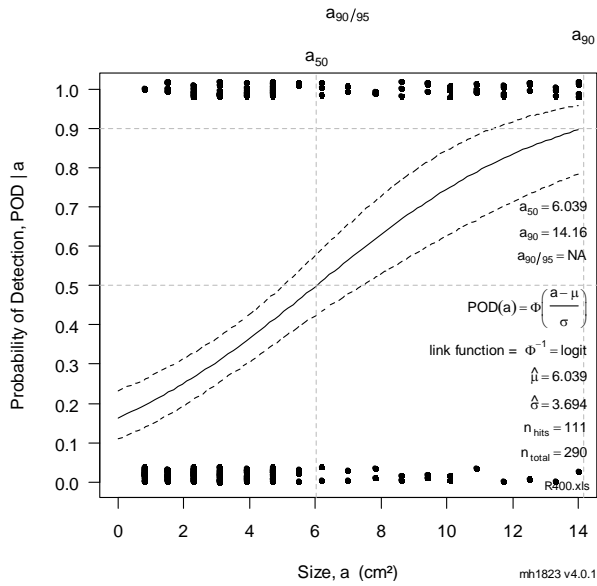
R 400; Messraster 10 x 10 cm²



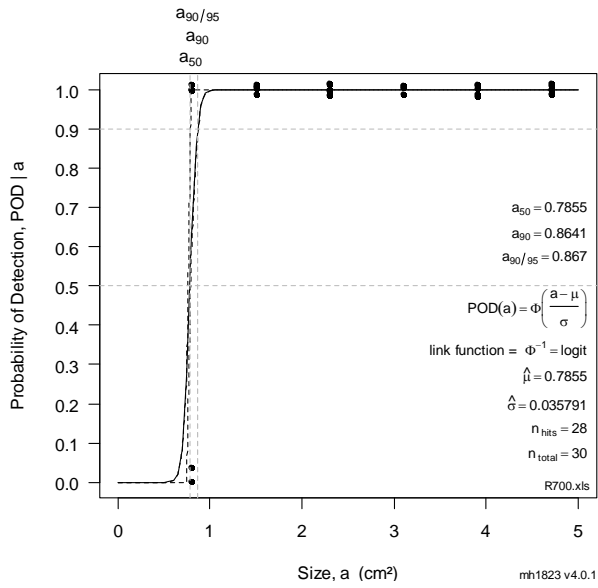
R 400; Messraster 15 x 15 cm²



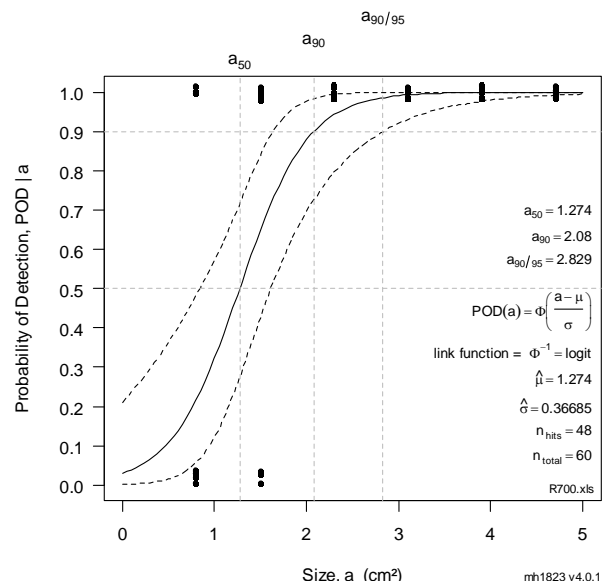
R 400; Messraster 20 x 20 cm²



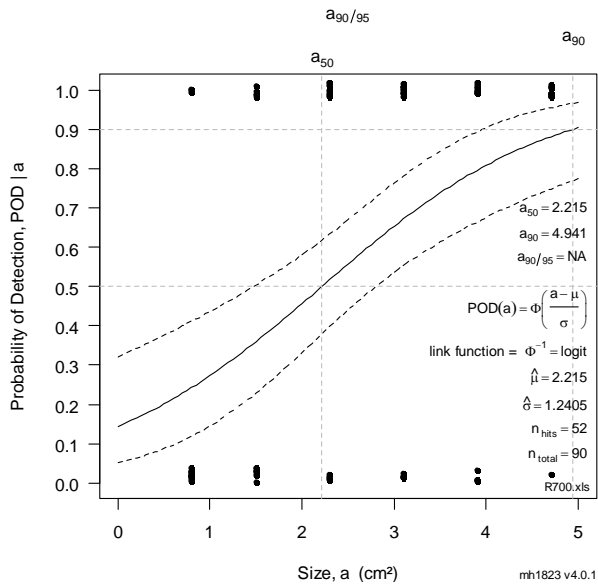
R 400; Messraster 25 x 25 cm²



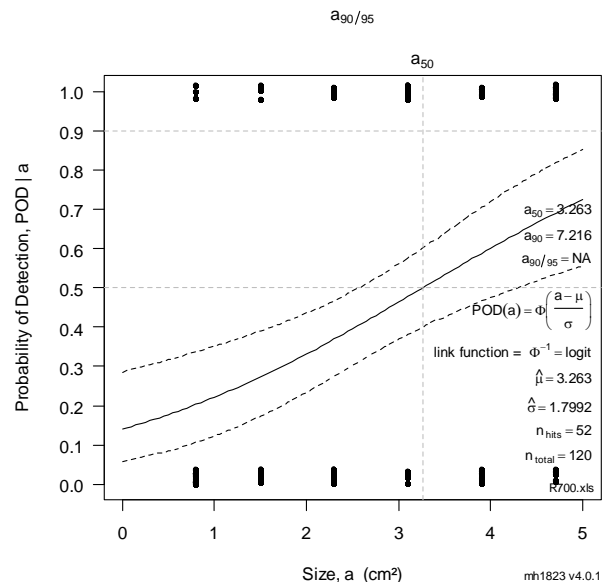
R 700; Messraster 5 x 5 cm²



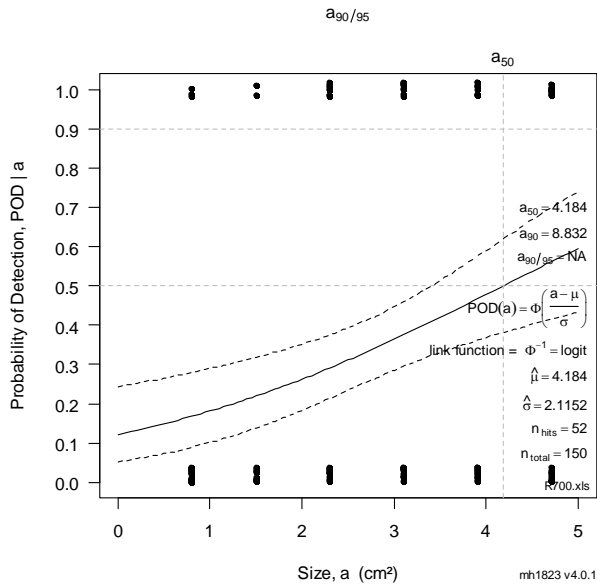
R 700; Messraster 10 x 10 cm²



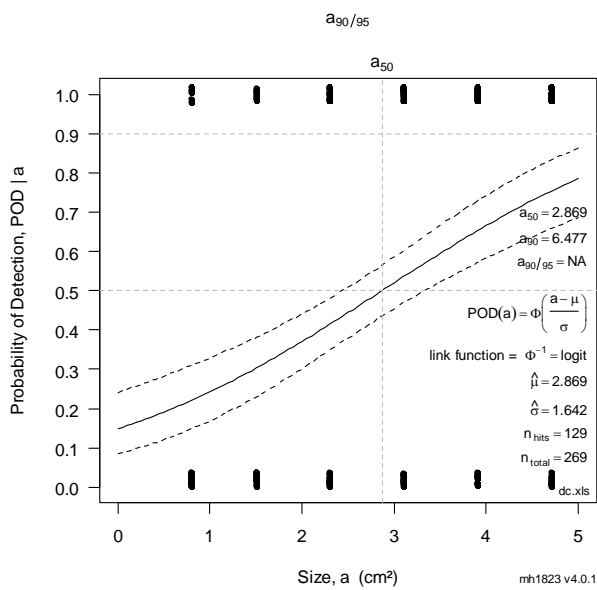
R 700; Messraster 15 x 15 cm²



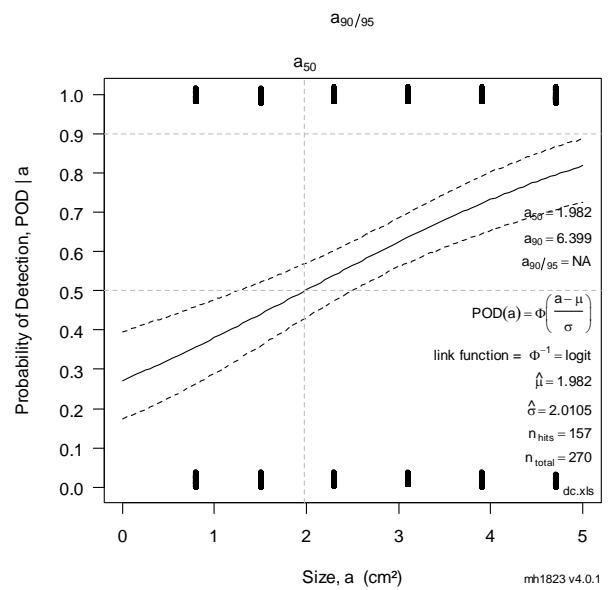
R 700; Messraster 20 x 20 cm²



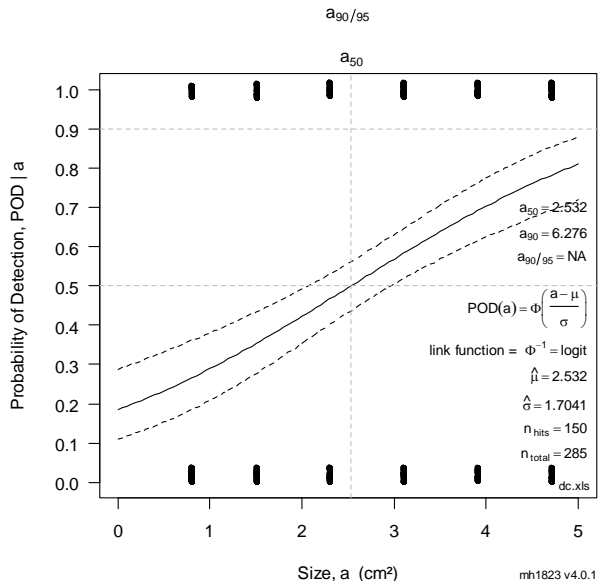
R 700; Messraster 25 x 25 cm²



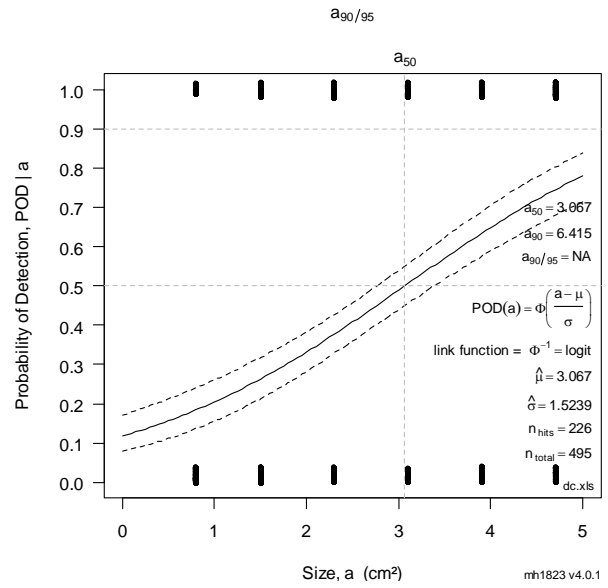
d_c 10 mm; Messraster 15 x 15 cm²



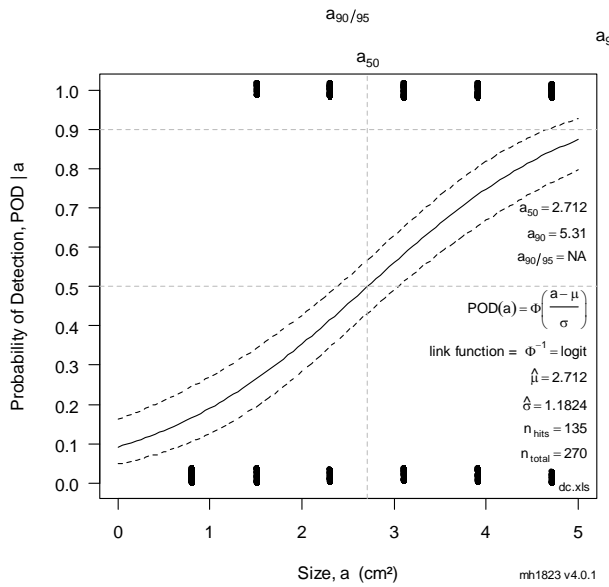
d_c 20 mm; Messraster 15 x 15 cm²



d_c 30 mm; Messraster 15 x 15 cm²



d_c 40 mm; Messraster 15 x 15 cm²



d_c 50 mm; Messraster 15 x 15 cm²