

Korrosions- und Verbundverhalten verzinkter Betonstähle in Betonen mit chromatreduzierten Zementen

T 3230

T 3230

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2010

ISBN 978-3-8167-8251-3

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

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Abschlussbericht

für den Zeitraum 01.05.2008 bis 28.02.2009
zum Forschungsvorhaben ZP 52-5- 7.283-1292/08

mit dem Thema:

Korrosions- und Verbundverhalten verzinkter Betonstähle in Betonen mit chromatreduzierten Zementen

Forschungsstelle: Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung
Unter den Eichen 87
12205 Berlin

Fachgruppe: VI.1 - Korrosion und Korrosionsschutz
Dr.-Ing. Bernd Isecke, Dir. und Prof.

Projektleiter: Dr.-Ing. Andreas Burkert

Bearbeiter: Dipl.-Ing. (FH) Jens Lehmann
Dipl.-Ing. (FH) Gino Ebell

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Durchgeführte Untersuchungen	4
2.1	Verwendete Untersuchungsmaterialien und Messgeräte	4
2.1.1	Beton	4
2.1.2	Stahl / verzinkter Stahl	5
2.1.3	Elektrochemische Messgeräte	5
2.1.4	Messgeräte für Stabauszugsversuche	5
2.2	Laborversuche	6
2.2.1	Potentialmessungen am verzinkten Stahl	7
2.2.2	Potential- und Strommessungen an Kontaktelementen Stahl / verzinkter Stahl	8
2.3	Stabauszugsversuche	9
2.3.1	Probekörperherstellung	9
2.3.2	Darstellung Stabauszugsversuch	11
3	Ergebnisse der Laborversuche	12
3.1	Verzinkter Stahl in verschiedenen Betonen	12
3.1.1	Ergebnisse in chromathaltigen Betonen	12
3.1.2	Ergebnisse in chromatreduzierten Betonen	15
3.2	Kontaktelemente Stahl / verzinkter Stahl in verschiedenen Betonen	17
3.2.1	Verhalten in chromathaltigen Betonen	17
3.2.2	Ergebnisse in chromatreduzierten Betonen	18
3.3	Verhalten glatter und gerippter Stäbe	19
4	Ergebnisse der Stabauszugsversuche	20
4.1	Ergebnisdarstellung der 7 Tage Prüfkörper	20
4.2	Ergebnisdarstellung der 28 Tage Prüfkörper	25
4.3	Betondruckfestigkeiten	30
5	Visuellen Auswertung der Grenzflächen	32
5.1	Ergebnisse verzinkter Stahl in Betonen	32
5.2	Kontaktelemente Stahl / verzinkter Stahl in verschiedenen Betonen	34
5.3	Metallographische Untersuchungen	36
6	Auswertung der Messergebnisse und Diskussion	38
6.1	Elektrochemische Untersuchungen	38
6.2	Stabauszugsversuche	47
6.3	Zusammenfassung	56
	Literatur	61

1 Einleitung

Die seit dem 17. Januar 2005 geltende EU-Richtlinie 53/2003/EG begrenzt den Gehalt an löslichem Chromat in Zementen auf Werte von maximal 2 ppm. Der Chromatgehalt des Zements wird in der Literatur als eine wesentliche Einflussgröße für die schnelle Passivierung von verzinkten Bauteilen in Beton angesehen. Aus der Reduzierung der Chromatgehalte ergeben sich Unsicherheiten bezüglich des Verbundverhaltens verzinkter Betonstähle.

Durch die abgesenkten Chromatwerte wird eine verstärkte Anfangskorrosion der Zinkschichten im Frischbeton erwartet. Dabei ist ein wesentlicher Einfluss über die Alkalität der verwendeten Zemente zu erwarten. Befürchtet wird eine Beeinträchtigung des Verbundverhaltens zwischen verzinktem Stahl und Beton durch die Bildung von Wasserstoff in der Verbundzone Stahl-Beton. Weiterhin werden Rissbildungen in der Verzinkungsschicht oder ein Abplatzen von Schichten als mögliche Folge einer heftigen Zinkauflösung mit Wasserstoffentwicklung erwartet. Gleichzeitig wird die Frage erhoben, inwieweit dadurch die dauerhafte Schutzwirkung der Verzinkungsschicht in Frage gestellt wird.

Im Beton bilden sich bei pH-Werten bis maximal 13,4 Hydrozinkatschichten aus, welche die weitere Zinkauflösung stark herabsetzen. Die Zinkatbildung verlängert die Abbindezeit und kann durch die gleichzeitige Wasserstoffentwicklung zu einer mechanischen Auflockerung der Verbundflächen führen. Die Chromate bewirken eine Verminderung der Zinkkorrosion. Insbesondere verhindern sie ein Absinken des Potentials in den Bereich der Wasserstoffentwicklung [1].

Das Verbundverhalten der Betonstähle wird durch den Haftverbund und den Scherverbund charakterisiert. In der Literatur wurde nachgewiesen, dass der Haftverbund der verzinkten Stähle über denen der unverzinkten Betonstähle liegt. Ursächlich dafür ist letztlich die starke Korrosionsreaktion des Zinks im Frischbeton im Vergleich zum Stahl. Die in den Zementstein einwandernden Korrosionsprodukte führen zu einer besseren mechanischen Verzahnung zwischen Zinkschicht und umgebenden Zementstein. Diese führt zu signifikant höheren Werten beim Haftverbund [1, 2].

Insofern kann es auch nicht verwundern, dass beim Vergleich chromatarmer und chromatreicher Zemente die Verbundspannungen sowohl beim Haftverbund als auch beim Scherverbund bei den chromatarmen Zementen (bei üblichen Zinkschichtdicken) regelmäßig höher sind als bei den chromatreichen Zementen [2]. Die stärkere Korrosionsreaktion am Zink führt hier offensichtlich zu einer noch stärkeren mechanischen Verzahnung an der Verbundfläche. Eine Störung des Verbundverhaltens durch den entstehenden Wasserstoff wurde demnach nicht festgestellt.

Zink hat wegen des stark gehemmten Ladungsdurchtritts eine hohe Überspannung für die Wasserzersetzung, wodurch die Bildung von Wasserstoff gehemmt ist [3]. Eine Wasserstoffentwicklung wird demnach bevorzugt an Fehlstellen der Verzinkungsschicht (freiliegender Stahl) auftreten. Da Zink für Wasserstoff nahezu undurchlässig ist, kann eine Wasserstoffdiffusion in den Werkstoff bzw. in die Grenzfläche Stahl/Zink ebenfalls nur an den Fehlstellen als realistisch angesehen werden [4].

Eine aktuelle Zusammenfassung des vor Bearbeitung des Forschungsvorhabens vorliegenden Wissens wird von Nürnberger [5] gegen. In der abschließenden Beurteilung wird eingeschätzt, dass durch die Absenkung der Chromatgehalte das Verbundverhalten aus ingenieurtechnischer Sicht nicht nachteilig beeinflusst wird.

Unter praktischen Bedingungen werden verzinkte Betonstähle bzw. verzinkte Bauteile überwiegend im elektronenleitenden Kontakt mit nicht verzinktem Betonstahl oder ggf. der Stahlschalung stehen. An der kathodisch polarisierten Stahloberfläche läuft die Wasserzer- setzung weit weniger stark gehemmt ab, als an den verzinkten Flächen. Deshalb kommt es beim Kontakt zwischen verzinkten und unverzinkten Betonstählen stets zu einer Wasserstoff- entwicklung am unverzinkten Betonstahl. Eine Wasserstoffbildung am Zink tritt dann auch während einer heftigen Anfangskorrosion in Frischbeton nicht auf. Nach eigenen Untersuchungen ist die Polarisation des unverzinkten Stahles in den Bereich der Wasserstoffbildung stark vom Flächenverhältnis Stahl:Zink abhängig. Wasserstoffbildung am unverzinkten Stahl tritt nur bei Flächenverhältnissen Stahl:Zink $< 10:1$ auf. Bei größeren Flächenverhältnissen erreicht das sich ausbildende Mischpotential keine Werte, die für die Wasserstoffentwicklung notwendig wären. In diesen Fällen kann also eine Verbundstörung unabhängig vom Chromat- bzw. Alkaligehalt überhaupt nicht auftreten [6, 7].

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens sollen eine abschließende Bewertung des Einflusses chromatreduzierter Zemente auf das Korrosionsverhalten verzinkter Betonstähle und mögliche Auswirkungen auf das Verbundverhalten gestatten. Insbesondere sollen die bestehenden Unsicherheiten über die Auswirkungen chromatreduzierter Zemente auf das Korrosionsverhalten und die Deckschichtbildung von verzinkten Betonstählen sowie deren Auswirkungen auf das Verbundverhalten durch eine umfassende Untersuchung der relevanten Einflussgrößen beseitigt werden.

Zur Klärung der Fragestellungen wurden systematische Untersuchungen an einer hinreichend großen Anzahl von Prüfkörpern unter dem Einsatz verschiedener Zemente durchgeführt. Dabei wurden Zemente mit und ohne Beimengung von Chromatreduzieren aus einer Charge verwendet und unter gleichen Versuchsbedingungen geprüft. Durch umfangreiche elektrochemische Untersuchungen sollte geklärt werden, inwieweit sich die Korrosionsprozesse, die Wasserstoffentwicklung und die zeitliche Ausbildung schützender Deckschichten an verzinktem Betonstahl in Betonen mit unterschiedlichen Zementen tatsächlich unterscheiden. Dabei war mindestens ein Zement einzusetzen dessen Na_2O - Äquivalent zwischen 1 und 1,1 liegt. Weiterhin sollte auch die Auswirkung der Wasserstoffbildung am Betonstahl untersucht werden, wenn dieser in Kontakt mit verzinktem Betonstahl steht. Ergänzende Untersuchungen zur Beurteilung von Veränderungen in der Verbundzone und der Zinkschicht sollen mögliche Unterschiede aufzeigen.

Anhand von Stabauszugversuchen [8] sollte ermittelt werden, ob die ggf. beobachteten Unterschiede im Korrosionsverhalten eine Auswirkung auf das Verbundverhalten zeigen. Durch den Einsatz glatter und gerippter Stähle sollen Unterschiede im Haft- und Scherverbund herausgestellt und hinsichtlich praxisrelevanter Unterschiede bewertet werden.

2 Durchgeführte Untersuchungen

2.1 Verwendete Untersuchungsmaterialien und Messgeräte

2.1.1 Beton

Für die Herstellung der Untersuchungsbetone wurden 3 in der Baupraxis übliche Zementarten verwendet. Während des Herstellungsprozesses der Zementarten wurde im Herstellerwerk jeweils vor der Zugabe des Chromatreduzierers ein Teil der Charge entnommen, der somit den ursprünglichen Chromatgehalt des jeweiligen Zementes hat. Nach der Zugabe des Chromatreduzierers wurde der heute handelsübliche chromatreduzierte Zement entnommen. Die chromathaltigen und chromatreduzierten Zemente der jeweiligen Sorte sind somit immer aus einer Charge, dadurch ist eine unmittelbare Vergleichbarkeit möglich. Im Folgenden werden die verwendeten Zemente wie in Tabelle 1 bezeichnet.

Tabelle 1: Bezeichnung und Na₂O-Äquivalente der verwendeten Zemente (Chromatgehalte in Klammern)

Zementart Kurzzeichen	Bezeichnung (Chromatgehalt)		Na ₂ O-Äquivalent
	chromatreduziert	chromathaltig	
CEM I 42,5 R	CEM I (< 2,0 ppm)	CEM I* (5,91 ppm)	0,89
CEM II/A-M (S-LL) 42,5 R	CEM II (< 2,0 ppm)	CEM II* (5,88 ppm)	0,85
CEM III/A 42,5 N-NA	CEM III (< 2,0 ppm)	CEM III* (3,49 ppm)	0,56

Als Grundrezeptur des Betons wurde ein kritischer Zementgehalt nach DIN EN 1766 mit 395 kg/m³ Zement gewählt. Aufgrund des hohen Zementanteils können zementbedingte Unterschiede in der Verbundzone genauer differenziert werden.

Weitere Betonparameter waren:

Druckfestigkeitsklasse: C 40/50

Konsistenzklasse: F4

Gesteinskörnung: Standardsieblinie A/B, Größtkorn 16 mm für Stabauszugsversuche
Standardsieblinie A/B, Größtkorn 4 mm für Laborversuche

Der w/b-Wert wurde entsprechend DIN EN 1766 [9] auf 0,45 eingestellt und als Variante dazu für höhere Porosität und stärkere Praxisnähe auf 0,55 erhöht. In den Ergebnisdarstellungen wird die Variante 0,55 mit dem Kürzel „w/b“ am Ende versehen.

Zur Vereinfachung wird nachfolgend Beton mit chromatreduzierten Zementen als „chromatreduzierter Beton“ und Beton mit chromathaltigen Zementen als „chromathaltiger Beton“ bezeichnet.

2.1.2 Stahl / verzinkter Stahl

Es wurden sowohl die in der Praxis verwendeten gerippten Betonstähle, als auch glatte Betonstähle für die Stabauszugsversuche verwendet. Dies soll eine Differenzierung zwischen Verbund- und Verzahnungseffekten durch die Rippen ermöglichen. Folgende Dimensionen kamen zum Einsatz:

- Ø 16 mm; Länge 550 mm; BSt 500 S, gerippt
- Ø 16 mm ; Länge 550 mm; BSt 500 G, glatt

Analog zu den Stabauszugsversuchen sind auch für die Laborversuche glatte und gerippte Stäbe untersucht worden, jedoch wurden hierbei kleinere Dimensionen verwendet.

- Ø 10 mm ; Länge 100 mm; BSt 500 G, glatt
- Ø 10 mm ; Länge 100 mm; BSt 500 S, gerippt

Ein Teil der Stäbe jeder Position wurde in einer Verzinkerei vollständig feuerverzinkt. Die mittlere Zinkschichtdicke lag bei 140 µm. Der restliche Teil blieb im Lieferzustand mit Walzhaut.

Das Kontaktelement Stahl / verzinkter Stahl wurde bei den Stabauszugsversuchen über aufgelegte Stahlbleche bzw. feuerverzinkte Stahlbleche realisiert, um keine Gefügestörungen durch zusätzlich eingelegte Stabstähle in den Probekörpern zu erzeugen.

2.1.3 Elektrochemische Messgeräte

Alle Potentialmessungen sind mit gesättigten Silber/Silberchlorid-Elektroden (Ag/AgCl ges.), mit einem Bezugspotential von +199 mV gegen NHE, durchgeführt worden. Die Potentialangaben in den Ergebnisdarstellungen beziehen sich ausschließlich auf die gesättigte Silber/Silberchlorid-Elektrode.

Zur Messdatenerfassung bei den Laborversuchen kamen Datenlogger des Typs *HP Agilent 34970 A* zum Einsatz. Die Abtastrate betrug bei allen Versuchen 0,5 Hz.

2.1.4 Messgeräte für Stabauszugsversuche

Die Stabauszugsversuche erfolgten nach den Vorgaben der Rilem RC 6, „Pull Out Test“ [8]. Die Lasteinleitung wurde kraftgeregelt, mit einer konstanten Kraft pro Zeit [N/sec], diese beträgt 127 N pro Sekunde. Für die Kraftmessung kam eine digitale Kraftmessdose mit einer max. Kraft von 200 kN zum Einsatz. Die Einspannung der Stäbe erfolgte mittels einer hydraulischen, automatisch nachregelnden Einspannvorrichtung. Der Auszugsweg wurde über einen, am unteren Ende des Stabes montierten, Feinwegmesser erfasst. Zuvor wurde dieser für jede Messung justiert und ein Nullabgleich durchgeführt, der maximale Auflösungsbereich des Feinwegmessers beträgt 10^{-4} mm. Die Probekörper waren im Zuge

des Einspannvorganges federnd gelagert, um eine durch die hydraulischen Spannbacken einwirkende Druckkraft zu kompensieren.

2.2 Laborversuche

Bei vorangegangenen Untersuchungen an der BAM [6, 7], die sich ebenfalls mit verzinkten Stählen im Beton beschäftigten, stellte sich heraus, dass kritische Bedingungen nur in den ersten Stunden nach der Einbringung des Betons vorliegen. Aus diesem Grunde musste mit den Messungen unmittelbar nach der Herstellung der Proben begonnen werden. Für die notwendigen Untersuchungen im Frischbeton hat sich die Verwendung von Pappschalungen bewährt. Die Versuchsproben können so unmittelbar nach der Herstellung über den alkalischen Elektrolyten mit einer Bezugs elektrode verbunden werden (Abb. 1 und 3).

Die verzinkten Betonstahlproben sind ohne Vorbehandlung mit der ausgebildeten Luftdeckschicht in die Untersuchungsbetone eingebracht worden. Die verwendeten Betonstähle wurden im US-Bad mit Aceton entfettet und anschließend mit Ethanol gespült.

In der Tabelle 2 ist die Parametermatrix der durchgeführten elektrochemischen Laborversuche dargestellt.

Die Temperatur ist bei den Kontaktelementmessungen variiert worden. Hierzu wurde die Kalziumhydroxidlösung in einem voll isolierten Behälter auf 40°C temperiert und die Probekörper darin gemessen. Durch den geschlossenen Behälter wurde auch der die Probe umgebende Luftraum auf diese Temperatur erwärmt.

Aus den Untersuchungsergebnissen der BAM aus [7] war bekannt, dass Zemente mit einem hohen Na₂O-Äquivalent die Zeiten bis zur stabilen Deckschichtbildung signifikant verlängern, daher wurde in Zusatzversuchen das Na₂O-Äquivalent des CEM I 42,5 R auf einen Wert von 1,2 aufdotiert.

Tabelle 2: Parametermatrix der durchgeführten Laboruntersuchungen

	Zement	Stab	Temperatur	w/b	Σ Serie	Proben je Serie	Σ Proben
Betonstahl / verz. Betonstahl St : Zn = 2:1	3	2	2	1	6	3	18
	3 *	2	2	1	6	3	18
verz. Betonstahl	3	2	1	2	24	3	72
	3 *	2	1	2	24	3	72
verz. Betonstahl CEM I mit Na-Äq. 1,2	1	2	1	1	2	3	6
	1 *	2	1	1	2	3	6
*) chromathaltig					Σ Proben gesamt		192

Für jeden Parameter sind 3 Vergleichsproben hergestellt und elektrochemisch untersucht worden.

2.2.1 Potentialmessungen am verzinkten Stahl

Zum grundsätzlichen Verhalten verzinkter Betonstähle in den unterschiedlichen Betonen sind die Freien Korrosionspotentiale aufgezeichnet worden. In Abb. 1 ist der Versuchsaufbau schematisch dargestellt. Hierbei kann die Verweildauer im Bereich der Wasserstoffentwicklung und der Zeitpunkt der Deckschichtbildung an den verzinkten Stählen beschrieben werden.

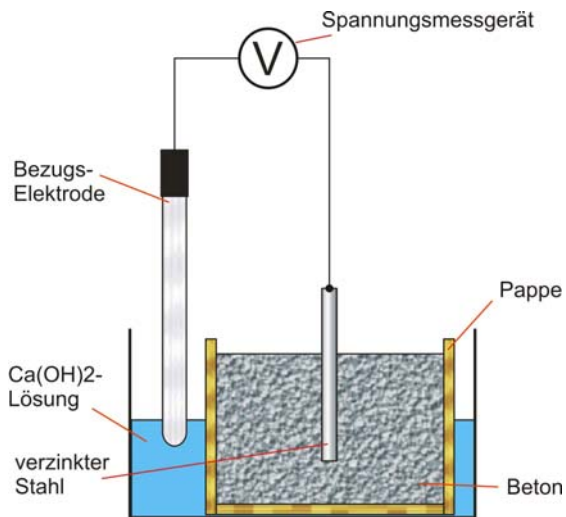


Abb. 1: Skizze des Versuchsaufbaus zur Messung des Freien Korrosionspotentials von verzinktem Stahl in Beton

Aufgrund der großen Probenanzahl wurde ein Versuchsstand eingerichtet, der die simultane Messung von 24 Probekörpern ermöglicht (Abb. 2).



Abb. 2: Versuchsstand zur simultanen Messung der Freien Korrosionspotentiale an 24 Probekörpern mit verzinktem Stahl in verschiedenen Betonen

2.2.2 Potential- und Strommessungen an Kontaktelementen Stahl / verzinkter Stahl

Zur Erfassung der Mischpotentiale und der Elementströme sind Untersuchungen an Kontaktelementen Stahl / verzinkter Stahl durchgeführt worden. Bei diesen Versuchen wurde der Abstand zwischen Zink und Stahl auf 3 cm und das Flächenverhältnis Stahl : verzinkter Stahl auf 2:1 eingestellt. Die Kontaktpartner waren dazu planparallel angeordnet (Abb. 3). Zum Erreichen des Flächenverhältnisses sind zwei Stahlproben kurzgeschlossen worden.

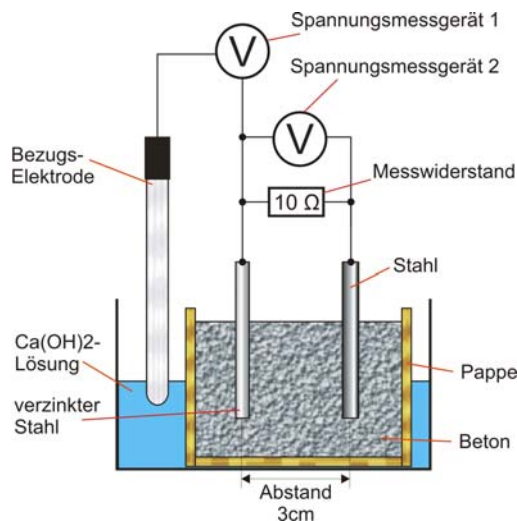


Abb. 3: Skizze des Versuchsaufbaus zur Messung des Mischpotentials und des Elementstromes am Kontaktelement Stahl / verzinkter Stahl in Beton

Die Mischpotentiallagen und die aus den Elementströmen zu errechnenden Elementstromdichten und Ladungsmengen geben Aufschluss über die Menge und die Intensität der Wasserstoffentwicklung am Stahl, sowie Erkenntnisse zur Deckschichtbildung am verzinkten Stahl.

Für verschiedene baupraktische Anwendungen verzinkter Betonstähle / Einbauteile ist diese Konstellation möglich.

2.3 Stabauszugsversuche

2.3.1 Probekörperherstellung

Die Schalung, für die Herstellung der Probekörper, hat eine Innenkantenlänge von 20 x 20 x 20 cm. Der herauszuziehende Stab befindet sich in einer horizontalen Lage und parallel zu den Seitenwänden im Probekörper. Auf Grundlage der Rilem RC6 [8] ergibt sich bei einem Stabdurchmesser von 16 mm eine effektive Einbindelänge von 8 cm, der nicht kraftschlüssig verbundene Bereich des Stabes wird mittels einer Kunststoffhülse entkoppelt. In Abb. 4 ist die Lage des Stabes und der Kunststoffhülse dargestellt, der Übergang des Stabes in die Schalung und auch in die Hülse wurde mittels eines Abdichtungsmaterials verschlossen. Diese Maßnahme ist erforderlich, damit eine Änderung des Verbundverhaltens durch eventuell eindringenden Zementleim in die Kunststoffhülse unterbunden wird.

Der Mischvorgang erfolgte in einem Zyklus- Mischer. Vor dem Befüllen der Probekörper wurden Frischbetonparameter wie Ausbreitmaß, Luftporengehalt und Frischbetonrohichte ermittelt. Nach dem Befüllen der Probekörper erfolgte der Verdichtungsprozess auf einem Rütteltisch (Schalungsrüttler), siehe Abb. 4.



Abb. 4: links: Schalung mit vorbereitetem verzinktem Betonstahl; rechts: Herstellungsprozess

Neben den Frischbetonparametern wurden drei Betonprobewürfel zur Ermittlung der Festbetonparameter und zur Qualitätssicherung hergestellt. Die Probekörper wurden nach 24 h ausgeschalt, innerhalb der ersten 24 h wurden diese unter einer Folie gelagert. Bis zur Prüfung lagerten die Probekörper in einem definierten Klima von 20°C und 85 % relativer Luftfeuchte.

Es wurden insgesamt 176 Probekörper mit der in Tabelle 3 gezeigten Probenmatrix hergestellt. Die Grundlagen für die Auswahl der Parameter sind bereits im Kapitel 2.2 erörtert.

Tabelle 3: Parametermatrix der durchgeführten Stabauszugsversuche

	Zement	Stab	w/b	Prüfalter	Temperatur	Σ Serie	Proben je Serie	Σ Proben
Betonstahl	3	1 ^(t)	1	2	1	6	3	18
Betonstahl / verz. Stahlschalung	1	1 ^(t)	1	2	1	2	3	6
Verz. Betonstahl CEM I (Na ₂ O-Äq. = 1,2)	1	1 ^(t)	1	2	1	2	3	6
verzinkter Betonstahl / Stahlschalung	1	1 ^(t)	1	2	1	2	3	6
verzinkter Betonstahl	3	2	1	2	1	12	5	60
	3*	2	1	2	1	12	5	60
	1	1 ^(t)	1	2	1 ^(t)	2	5	10
	1	1 ^(t)	1 ^(w)	2	1	2	5	10
*) chromathaltig							Σ Proben gesamt	176
^{t)} gerippt								
^{w)} variiertes w/b Wert								
^{t)} variierte Temperatur								

In der vorab dargestellten Tabelle ist unter dem Punkt verzinkter Betonstahl mit Stahlschalung die nachfolgend dargestellte Variante zu verstehen. Der Einsatz einer realen Stahlschalung lässt sich hier nicht ohne übermäßigen Aufwand realisieren. In Abb. 5 ist dargestellt, wie der Kurzschluss und die ionenleitende Verbindung zwischen Stahlplatte und verzinktem Betonstahl hergestellt worden ist. Die Stahlplatte wurde direkt nach dem Verdichtungsvorgang auf den frischen Beton gelegt.

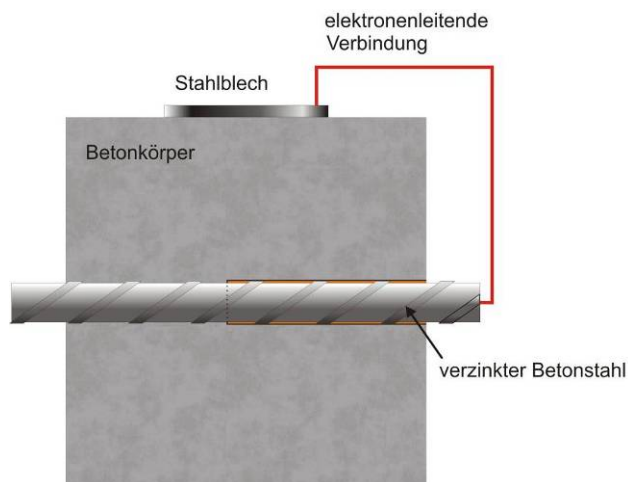


Abb. 5: Schematische Darstellung eines Kontaktelements für Stabauszugsversuche

2.3.2 Darstellung Stabauszugsversuch

Die Probekörper wurden je Parameter nach 7 und 28 Tagen herausgezogen. Der Versuchsaufbau und die Messgeräte sind Abb. 6 zu entnehmen.

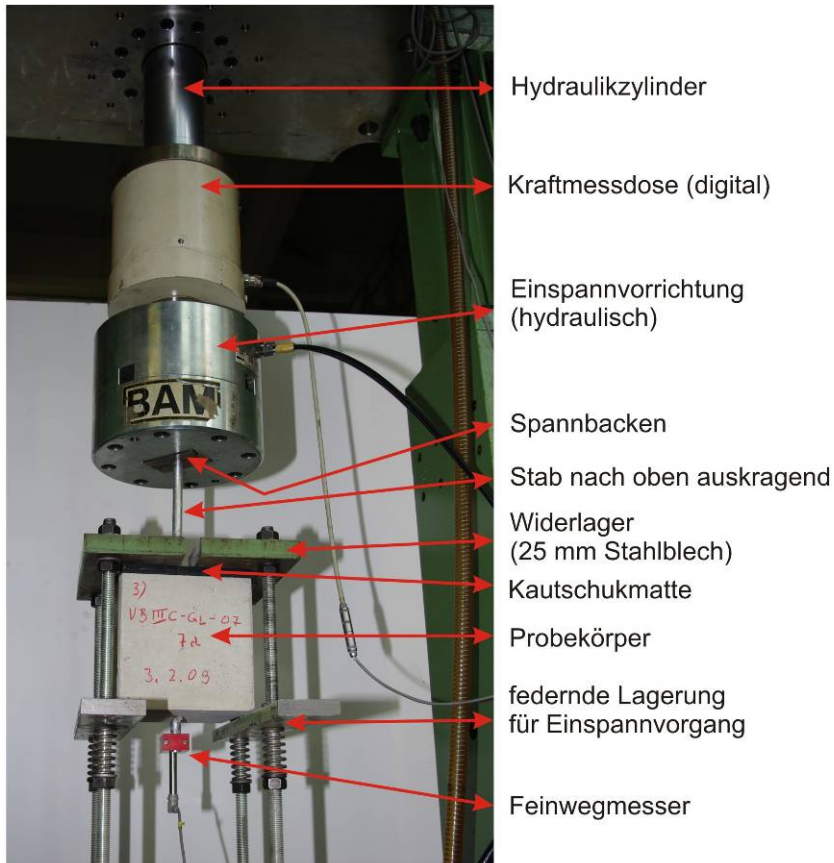


Abb. 6: Prüfstand für Stabauszugsversuche

Im Verlauf des Ausziehversuches kamen zwei Abbruchkriterien zum Tragen, zum einen ein Zugkraftabfall von größer 5 kN und zum anderen ein maximaler Verschiebeweg des Stabes von 9 mm. Letzteres dient dem Schutz des Feinwegmessers, da dieser nur einen maximalen Messweg von ± 5 mm ($\Sigma 10$ mm) hat und fest am unteren Ende des Stabes montiert ist.

3 Ergebnisse der Laborversuche

3.1 Verzinkter Stahl in verschiedenen Betonen

3.1.1 Ergebnisse in chromathaltigen Betonen

Charakteristische Potentialverläufe von Probekörpern aus chromathaltigen Betonen sind in Abb. 7 dargestellt. Der bei allen Proben innerhalb der ersten Messwerte festgestellte Potentialabfall, ist auf die Reduktion der Luftdeckschicht zurückzuführen. Es konnte ein deutlicher Einfluss der Zementart auf die Verläufe der Freien Korrosionspotentiale des verzinkten Stahles festgestellt werden. Die Zinkauflösung wird in Beton mit chromathaltigem CEM I innerhalb der ersten 24 Stunden inhibiert, danach folgt eine starke Auflösungsreaktion, bevor sich eine Deckschicht ausbildet. Beim CEM II, in dem der Portlandzementanteil, respektive der Chromatanteil geringer ist, löst sich das Zink in den ersten Stunden aktiv auf, erst dann wird der Chromatanteil wirksam und inhibiert die Auflösungsreaktion. Nachdem das Chromat im Bereich der Grenzfläche aufgebraucht ist, fällt das Potential wieder bis in einen Bereich von ca. -1300 mV ab und es kommt zu einer erneuten Zinkauflösung, bevor sich eine Deckschicht ausgebildet hat. Beim CEM III ist Wirkung des Chromats auf den Potentialverlauf nicht mehr sicher erkennbar.

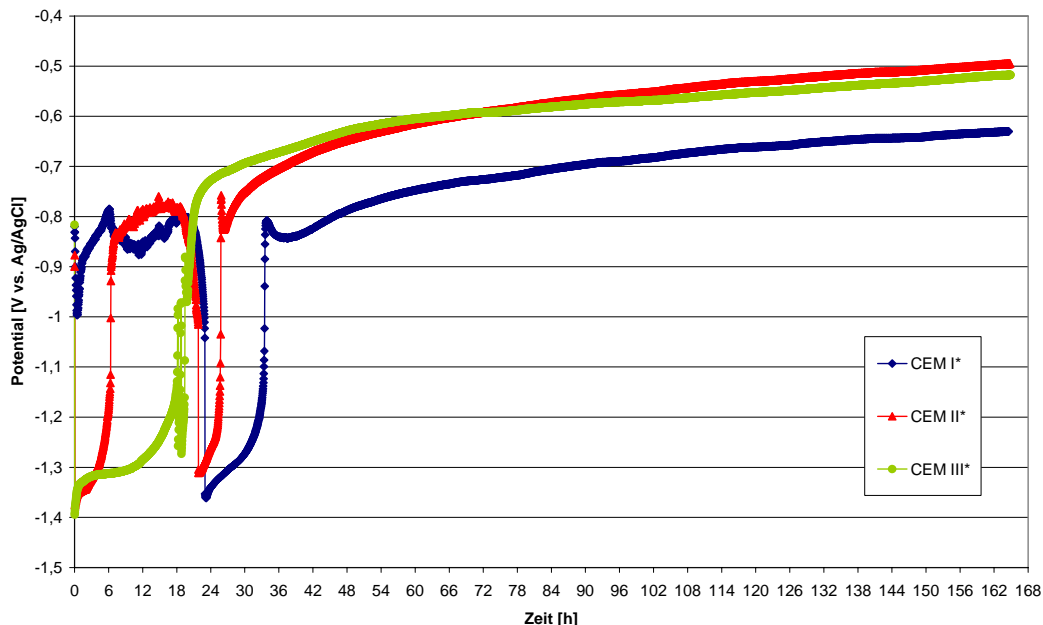


Abb. 7: Einfluss der Zementart auf den Verlauf des Freien Korrosionspotentials von verzinkten Stählen in **chromathaltigen** Betonen

Bei den in Abb. 8 dargestellten Potentialverläufen verzinkter Stähle in Betonen mit w/b 0,55 kann eine zeitliche Verzögerung der Deckschichtbildung am verzinkten Stahl festgestellt werden. Der Einfluss der Zementart auf die Potentialverläufe ist ebenfalls signifikant.

Proben in CEM I* w/b zeigen auch hier die längsten Zeiten im Bereich aktiver Potentiale, wobei die Zinkauflösung innerhalb der ersten 18 Stunden durch das Chromat inhibiert wird und die Potentiale in diesem Zeitraum deutlich oberhalb der Wasserstoffentwicklung liegen. Danach folgt eine Phase der Zinkauflösung, in der die Potentiale für ca. 60 Stunden auf Werte zwischen -1300 und -1400 mV abfallen. Im Anschluss daran erfolgt eine Deckschichtbildung am verzinkten Stahl, die mit einem Potentialanstieg auf -750 mV einhergeht. Bei den Proben in CEM II* w/b verzögert und verkürzt sich die Inhibitionsphase des Chromates und kommt erst nach 10-12 Stunden zum Tragen, dauert dann jedoch auch nur 6-8 Stunden. Beim CEM III* w/b ist die Inhibitions-Wirkung des Chromates nicht mehr von Bedeutung. Nach ca. 18 Stunden kommt es für wenige Minuten zu einem Potentialanstieg auf ca. -920 mV, danach fällt das Potential jedoch sofort wieder auf ca. -1250 mV ab.

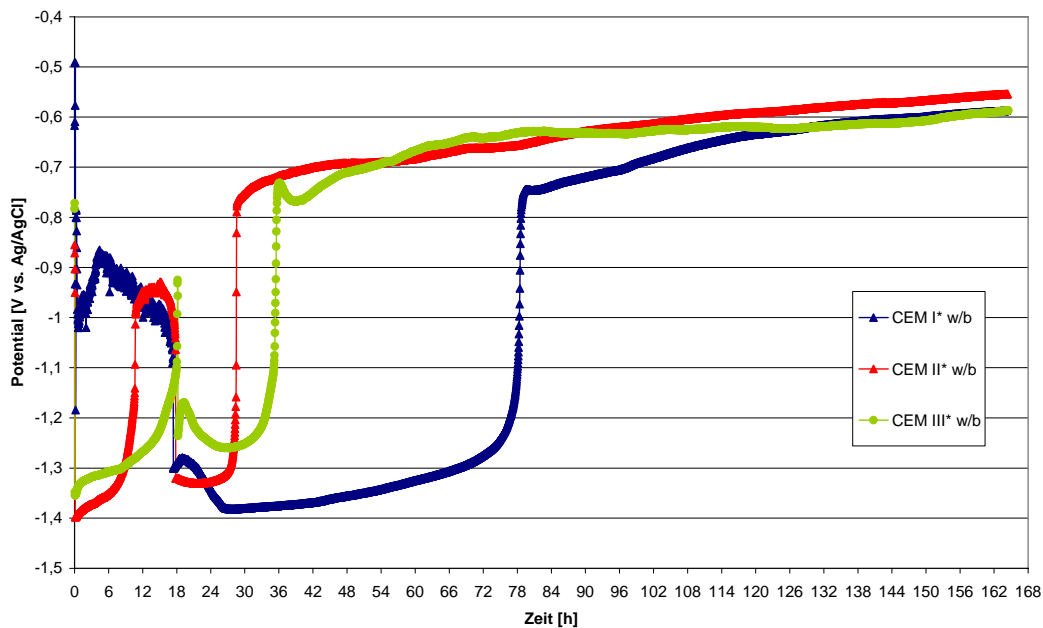


Abb. 8: Einfluss des w/b-Wertes auf den Verlauf des Freien Korrosionspotentials von verzinkten Stählen in **chromathaltigen** Betonen

An einer verzinkten Stahlprobe in chromathaltigem Beton CEM I* w/b wurden zu verschiedenen Zeiten Stromdichte-Potential-Kurven (SPK) aufgenommen. In Abb. 9 oben sind die entsprechenden Zeitpunkte der Messungen farblich dargestellt. Die dazugehörigen SPK sind in Abb. 9 unten abgebildet.

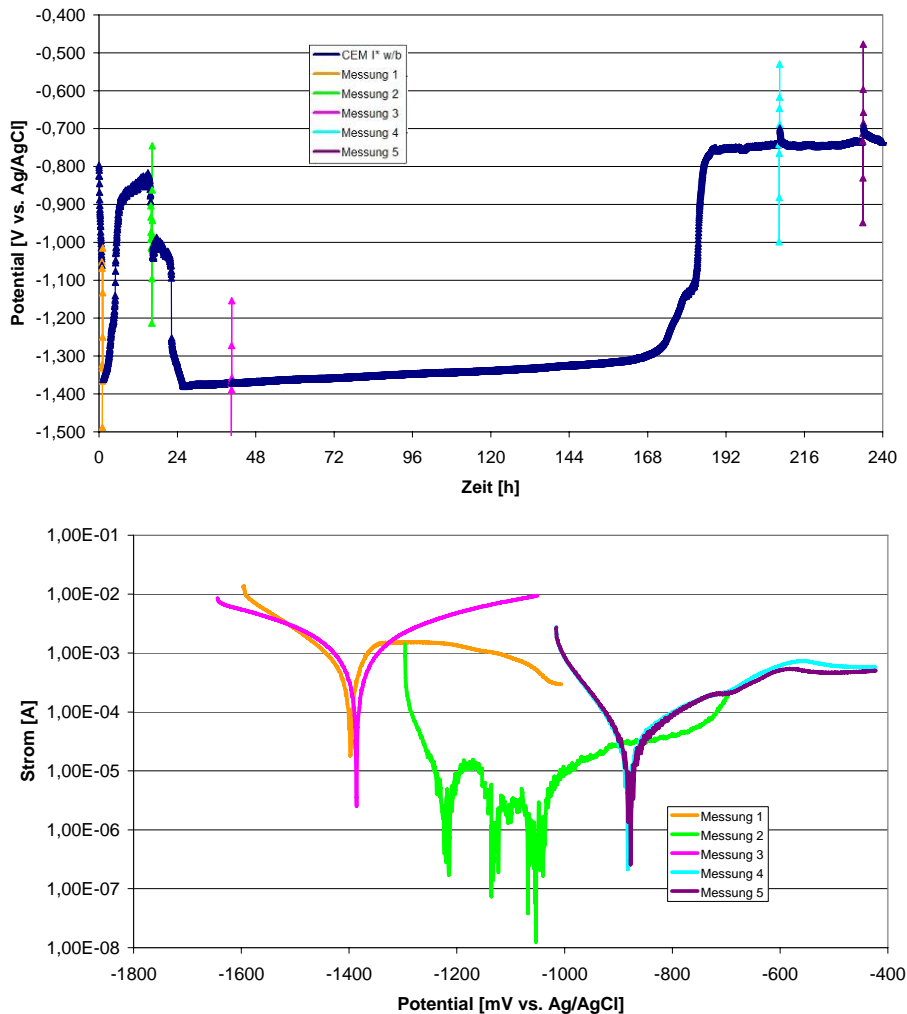


Abb. 9: Aufnahme von Strom-Potential-Kurven an einem verzinkten Stahl in **chromathaltigem** Beton CEM I* w/b zu verschiedenen Zeitpunkten bzw. Zuständen; oben: Potentialverlauf und Zeitpunkte der SPK-Messungen; unten: SPK zu verschiedenen Zeitpunkten

Die erste SPK-Messung erfolgte nach ca. 1 Stunde bei einem Freien Korrosionspotential von ca. -1350 mV. In der SPK ist eine anodische Hemmung zu erkennen. Nach der Messung steigt das Potential stetig bis auf Werte um -850 mV an, was auf die Inhibitionswirkung des Chromates zurückzuführen ist.

Die zweite Messung ist während der Inhibitionsphase des Chromates nach ca. 16 Stunden bei einem Freien Korrosionspotential von ca. -850 mV durchgeführt worden. Die SPK zeigt einen sehr unstetigen Verlauf, die Probe ist hier in einem instationären Zustand. Nach der Messung lag das Potential bei Werten um -1000 mV.

Nach ca. 24 Stunden war das Chromat nicht mehr wirksam und die verzinkte Probe kam wieder in einen aktiven Zustand der Zinkauflösung. Während dieser aktiven Phase wurde die dritte Messung bei 40 Stunden aufgenommen. Die SPK zeigt jetzt eine anodische Teilstromkurve ohne Hemmung.

Die Messungen 4 und 5 wurden nach dem spontanen Potentialanstieg infolge der Deckschichtbildung bei 208 bzw. 234 Stunden durchgeführt. Beide SPK zeigen eine deutliche anodische Hemmung und sind nahezu deckungsgleich. Das System befindet sich ab diesem Zeitpunkt in einem stabilen Zustand mit Deckschicht.

3.1.2 Ergebnisse in chromatreduzierten Betonen

Typische Verläufe der Freien Korrosionspotentiale von verzinkten Stählen in chromatreduzierten Betonen sind in Abb. 10 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bei allen drei Zementarten nach anfänglich starker anodischer Zinkauflösung bei Potentiallagen um ca. -1400 mV nach ca. 10-14 Stunden ein sprunghafter Potentialanstieg auf Werte zwischen -700 und -650 mV stattfindet. Dies kann wie bereits beschrieben die stattfindende Deckschichtbildung erklärt werden. Ein signifikanter Einfluss der Zementart auf den Zeitraum bis zur Deckschichtbildung des Zinks ist nicht festzustellen. Vorgelagerte Inhibitionseffekte treten nicht auf.

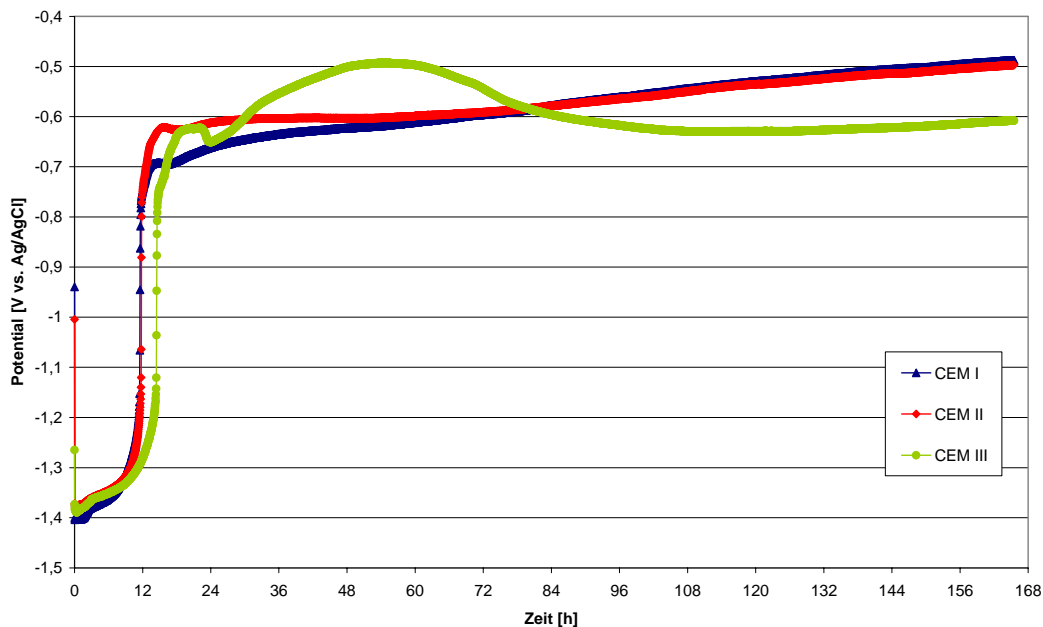


Abb. 10: Einfluss der Zementart auf den Verlauf der Freien Korrosionspotentiale von verzinkten Stählen in **chromatreduzierten** Betonen

Bei den Probekörpern mit variiertem w/b Wert verlängerte sich der Zeitraum der aktiven Zinkauflösung deutlich, dies ist in Abb. 11 dargestellt. Bei CEM I w/b Probekörpern waren mit ca. 84 Stunden die längsten Zeiträume der Zinkauflösung zu beobachten. Auch bei CEM II w/b und CEM III w/b waren die Zeiten mit ca. 60 bzw. 24 Stunden deutlich länger.

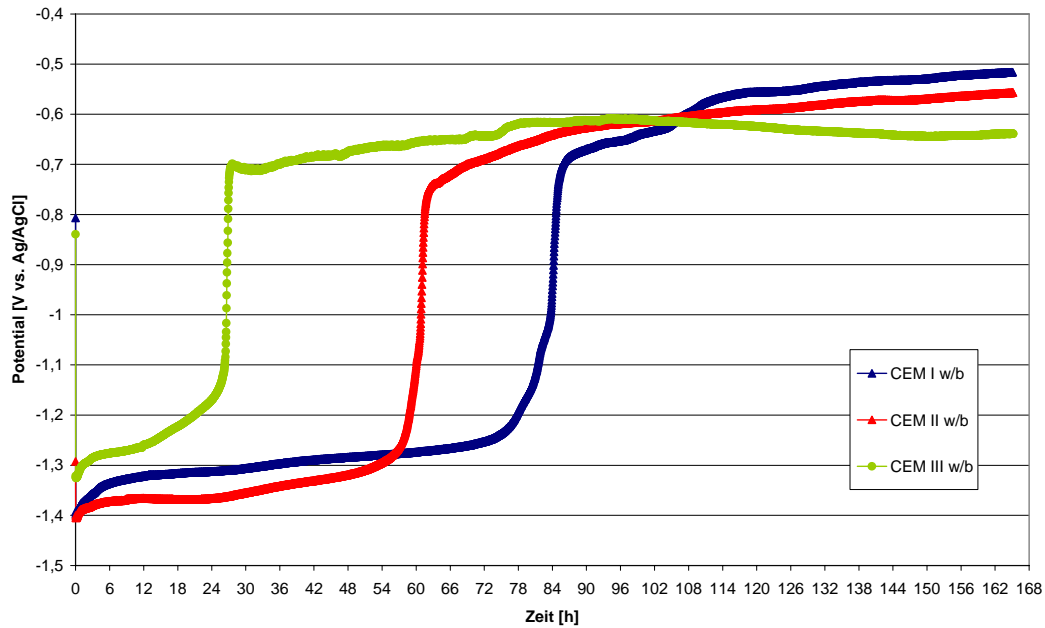


Abb. 11: Einfluss des w/b-Wertes auf den Verlauf des Freien Korrosionspotentials von verzinkten Stählen in **chromatreduzierten** Betonen

3.2 Kontaktelemente Stahl / verzinkter Stahl in verschiedenen Betonen

3.2.1 Verhalten in chromathaltigen Betonen

Typische Verläufe der Mischpotentiale von Kontaktelementen in chromathaltigen Betonen sind in Abb. 12 dargestellt, die dazugehörigen Elementströme in Abb. 13.

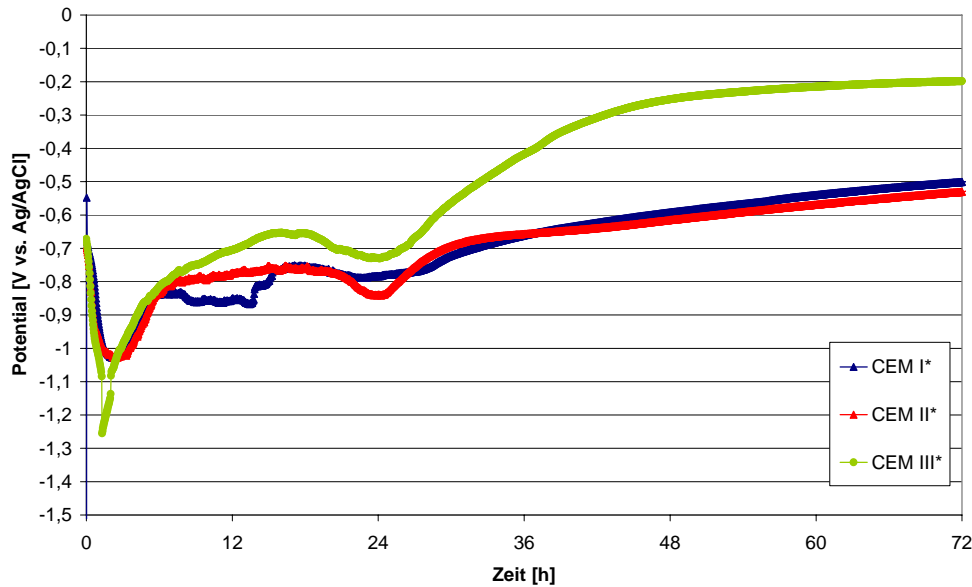


Abb. 12: Mischpotentialverläufe von Kontaktelementen Stahl / verzinkter Stahl in verschiedenen chromathaltigen Betonen

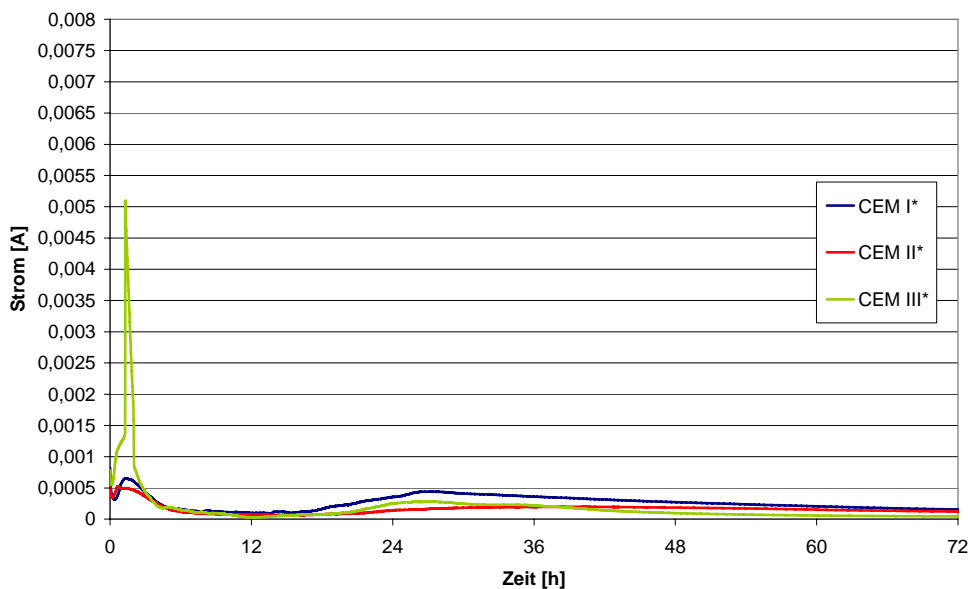


Abb. 13: Zugehörige Elementstromverläufe von Kontaktelementen Stahl / verzinkter Stahl in verschiedenen chromathaltigen Betonen

Aufgrund der Inhibitionswirkung des Chromates liegen die Potentiale sowohl beim CEM I* als auch beim CEM II* nur sehr kurz im Bereich der Wasserstoffentwicklung am Stahl und auch die maximalen Ströme sind vergleichsweise gering. Beim CEM III* ist der Einfluss des Chromates, wie bereits mehrfach gezeigt, nicht mehr erkennbar. Die Potential- und

Elementstromverläufe sind mit den chromatreduzierten CEM III Betonen vergleichbar (siehe Abb.14 und 15).

Zwischen 12 und 60 Stunden zeigen die Elementstromverläufe bei allen chromathaltigen Betonen deutlich höhere Werte als die entsprechenden chromatreduzierten Betone.

3.2.2 Ergebnisse in chromatreduzierten Betonen

Im Abb. 14 sind typische Verläufe der Mischpotentiale in verschiedenen chromatreduzierten Betonen dargestellt.

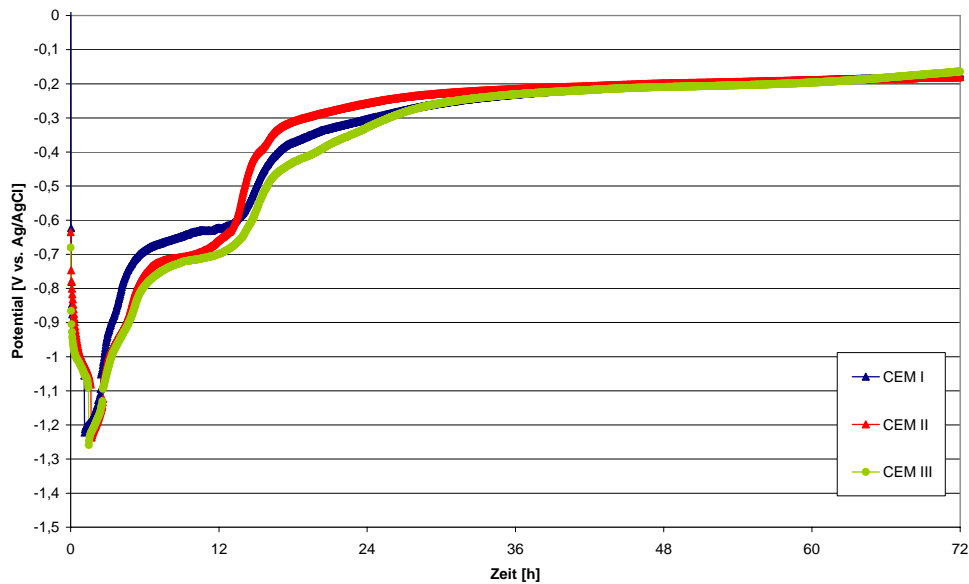


Abb. 14: Mischpotentialverläufe von Kontaktelementen Stahl / verzinkter Stahl in verschiedenen chromatreduzierten Betonen

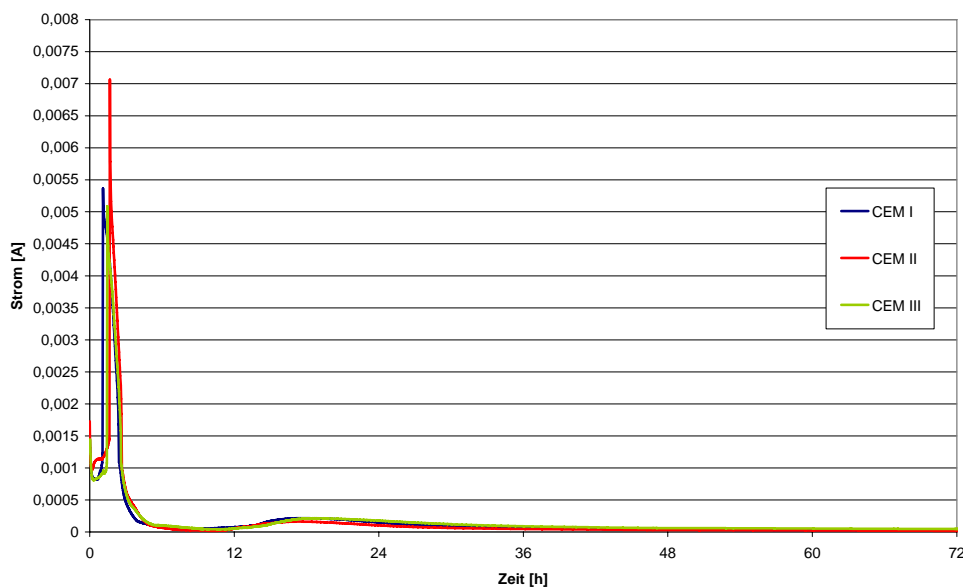


Abb. 15: Zugehörige Elementstromverläufe von Kontaktelementen Stahl / verzinkter Stahl in verschiedenen chromatreduzierten Betonen

Die Mischpotentiale fallen nach Herstellung der Probekörper zunächst auf Werte von ca. -1250 mV bei denen es zu einer Wasserstoffbildung am Stahl kommt. Nach 4-5 Stunden

steigt das Mischpotential im Zuge der Deckschichtbildung am Zink und der Bereich der Wasserstoffentwicklung am Stahl wird verlassen.

Ein signifikanter Einfluss der Zementart auf die Potentialverläufe kann nicht festgestellt werden, die Kurvenverläufe sind nahezu identisch.

Die dazugehörigen Elementstromverläufe (Abb. 15) sind in ihrem Verlauf ebenfalls sehr ähnlich, beim Spitzenstrom wurde für CEM II mit $7,2 \mu\text{A}$ der größten Spitzenstromwert festgestellt. Der Zeitpunkt des höchsten Stroms ist äquivalent zum negativsten Potential und gleichbedeutend mit der stärksten Wasserstoffentwicklung an der Stahloberfläche.

3.3 Verhalten glatter und gerippter Stäbe

In Abb. 16 sind beispielhaft Potentialverläufe gerippter und glatter verzinkter Stäbe in CEM II, sowohl chromatreduziert als auch chromathaltig mit variiertem w/b-Wert, dargestellt. Die Kurven der beiden Stabgeometrien verlaufen bis auf geringfügige zeitliche Verschiebungen (die im Bereich der Streubreiten liegen) nahezu identisch. Ein systematischer Einfluss der Stabgeometrie (gerippt, glatt) konnte bei allen im Rahmen des Vorhabens durchgeführten elektrochemischen Untersuchungen nicht festgestellt werden. Deshalb bedürfen diese für die elektrochemischen Untersuchungen keiner differenzierten Betrachtung.

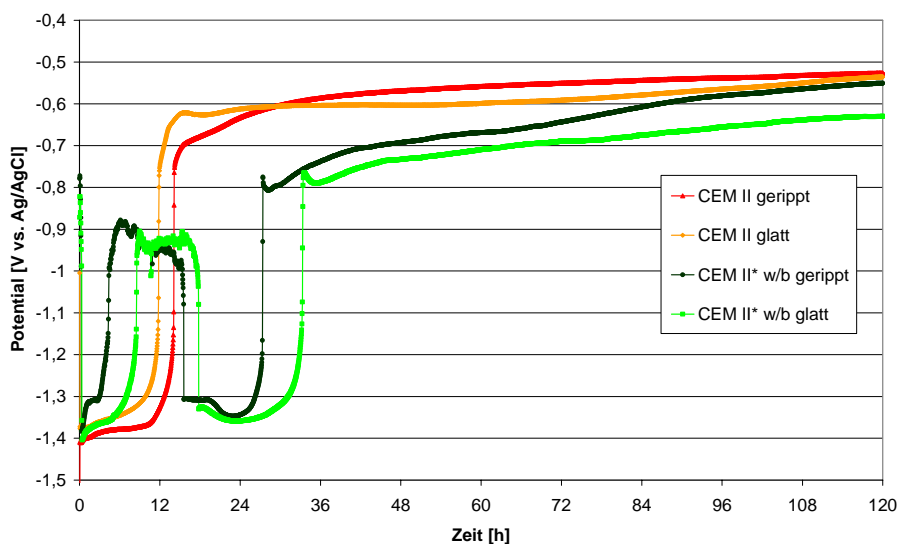


Abb. 16: Vergleich der der Stabgeometrie (glatt/gerippt) verzinkter Stäbe bzgl. der Verläufe des Freien Korrosionspotentials in 2 unterschiedlichen Untersuchungsbetonen

4 Ergebnisse der Stabauszugsversuche

Die Darstellung der Ergebnisse ist wie folgt gegliedert, grundlegend werden nur die Ergebnisse aus einem Prüfmuster verglichen. Des Weiteren die Zemente einer Charge in Hinblick auf chromathaltig und –reduziert unter Betrachtung der Betonstahlgeometrie (glatte und gerippte Betonstähle).

4.1 Ergebnisdarstellung der 7 Tage Prüfkörper

Die Ergebnisse in diesem Kapitel basieren auf einem Probenumfang von 5 Proben je Serie. In Abb. 17 sind die Verbundspannungen eines verzinkten, glatten Betonstahls bei einem Verschiebeweg von 0,01 mm dargestellt. Die Abbildung ist in drei Bereiche unterteilt mit jeweils selber Bindemittelart, mit und ohne Zugabe eines Chromatreduzierers.

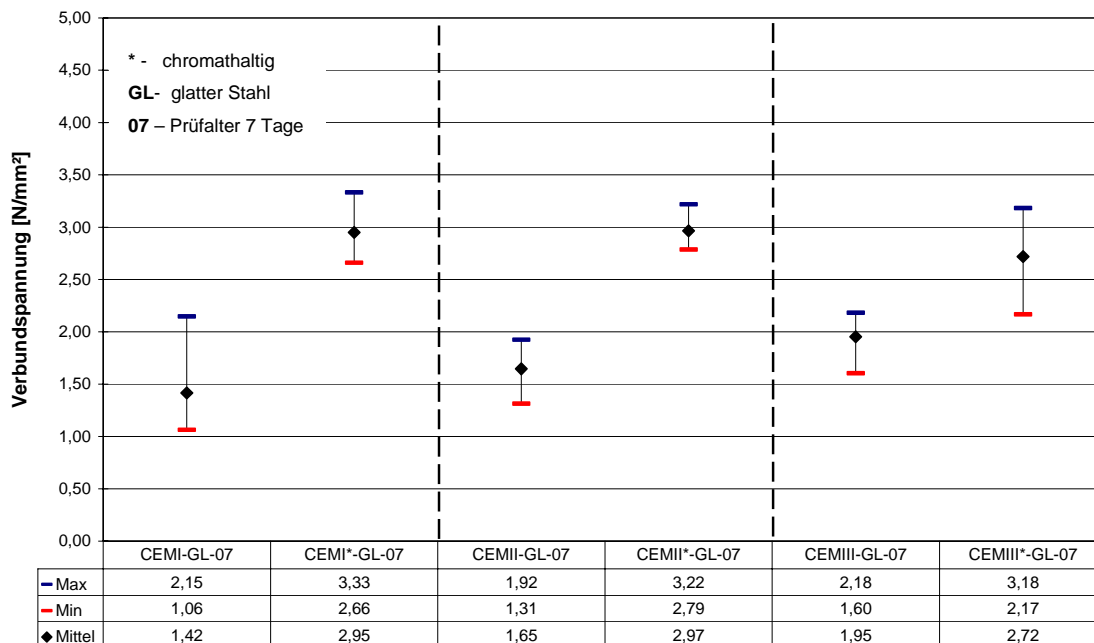


Abb. 17: Verbundspannungen glatter verzinkter Betonstähle bei einem Verschiebeweg von 0,01 mm, Prüfmuster 7 Tage, CEM I, CEM II und CEM III, jeweils chromatreduziert und chromathaltig

Deutlich ist bei allen Zementsorten eine verminderte Verbundspannung bei hinzu gegebenem Chromatreduzierer zu erkennen.

Der Bereich des CEM I in Abb. 18 beinhaltet zwei weitere Serien, eine Serie mit einem erhöhten w/b - Wert von 0,55 (W) und eine Serie bei deren Lagerung ein definiertes Klima von 30°C mit einer relativen Luftfeuchte von 80 % vorherrschte. Bei diesen Serien wurde ein gerippter und verzinkter Betonstahl verwendet.

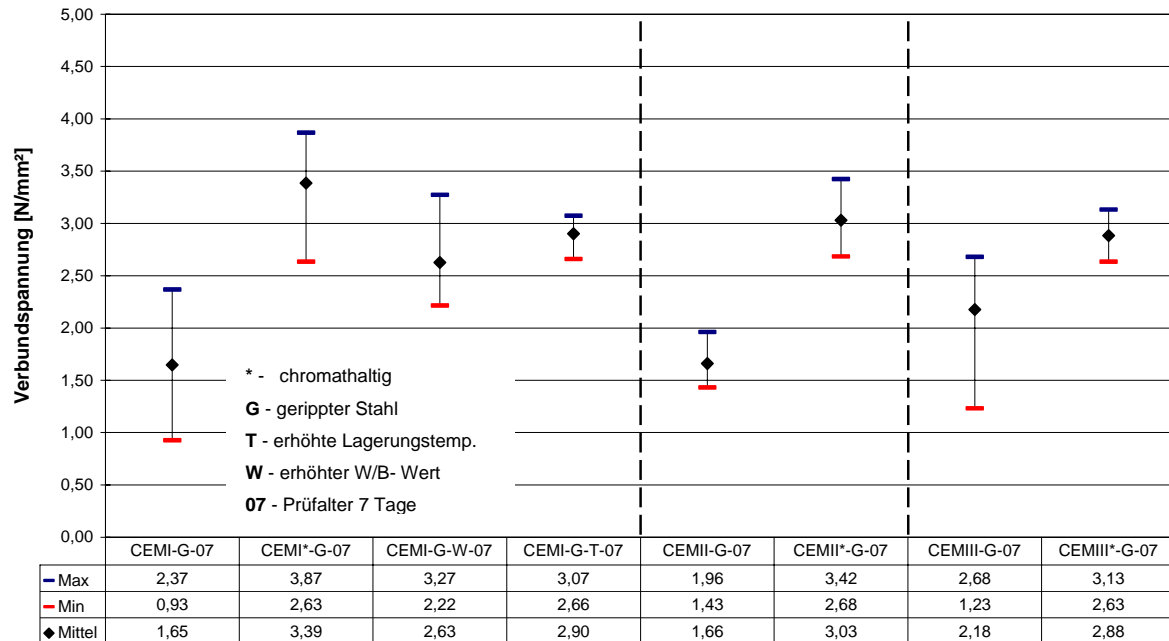


Abb. 18: Verbundspannungen gerippter verzinkter Betonstähle bei einem Verschiebeweg von 0,01 mm, Prüfalter 7 Tage, CEM I , CEM II und CEM III, jeweils chromatreduziert und chromathaltig

Wie auch bei den Ergebnissen des glatten verzinkten Betonstahls zeigt sich eine verminderte Verbundspannung bei den Proben mit Chromatreduzierer. Die Serien mit erhöhtem w/b - Wert und erhöhter Lagerungstemperatur zeigen keine signifikante Auswirkung auf die Verbundspannung.

Die Verbundspannung an Betonstahl in chromatreduziertem Beton liegt bei einem Verschiebeweg von 0,01 mm im gleichen Streuband wie an verzinkten Stählen in chromathaltigem Beton, siehe Abb. 19. Dies gilt auch für die Serie mit verzinktem Stahl und einem kurzgeschlossenen Stahlblech. Die Serie mit erhöhtem Natriumäquivalent liegt deutlich darunter und in einem ähnlichen Streuband wie die Serie CEMI-G-07 (Abb. 18).

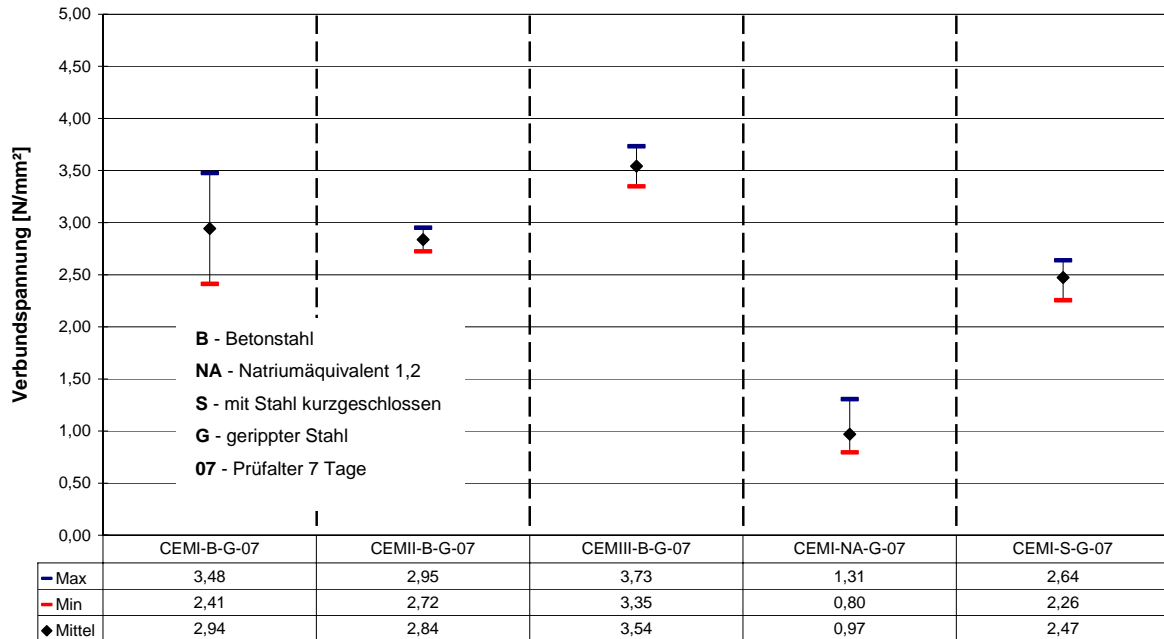


Abb. 19: Verbundspannungen gerippter Betonstähle bei einem Verschiebeweg von 0,01 mm, sowie verzinkter gerippter Betonstähle mit erhöhtem Natriumäquivalent und im kurzgeschlossenen Zustand, Prüfalter 7 Tage, CEM I , CEM II und CEM III

Die in Abb. 19 dargestellten Ergebnisse der Serien mit dem Zusatz „B“ basieren auf einem Probenumfang von drei je Proben, die restlichen auf einem Umfang von 5 Proben.

Die Verbundspannung bei einem Verschiebeweg von 0,50 mm zeigt deutlich, dass bis auf die Serie W, alle anderen Serien in einem Streubereich zwischen etwa 12 und 14 N/mm² liegen (Abb. 20). Anhand der Ergebnisse kann der Einfluss des Chromatgehalts nicht mehr differenziert werden. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Betonsteinmatrix im Bereich des Zugkräfteintrages durch die Rippung eine bei allen Serien vergleichbare Gefügestruktur aufweist.

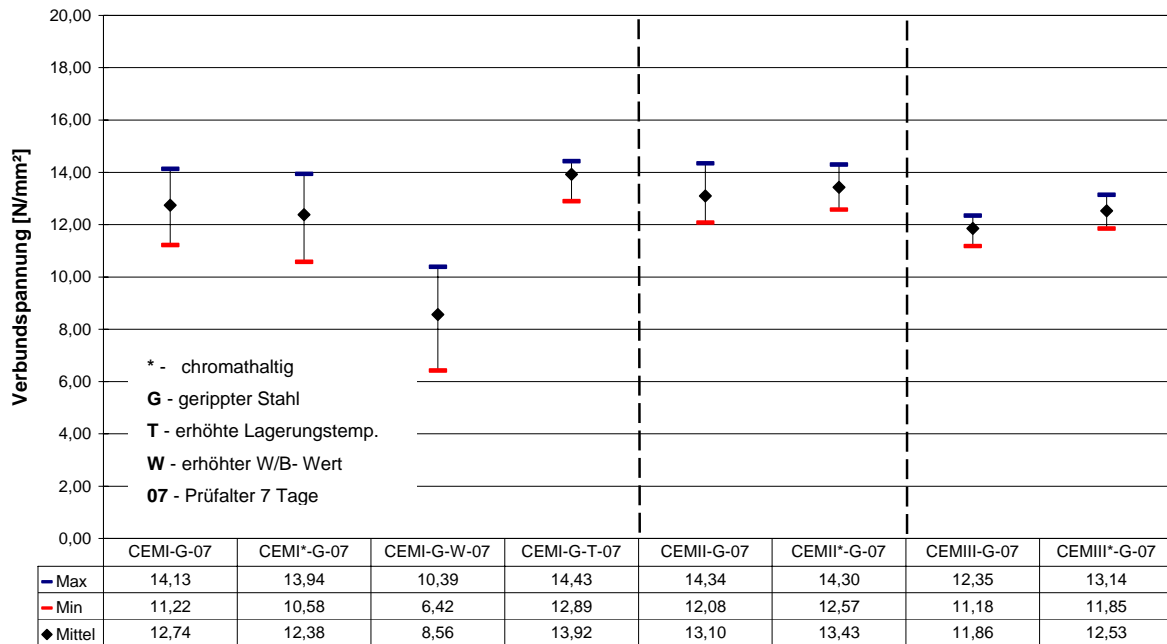


Abb. 20: Verbundspannungen gerippter verzinkter Betonstähle bei einem Verschiebeweg von 0,5 mm, Prüfalter 7 Tage, CEM I , CEM II und CEM III, jeweils chromatreduziert und chromathaltig

Eine Ausnahme bildet die Serie mit erhöhtem w/b - Wert. Die ermittelten Werte liegen hier unterhalb der anderen Serien, da diese Serie aufgrund des erhöhten Wasserbindemittelwertes eine andere Porenstruktur ausbildet.

Die Serien mit Betonstahl zeigen, bei einem Verschiebeweg von 0,5 mm, die größten Verbundspannungen. Geringere Verbundspannungen zeigen die Serien mit erhöhtem Natriumäquivalent und mit kurzgeschlossenem Stahlblech (siehe Abb. 21). Diese liegen in vergleichbaren Bereichen zwischen 10 und 15 N/mm².

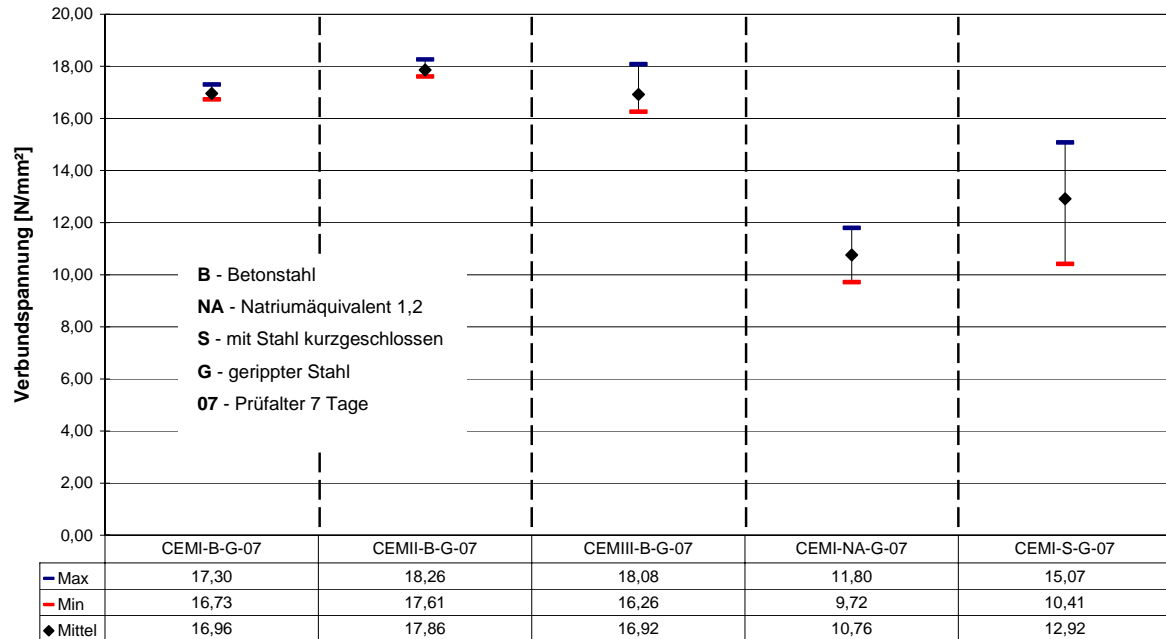


Abb. 21: Verbundspannungen gerippter Betonstähle bei einem Verschiebeweg von 0,5 mm, sowie verzinkter gerippter Betonstähle mit erhöhtem Natriumäquivalent und im kurzgeschlossenen Zustand, Prüfalter 7 Tage, CEM I , CEM II und CEM III

4.2 Ergebnisdarstellung der 28 Tage Prüfkörper

Wie auch bei den 7 Tage alten Prüfkörpern zeichnet sich die Chromatreduktion, bei einem Verschiebeweg von 0,01 mm, in Form einer Verbundstörung ab. Die relativ großen Unterschiede bei den 7 Tage alten Proben, zwischen chromathaltigen und chromatreduzierten Zementen einer Charge, sind nach 28 Tagen jedoch nicht mehr zu verzeichnen, siehe Abb. 22.

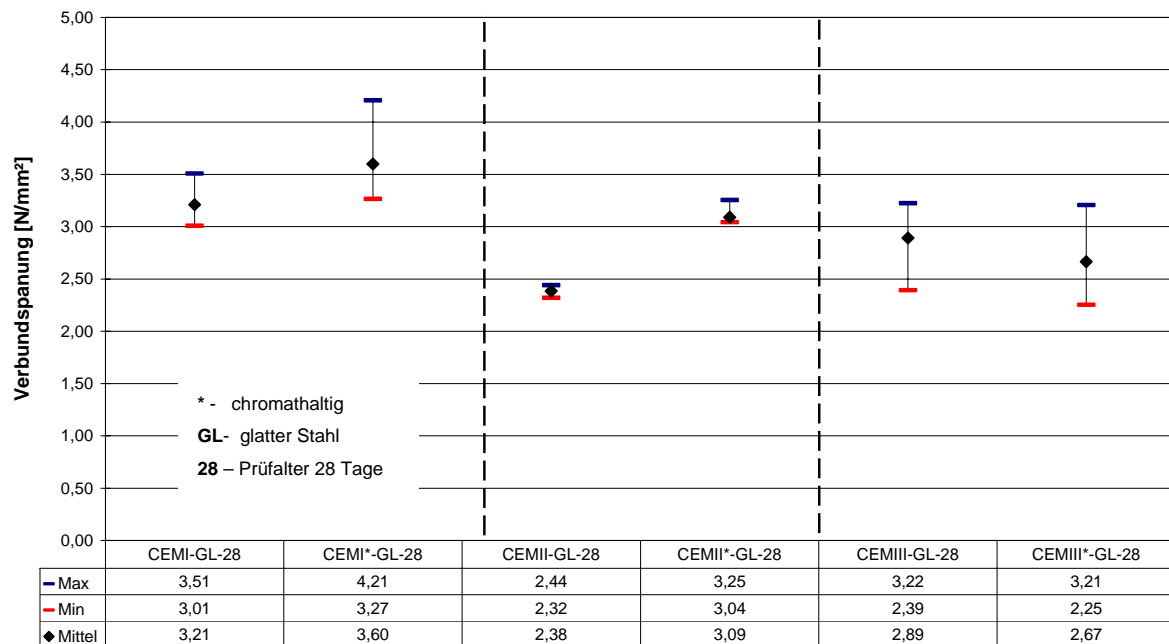


Abb. 22: Verbundspannungen glatter verzinkter Betonstähle bei einem Verschiebeweg von 0,01 mm, Prüfalter 28 Tage, CEM I , CEM II und CEM III, jeweils chromatreduziert und chromathaltig

Bei Verwendung eines Hochofenzementes (CEM III) ist ein Unterschied in Bezug auf den Chromatgehalt nicht mehr erkennbar.

Im Vergleich mit den glatten verzinkten Stählen zeichnen sich bei den gerippten verzinkten Stählen ähnliche Tendenzen ab. Bei Betrachtung der 7-Tage-Serien CEMI-G-W und CEMI-G-T ist ebenfalls ein tendenziell gleiches Verbundverhalten zu erkennen, siehe Abb. 23.

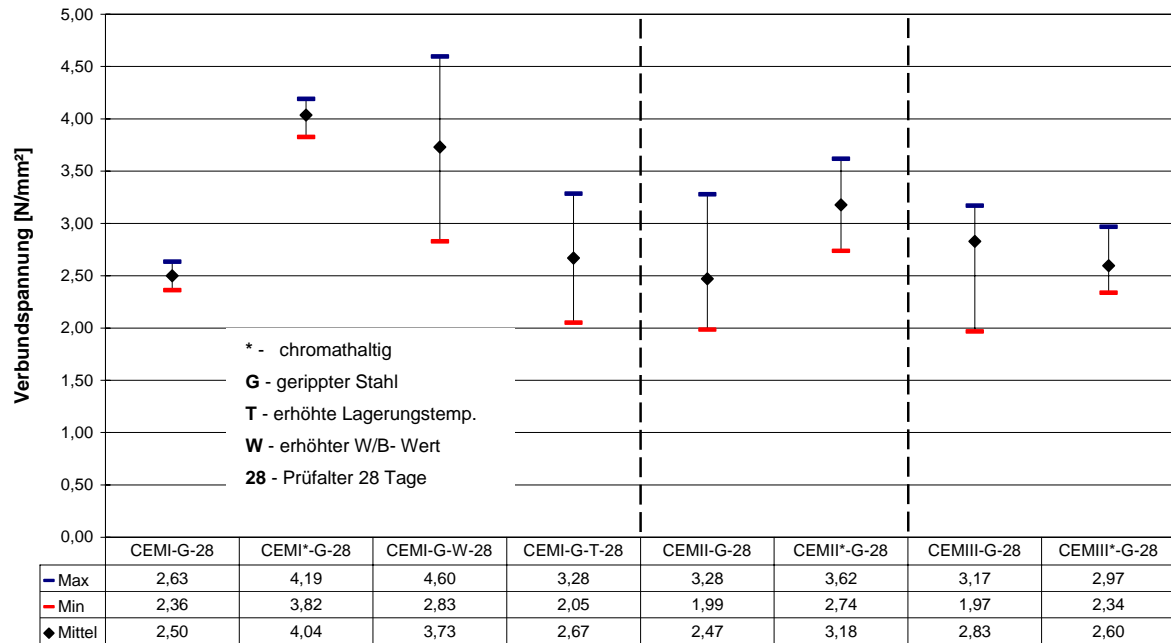


Abb. 23: Verbundspannungen gerippter verzinkter Betonstähle bei einem Verschiebeweg von 0,01 mm, Prüfalalter 28 Tage, CEM I , CEM II und CEM III, jeweils chromatreduziert und chromathaltig

Die Proben mit einem CEM III als Bindemittel lassen, aufgrund der Ergebnisse, keine Rückschlüsse auf den Chromatgehalt zu.

Die Mittelwerte bei den nicht verzinkten Stählen zeigen erwartungsgemäß Verbundspannungen in einem Wertebereich. Eine Auswertung der Serie mit erhöhtem Natriumäquivalent war nicht möglich. Hier lag eine Verbundstörung aufgrund eines mechanischen Einflusses bei der Probenherstellung vor. Die Verbundspannung der gleichartigen 7-Tage-Serie ist wesentlich größer als die in Abb.24 dargestellte Verbundspannung der 28-Tage-Serie.

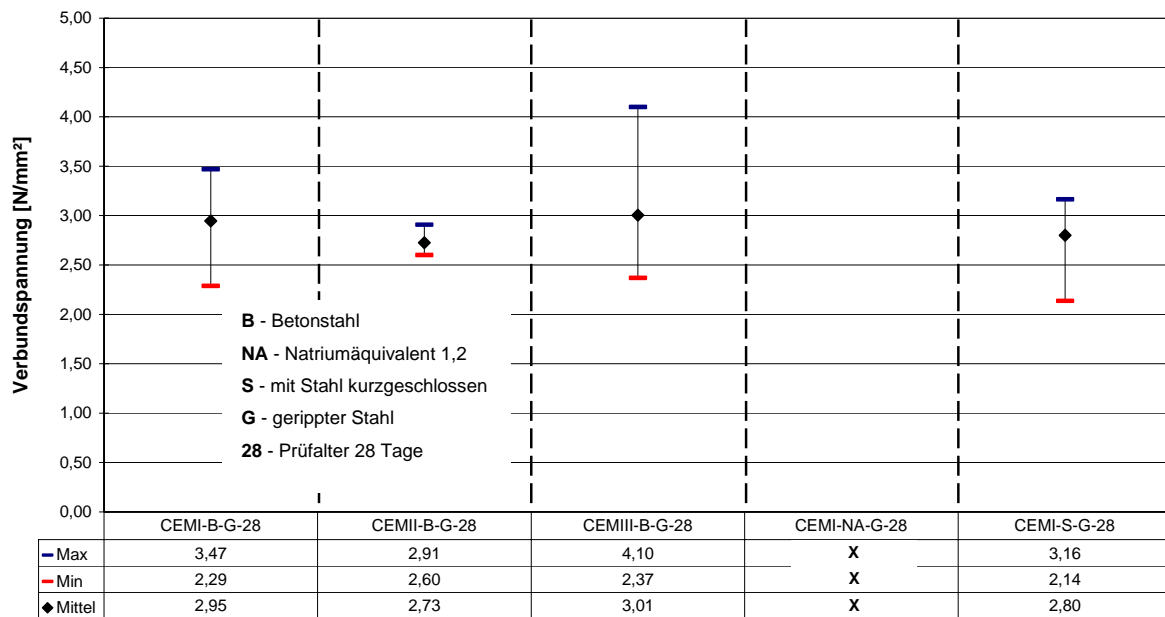


Abb. 24: Verbundspannungen gerippter Betonstähle bei einem Verschiebeweg von 0,01 mm, sowie verzinkter gerippter Betonstähle mit erhöhtem Natriumäquivalent und im kurzgeschlossenen Zustand, Prüfalter 28 Tage, CEM I , CEM II und CEM III

Wie bereits bei den 7 Tage Serien zu erkennen war, wird die aufnehmbare Kraft, resultierend aus der Betonporenstruktur, hier nicht signifikant durch den Chromatreduzierer beeinflusst. Die Verbundspannungen liegen, bis auf die Serie CEMI-G-W, in einem Streuband, siehe Abb. 25.

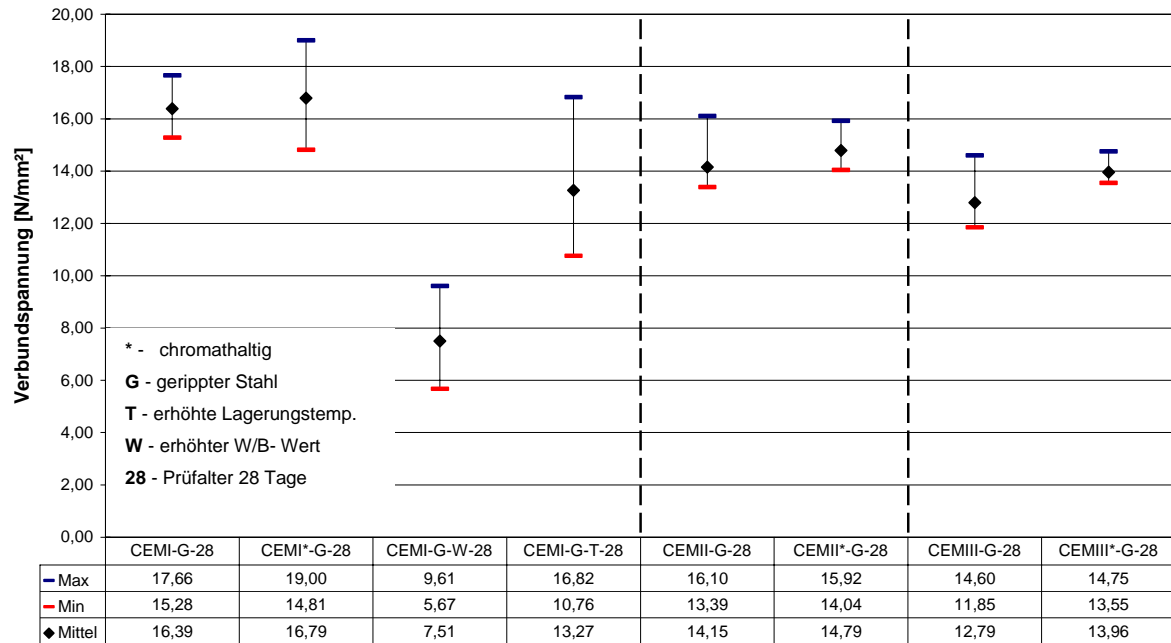


Abb. 25: Verbundspannungen gerippter verzinkter Betonstähle bei einem Verschiebeweg von 0,5 mm, Prüfalter 28 Tage, CEM I , CEM II und CEM III, jeweils chromatreduziert und chromathaltig

Deutlich ist auch nach 28 Tagen zu erkennen, dass der erhöhte W/B-Wert zu einer geringeren aufnehmbaren Kraft bei einem Verschiebeweg von 0,5 mm führt.

Die ermittelten Kräfte nach 28 Tagen, bei einem Verschiebeweg von 0,5 mm, unterscheiden sich nur geringfügig von denen der 7 Tage Serien, siehe Abb. 26. Die Verbundspannung der Serie mit erhöhtem Natriumäquivalent und eingebettetem verzinktem Stab liegt unterhalb des Streubandes der nicht verzinkten Stähle.

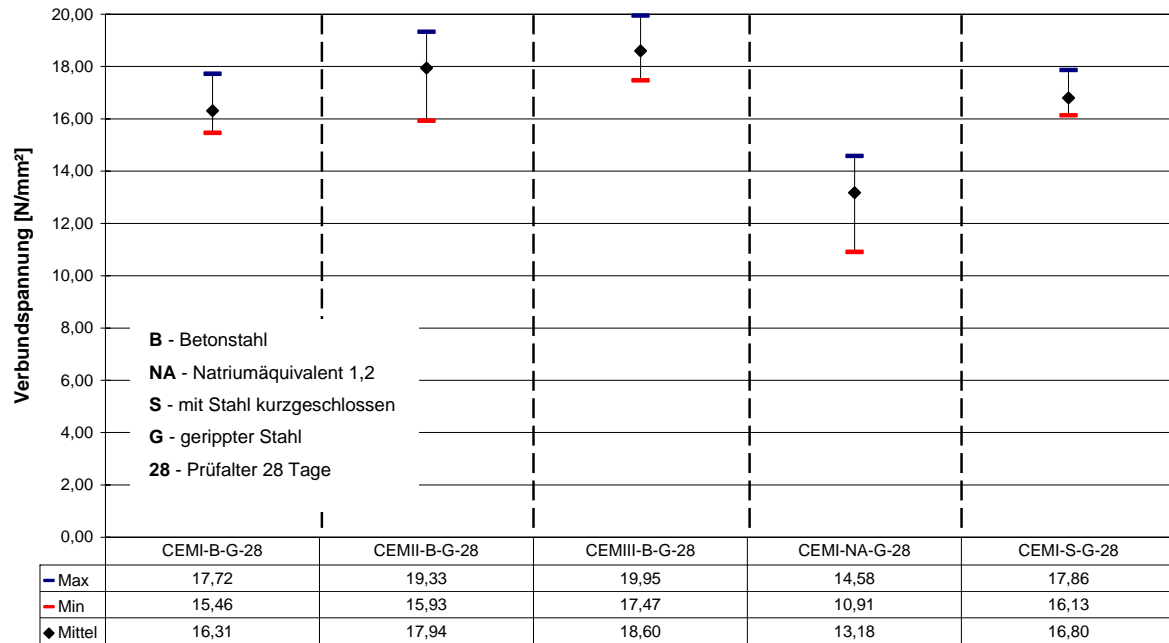


Abb. 26: Verbundspannungen gerippter Betonstähle bei einem Verschiebeweg von 0,5 mm, sowie verzinkter gerippter Betonstähle mit erhöhtem Natriumäquivalent und im kurzgeschlossenen Zustand, Prüfaller 28 Tage, CEM I , CEM II und CEM III

4.3 Betondruckfestigkeiten

In diesem Kapitel werden die 7 und 28 Tage Betondruckfestigkeiten dargestellt. Die einzelnen Betonagen wurden zu einem Mittelwert zusammengefügt da die Streuungen vernachlässigbar sind.

In Abb. 27 sind die 7 Tage Betondruckfestigkeiten dargestellt, deutlich ist ein Abfall der Druckfestigkeit in der Serie CEM I bei erhöhtem W/B-Wert und bei erhöhtem Natriumäquivalent zu sehen. Die Abstufung der Druckfestigkeit bei Betrachtung von CEM I, CEM II und CEM III verhält sich erwartungsgemäß. Der Hochofenzement CEM III zeigt hier deutlich die geringeren Druckkräfte unter Betrachtung der Serien CEM I und CEM II.

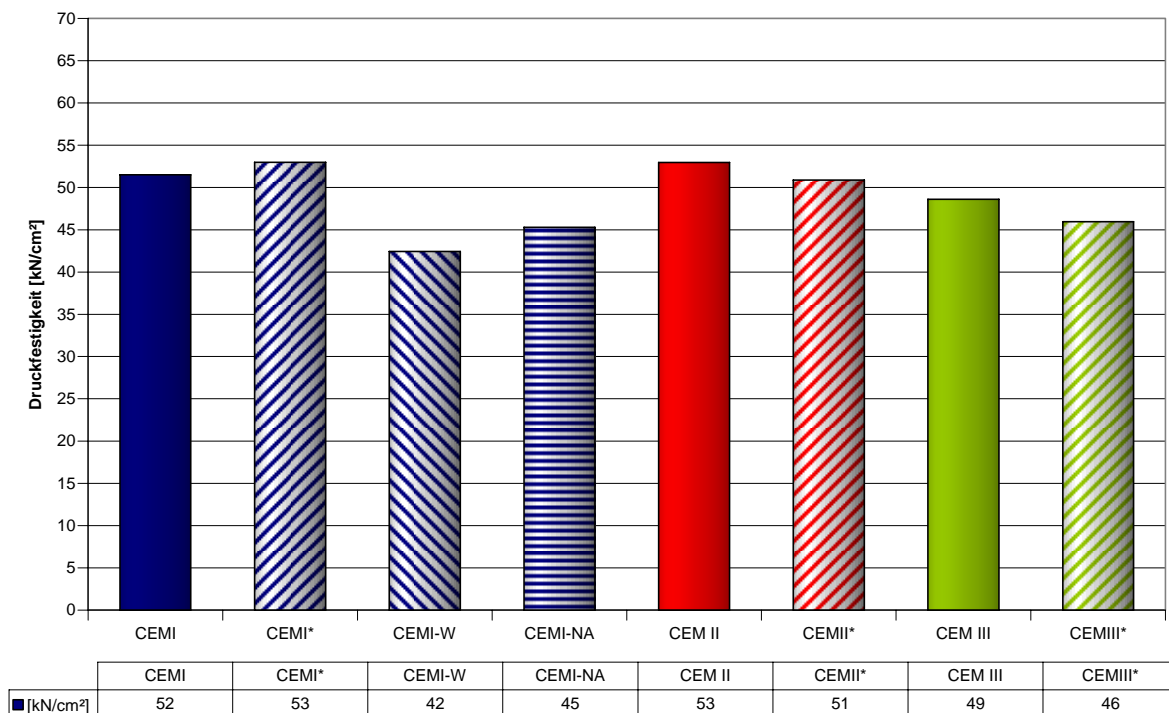


Abb. 27: Druckfestigkeiten nach 7 Tagen, CEM I, II und III mit und ohne Chromatreduzierer, CEM I mit erhöhtem W/B-Wert und erhöhtem Natriumäquivalent

Die in Abb. 28 dargestellten 28 Tage- Druckfestigkeiten zeigen wie bereits nach 7 Tagen eine verminderte Druckfestigkeit bei erhöhtem w/b-Wert und bei erhöhtem Natriumäquivalent. Die Druckfestigkeiten der Serien CEM I, II und III liegen bei Werten zwischen 65 und 70 N/mm².

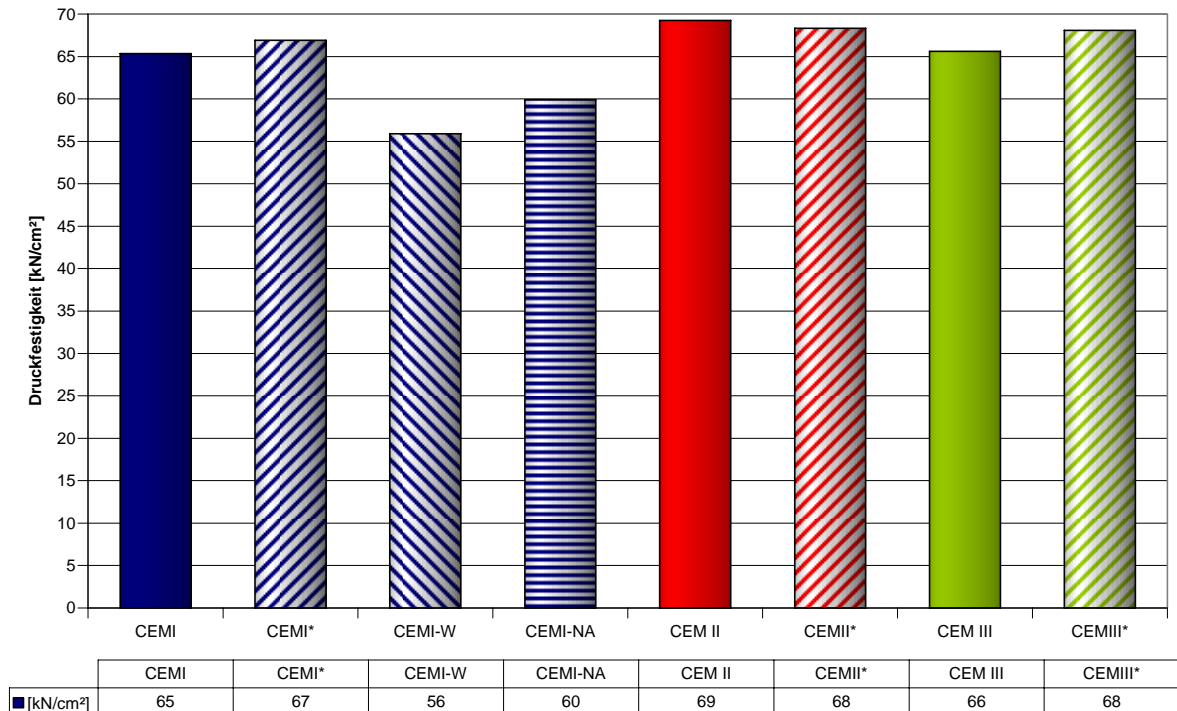


Abb. 28: Druckfestigkeiten nach 28 Tagen, CEM I, II und III mit und ohne Chromatreduzierer, CEM I mit erhöhtem W/B-Wert und erhöhtem Natriumäquivalent

5 Visuellen Auswertung der Grenzflächen

5.1 Ergebnisse verzinkter Stahl in Betonen

In Abb. 29 sind Schnitte durch Probekörper der verschiedenen chromatreduzierten Betone dargestellt. Zur Dokumentation der Verbundfläche ist der verzinkte Stahl entfernt worden. Bei allen drei Betonen ist eine starke Porenentwicklung im Grenzflächenbereich verzinkter Stahl / Betonsteinmatrix zu erkennen, die auf die Wasserstoffentwicklung in der Frischbetonphase zurückzuführen ist und mit einer Verbundstörung des eingebetteten verzinkten Stahles einhergeht.



Abb. 29: Schnitt durch zerteilte Probekörper aus chromatreduzierten Betonen nach Entfernung der verzinkten Stähle; v.l.n.r.: CEM I, CEM II, CEM III

In Abb. 30 sind Schnitte durch Probekörper der verschiedenen chromathaltigen Betone dargestellt. Der verzinkte Betonstahl wurde zu diesem Zweck ebenfalls entfernt.



Abb. 30: Schnitt durch zerteilte Probekörper der verschiedenen chromathaltigen Betone nach Entfernung der verzinkten Stähle; v.l.n.r.: CEM I*, CEM II*, CEM III*

Es ist sehr deutlich, dass beim CEM I* infolge der inhibierenden Wirkung des Chromates und der ausbleibenden Wasserstoffentwicklung in der Frischbetonphase eine ungestörte Verbundzone vorhanden ist. Beim CEM II* ist die Inhibitionsphase verzögert und es kann in den ersten Stunden zu einer Wasserstoffbildung an der verzinkten Stahlprobe kommen, die eine Verbundstörung bewirkt. Im Vergleich zum chromatreduzierten CEM II ist die Porenanzahl jedoch geringer. Die größte Verbundstörung konnte beim CEM III* festgestellt werden. Hier war die Wirkung des Chromats, aufgrund des geringeren Chromatanteils, praktisch nicht vorhanden und es konnte eine große Menge an Wasserstoff in der Verbundzone entstehen.

5.2 Kontaktelemente Stahl / verzinkter Stahl in verschiedenen Betonen

In Abb. 31 ist der Schnitt durch einen Probekörper aus chromathaltigem CEM I dargestellt. Zur Beurteilung der Verbundflächen sind die eingebetteten Stäbe entfernt worden. Es ist deutlich erkennbar, dass die sehr kurze Verweildauer im Bereich der Wasserstoffentwicklung keine Beeinträchtigung der Verbundzone des Stahls zur Folge hatte.



Abb. 31: Schnitt durch einen Probekörper mit chromathaltigem Beton CEM I*; links: nach Entfernung des verzinkten Stahls; rechts: nach Entfernung des Stahls

Bei dem in Abb. 32 dargestellten, zerteilten Probekörper aus chromatreduziertem CEM I ist die Auswirkung der Wasserstoffentwicklung in der Frischbetonphase signifikant. Es ist zu erkennen, dass der Wasserstoff ausschließlich an der Oberfläche des eingebetteten Stahls entstanden ist und hier zu einer deutlichen Verbundstörung geführt hat. Am verzinkten Stahl hingegen ist keine Porenbildung festzustellen, die Oberfläche ist hier z.T. mit Zinkkorrosionsprodukten behaftet.



Abb. 32: Schnitt durch einen Probekörper mit chromatreduziertem Beton CEM I; links: nach Entfernung des verzinkten Stahls; rechts: nach Entfernung des Stahls

Bei weiterführenden computertomographischen Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass die wasserstoffbedingten Poren im oberflächennahen Bereich des Bewehrungsstahls verbleiben und nicht sehr weit in die Betonsteinmatrix abwandern bzw. aufsteigen (Abb. 33). Die zu erkennenden großvolumigen Verdichtungsporen im größeren Abstand zur Grenzfläche sind und nicht aufgrund der Wasserstoffentwicklung entstanden. Die Störung der Verbundzone aufgrund wasserstoffbedingter Porenbildung liegt nach Einzeluntersuchungen zwischen 200 und 300 μm

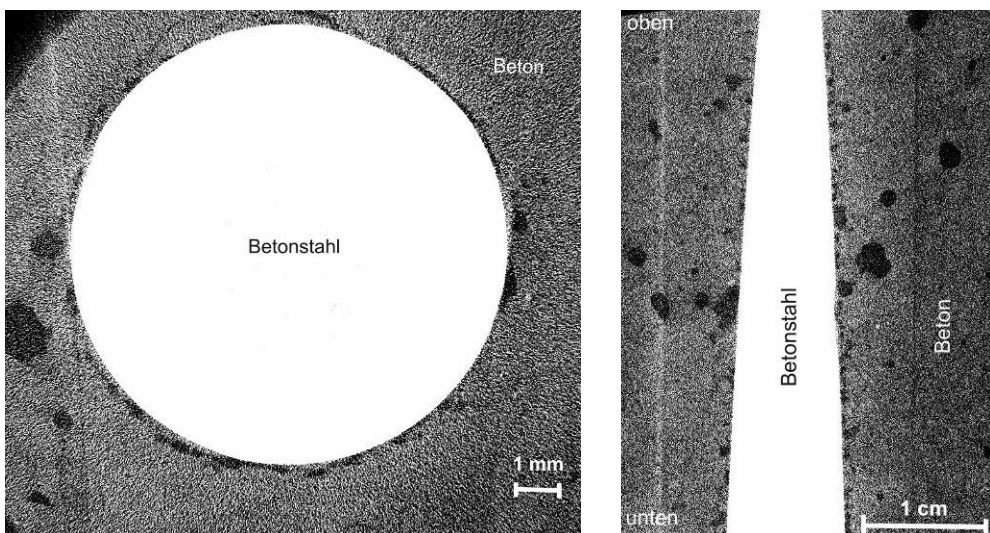


Abb. 33: CT Aufnahme eines in chromatreduziertem CEM I eingebetteten Betonstahls aus einem Kontaktelementprobekörper; links: Querschnitt; rechts: Längsschnitt

5.3 Metallographische Untersuchungen

Zur Bestimmung der Abzehrung der Zinkschicht innerhalb des Untersuchungszeitraumes wurden metallographische Querschliffe an ausgewählten Proben aus chromathaltigen und chromatreduzierten Betonen angefertigt. Als Referenz wurden ebenfalls Querschliffe von Proben im Ausgangszustand nach dem Verzinken untersucht (siehe Abb. 34).

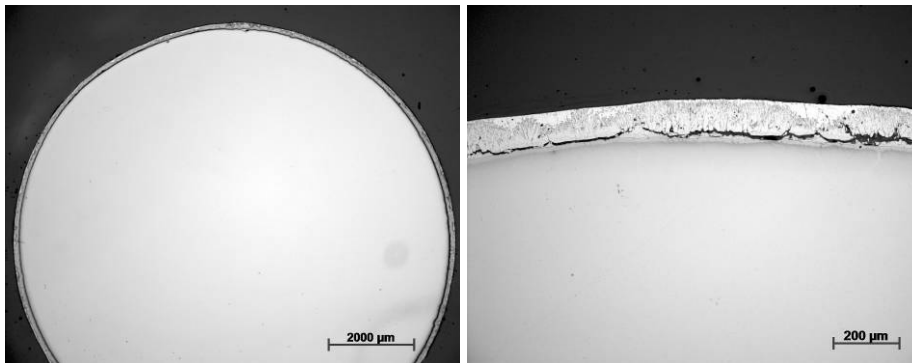


Abb. 34: Metallographischer Querschliff durch eine Probe aus verzinktem Stahl, Ausgangszustand nach dem Verzinken

Der in Abb. 34 dargestellte Querschliff durch eine Neuprobe zeigt hier eine Rissbildung innerhalb der Eisen-Zink-Legierungsphase. Aufgrund dieser Risse und durch die beim Ausbetten der verzinkten Proben einwirkenden Kräfte sowie der teils sehr festen Verbindung der Reinzinkschicht mit der Betonsteinmatrix, wurden unregelmäßige Schichtausbrüche festgestellt. Überwiegend erfolgten diese oberhalb der Eisen-Zink-Legierungsschicht, z.T. aber auch bis in den Bereich des Grundmaterials (Abb. 35 bis 37).

Eine Auswertung der Schichtdickenmessung hinsichtlich einer gesicherten Aussage zum korrosionsbedingten Zinkabtrag war somit nicht möglich.

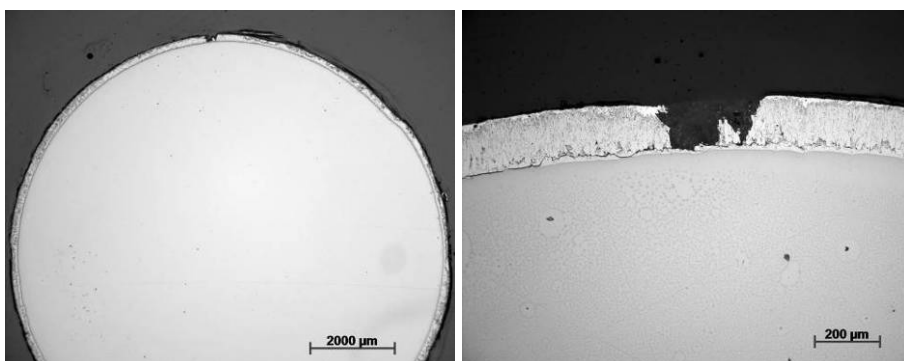


Abb. 35: Metallographischer Querschliff durch eine ausgebettete verzinkte Stahlprobe eines Kontaktelements in **chromatreduziertem** Beton; unregelmäßige Schichtausbrüche durch Krafteinwirkung beim Ausbetten

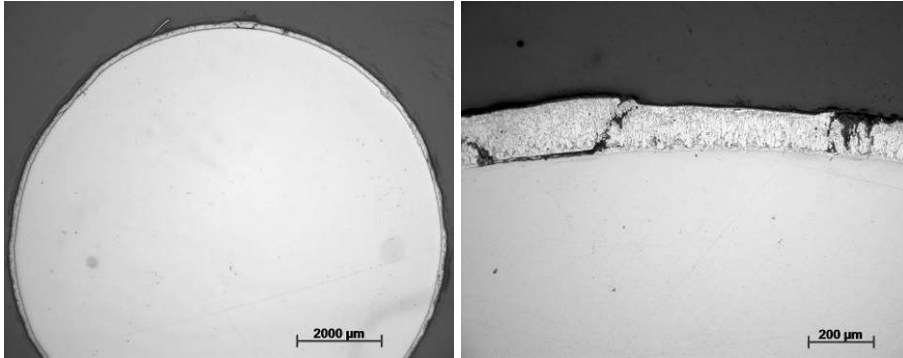


Abb. 36: Metallographischer Querschliff durch eine ausgebettete verzinkte Stahlprobe eines Kontaktelements in **chromathaltigem** Beton; unregelmäßige Schichtausbrüche durch Krafteinwirkung beim Ausbetten

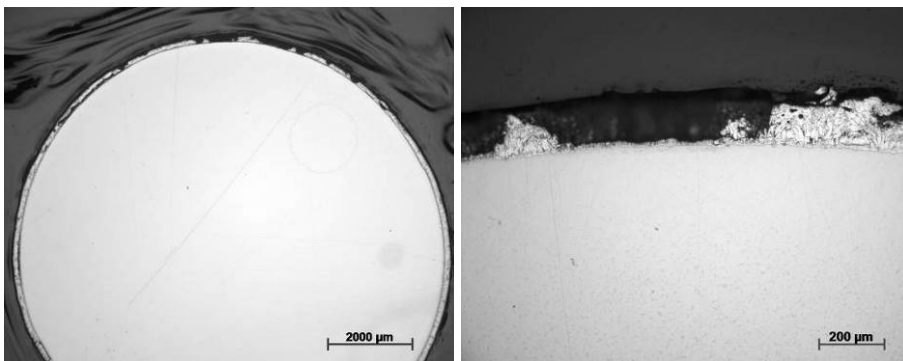


Abb. 37: Metallographischer Querschliff durch eine ausgebettete verzinkte Stahlprobe eines Kontaktelements in **chromathaltigem** Beton; zahlreiche unregelmäßige Schichtausbrüche durch Krafteinwirkung beim Ausbetten

6 Auswertung der Messergebnisse und Diskussion

Mit den Ergebnissen der elektrochemischen Untersuchungen und den Stabauszugversuchen lässt sich das Verhalten von verzinkten Betonstählen in chromathaltigen- und chromatreduzierten Betonen umfassend beschreiben. Aufgrund der umfangreichen Auswertungen ist die Diskussion zunächst in *elektrochemische Untersuchungen* und *Stabauszugversuche* unterteilt. Im Anschluss daran werden durch eine versuchsübergreifende Zusammenfassung die Zusammenhänge diskutiert und eine Wertung für praktische Anwendungen herausgearbeitet.

6.1 Elektrochemische Untersuchungen

Da mit der Deckschichtbildung des Zinks ein deutlicher und spontaner Potentialsprung einhergeht, ist dies mittels der Änderungsgeschwindigkeit des Potentials sehr gut zu beschreiben. Hierzu wird die 1. Ableitung dE/dt gebildet. In Abb. 38 ist dies am Beispiel eines chromatreduzierten CEM I w/b dargestellt. Hier setzt im Zuge der Deckschichtbildung zwischen 42 und 44 Stunden ein Potentialsprung von -1200 auf -750 mV ein. Im Verlauf der Potentialänderungsgeschwindigkeit ist die Dynamik dieses Prozesses mit einem deutlichen Peak erkennbar.

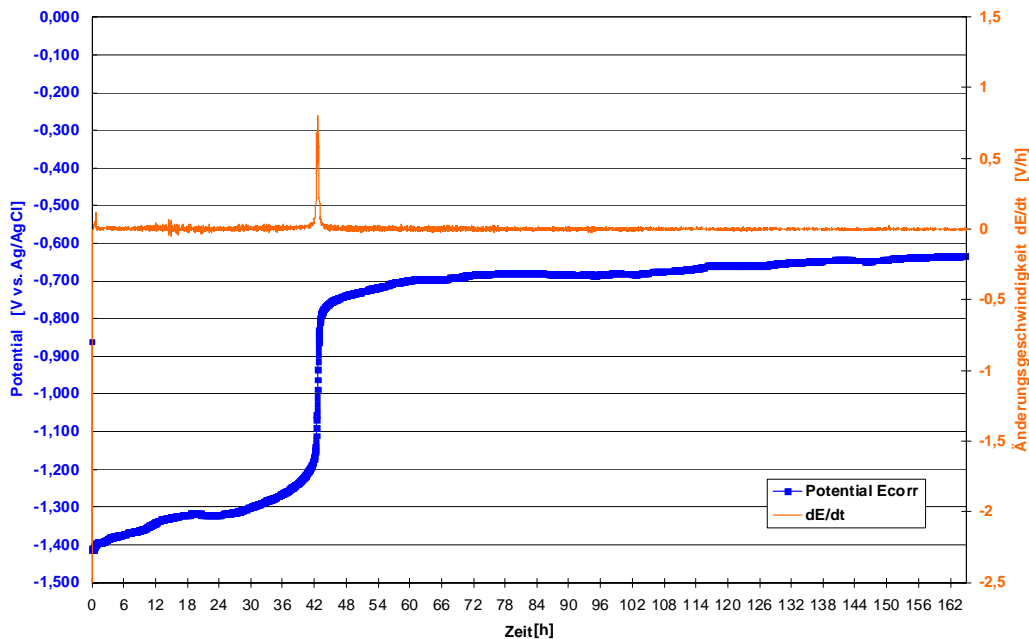


Abb. 38: Potentialverlauf und Potentialänderungsgeschwindigkeit von verzinktem Stahl in CEM I w/b

In Abb. 39 ist ein typischer Potentialverlauf mit der dazugehörigen Potentialänderungsgeschwindigkeit einer Probe in chromathaltigem Beton CEM I* w/b dargestellt. Nach anfänglicher kurzer Zinkauflösung kommt es nach ca. 8 Stunden zu einem Potentialanstieg auf -900 mV. Es wird deutlich, dass während dieser durch das Chromat bedingten Inhibitionsphase zwischen ca. 10 und 20 Stunden, eine sehr große Dynamik im Potentialverlauf vorhanden ist. Die Inhibitionsphase grenzt sich damit klar vom späteren Deckschichtbildungsprozess ab. Dieser beginnt nach einer langen aktiven Phase ab ca. 90 Stunden, hat zunächst einen unstetigen Potentialverlauf. Eine weitgehend stabile Deckschicht ist erst nach 120 Stunden erreicht.

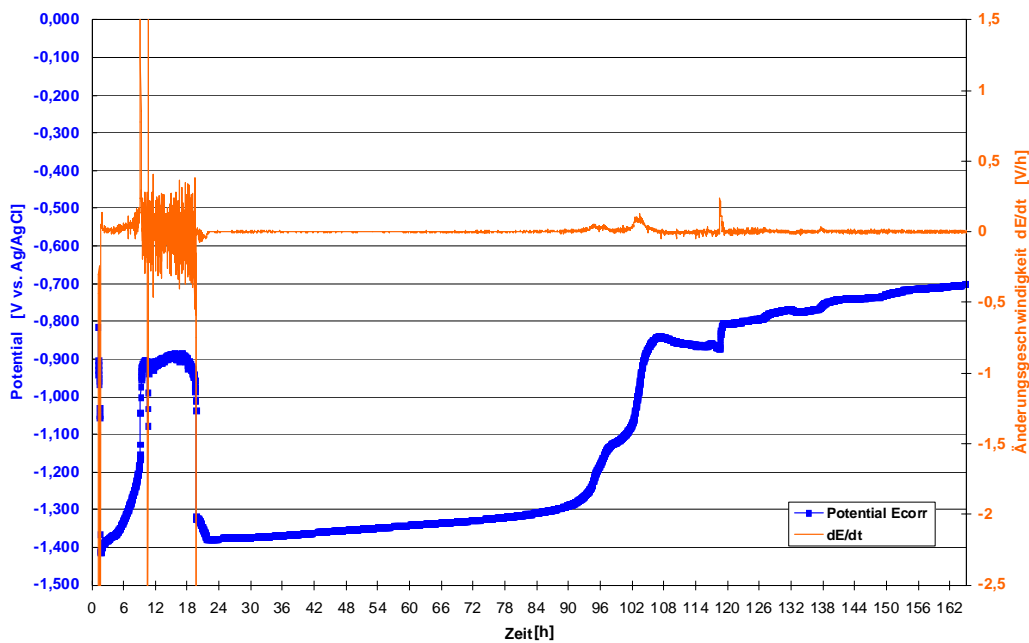


Abb. 39: Potentialverlauf und Potentialänderungsgeschwindigkeit von verzinktem Stahl in CEM I* w/b; stabile Deckschicht am Zink nach 120 Stunden

Die Potentialgrenze, bei dem aufgrund der Korrosionsreaktion des Zinkes an der Oberfläche der verzinkten Stähle Wasserstoff gebildet werden kann, liegt im hier relevanten pH-Wert Bereich bei ca. -1200 mV (vs. Ag/AgCl). Mit dem Erreichen von Potentialwerten, die dauerhaft positiver als -1200 mV sind, kann an der Oberfläche des verzinkten Stahles somit kein Wasserstoff mehr entstehen. Dieser Zeitraum ist für die unterschiedlichen Untersuchungsbetone in Abb. 40 dargestellt. Die Streubänder beziehen sich dabei auf jeweils 6 Proben (je 3 glatte und 3 gerippte Stäbe).

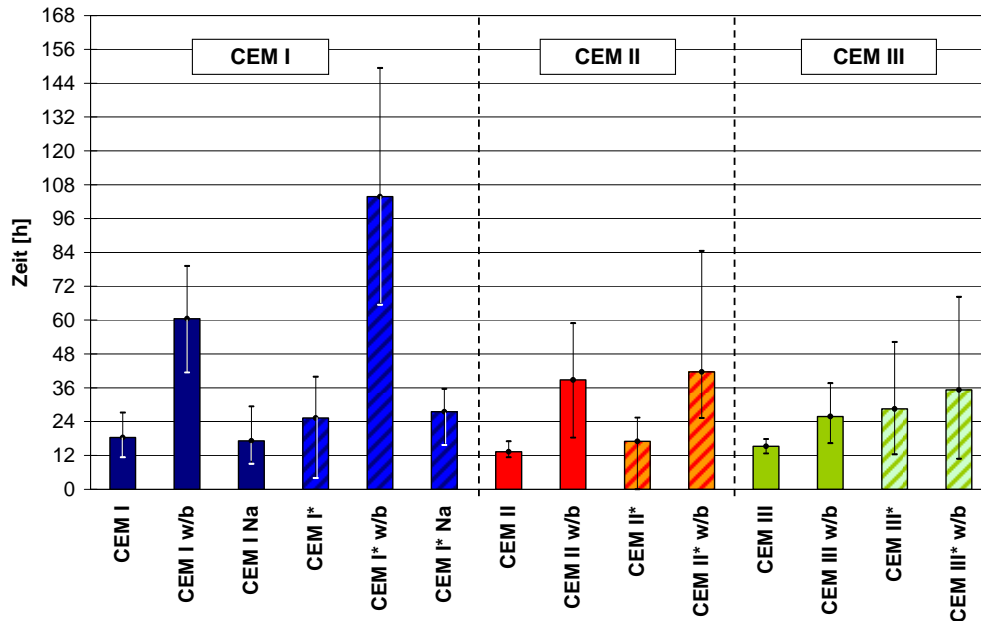


Abb. 40: Zeitraum bis zum dauerhaften Erreichen von Potentialwerten positiver -1200 mV von verzinktem Stahl in unterschiedlichen Betonen; Streubänder aus jeweils 6 Proben (3 gerippt, 3 glatt)

Die Standardrezepturen der 3 chromatreduzierten Betone (CEM I, -II, -III) zeigen nur geringfügige Unterschiede in den Zeiträumen bis zum Beginn der Deckschichtbildung am Zink. Die Mittelwerte bewegen sich hierbei zwischen 13 und 18 Stunden. Bei den chromathaltigen Betonen ist eine tendenzielle Verlängerung dieses Zeitraumes im Vergleich zu den entsprechenden chromatreduzierten Betonen zu beobachten. Der Einfluss des w/b Wertes auf den Zeitraum bis zum dauerhaften Erreichen von Potentialwerten außerhalb der Wasserstoffentwicklung ist signifikant. Bei allen Versuchsreihen waren hier im Mittel die längsten Zeiträume zu beobachten und die Streubreite wurde z.T. deutlich größer. Besonders bei den CEM I und CEM II Varianten mit erhöhtem w/b-Wert konnte im Mittel eine Verdreifung des Zeitraumes gegenüber der jeweiligen Standardrezeptur festgestellt werden. Beim CEM III sind die Unterschiede geringer.

Die Beobachtungen der BAM aus [6, 7] bezüglich einer signifikanten Verlängerung der Zeiträume bis zur Deckschichtbildung bei Verwendung von Zementen mit hohem Na_2O -Äquivalent konnten bei den hier durchgeführten Untersuchungen nicht bestätigt

werden (Abb. 40). Sowohl die Streubänder, als auch die eigentlichen Potentialverläufe waren nahezu deckungsgleich. Im Unterschied zu den Untersuchungen aus [6, 7] hatte der hier verwendete Beton kein natürliches Na_2O -Äquivalent von 1,2, sondern wurde mit KOH aufdotiert. Vermutlich hat die Zementchemie hochalkalischer Betone noch weitere wesentliche Einflussfaktoren auf die Deckschichtbildung des Zinks, die nicht Gegenstand der Untersuchungen innerhalb des Projektes waren.

Da sich bei den untersuchten Kontaktelementen Stahl / verzinkter Stahl der Wasserstoff an der Stahloberfläche bildet, ist hier die Grenze der Wasserstoffentwicklung bei einem Potential von -850 mV anzusetzen. Bleibt das Mischpotential dauerhaft positiver als dieser Wert, kann kein Wasserstoff entstehen. Die Zeiträume nach denen die Proben in den untersuchten Betonen dauerhaft über Potentialwerten von -850 mV lagen sind im Abb. 41 zusammengefasst dargestellt. Die Streubänder beziehen sich auf 6 Proben (3 glatt, 3 gerippt). Durch die zusätzliche Kathodenfläche des zugeschalteten Stahls und die somit beschleunigte Korrosion des verzinkten Stahls, verkürzt sich die Zeit der Deckschichtbildung am verzinkten Stahl. Folglich verkürzt sich auch der Zeitpunkt an dem das Potential den Bereich der Wasserstoffentwicklung am Stahl dauerhaft verlässt.

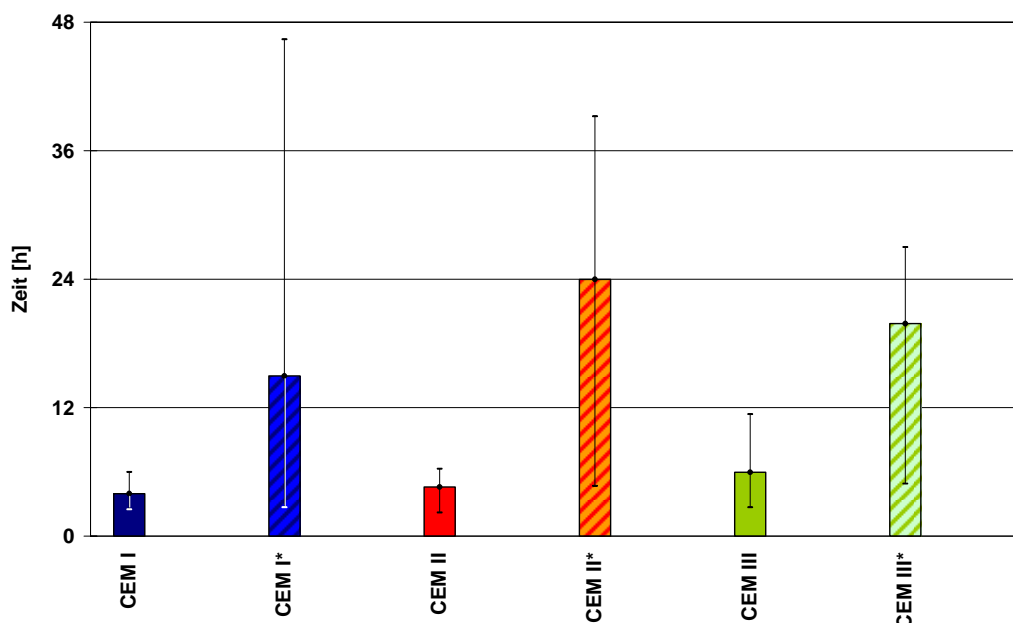


Abb. 41: Zeitraum bis zum dauerhaften Erreichen von Mischpotentialwerten positiver -850 mV bei Kontaktelementen Stahl / verzinkter Stahl in unterschiedlichen Betonen; Streubänder aus jeweils 6 Proben (3 glatt, 3 gerippt)

Tendenziell verringern sich die Zeiten Wasserstoffentwicklung bei den chromatreduzierten Proben im Vergleich zu den chromathaltigen Proben, was auf die Inhibitionsphase durch das Chromates zurückzuführen ist. Die Streubänder der chromathaltigen Proben sind wesentlich

größer, da es an den verzinkten Stahlproben erneut zu einer Wasserstoffentwicklung kam, nachdem die Wirkung des Chromates nicht mehr vorhanden war.

Der Temperatureinfluss auf den Zeitraum bis zum Beginn der Deckschichtbildung ist in Abb. 42 dargestellt. Die Tendenzen der Serien ändern sich nicht, jedoch verkürzt sich der Zeitraum der Wasserstoffentwicklung bei allen Serien. Insbesondere bei den chromathaltigen Varianten kann hier ein deutlicher Einfluss beobachtet werden. Grund ist eine temperaturbedingt beschleunigte Deckschichtbildung am verzinkten Stahl.

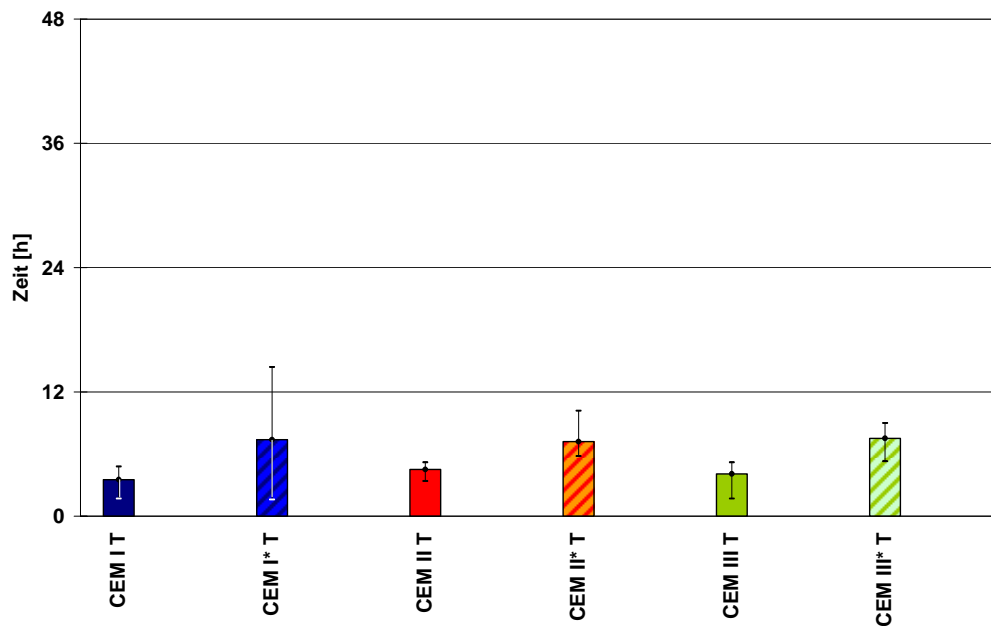


Abb. 42: Zeitraum bis zum dauerhaften Erreichen von Mischpotentialwerten positiver -850 mV bei Kontaktelementen Stahl/verzinkter Stahl in unterschiedlichen Betonen bei 40°C Temperaturlagerung; Streubänder aus jeweils 6 Proben (3 glatt, 3 gerippt)

Da für eine Störung der Verbundzone nur Zeiten der Wasserstoffentwicklung vor der Erstarrung des Betons von Bedeutung sind, sollen nachfolgend diese Zeiten gesondert betrachtet werden. Der später gebildete Wasserstoff kann über die bereits ausgebildete Betonporenstruktur entweichen und führt nicht mehr zu einer Gefügestörung. Als maximaler Zeitraum bis zum Erstarrungsbeginn wurde hier für alle Betone 12 Stunden angenommen. Die gemittelten Verweilzeiten in denen sich die verzinkten Proben in diesem Zeitraum unterhalb der Potentialgrenze von -1200 mV befanden, sind in Abb. 43 dargestellt.

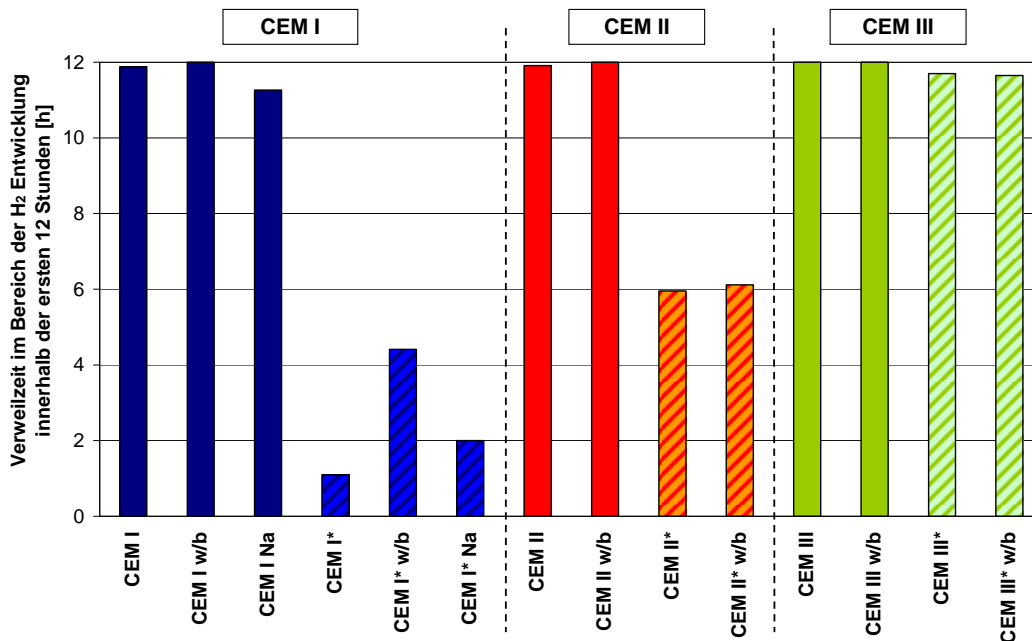


Abb. 43: Verweilzeiten im Bereich der H_2 -Entwicklung innerhalb der ersten 12 Stunden bei verzinktem Stahl in unterschiedlichen Betonen, Mittelwerte aus 6 Proben (3 glatt, 3 gerippt)

Es ist sehr deutlich zu erkennen, dass die verzinkten Proben in allen chromatreduzierten Betonen nahezu über den gesamten Zeitraum von 12 Stunden dauerhaft im Potentialbereich der Wasserstoffentwicklung lagen. Bei den chromathaltigen CEM I* und CEM II* Varianten ist die Verweilzeit aufgrund der chromatbedingten Inhibitionsphase signifikant verkürzt. Beim chromathaltigen CEM III* waren Potentiale im Bereich der Wasserstoffentwicklung wieder über den gesamten Zeitraum von ca. 12 Stunden zu beobachten. Diese Ergebnisse bestätigen die schon in den visuellen Grenzflächenbeurteilungen festgestellten Unterschiede (siehe Abschn. 5).

In Abb. 44 sind die gemittelten Verweilzeiten im Bereich der Wasserstoffentwicklung innerhalb der ersten 12 Stunden für die Kontaktelemente Stahl / verzinkter Stahl dargestellt. Diese sind im Vergleich zu den Untersuchungen am verzinkten Stahl z.T. deutlich verkürzt und bewegen sich zwischen 2 und 5 Stunden. Die Unterschiede zwischen den Varianten

chromathaltig / chromatreduziert sind nicht mehr sehr stark ausgeprägt, jedoch in der Tendenz ähnlich.

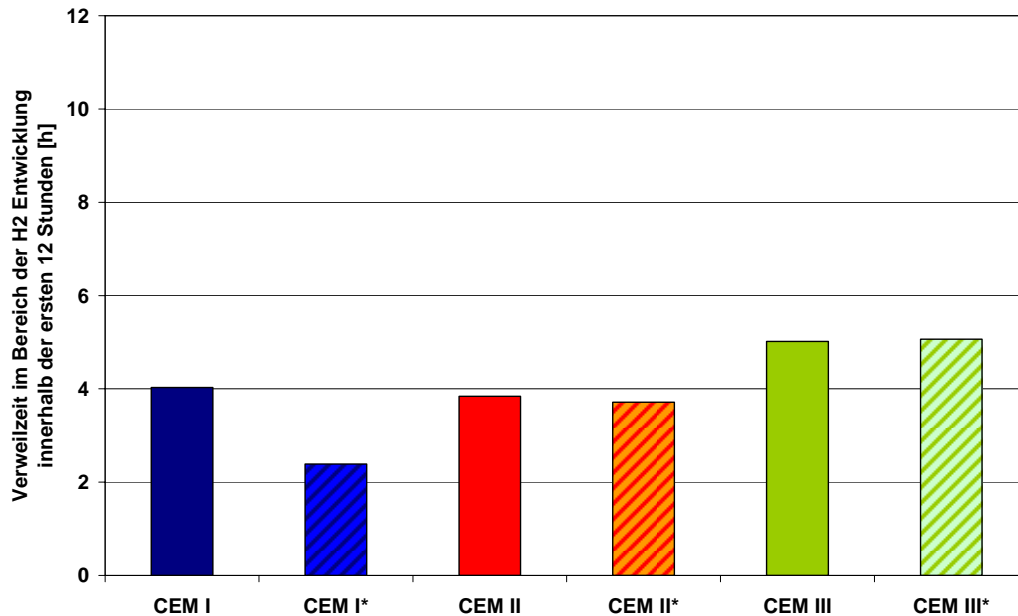


Abb. 44: Verweilzeiten im Bereich der H_2 -Entwicklung innerhalb der ersten 12 Stunden bei Kontaktelementen Stahl / verzinkter Stahl in unterschiedlichen Betonen, Mittelwerte aus 6 Proben (3 glatt, 3 gerippt)

Die bei den Kontaktelementen während der Verweildauer im Bereich der Wasserstoffentwicklung geflossenen Elementströme und daraus errechneten Ladungsmengen geben Aufschluss über die Menge an Wasserstoff, die während dieser Zeit am Stahl gebildet wurde. In Abb. 45 sind die errechneten Ladungsmengen im Potentialbereich der Wasserstoffentwicklung für Stahl in den untersuchten Betonen dargestellt.

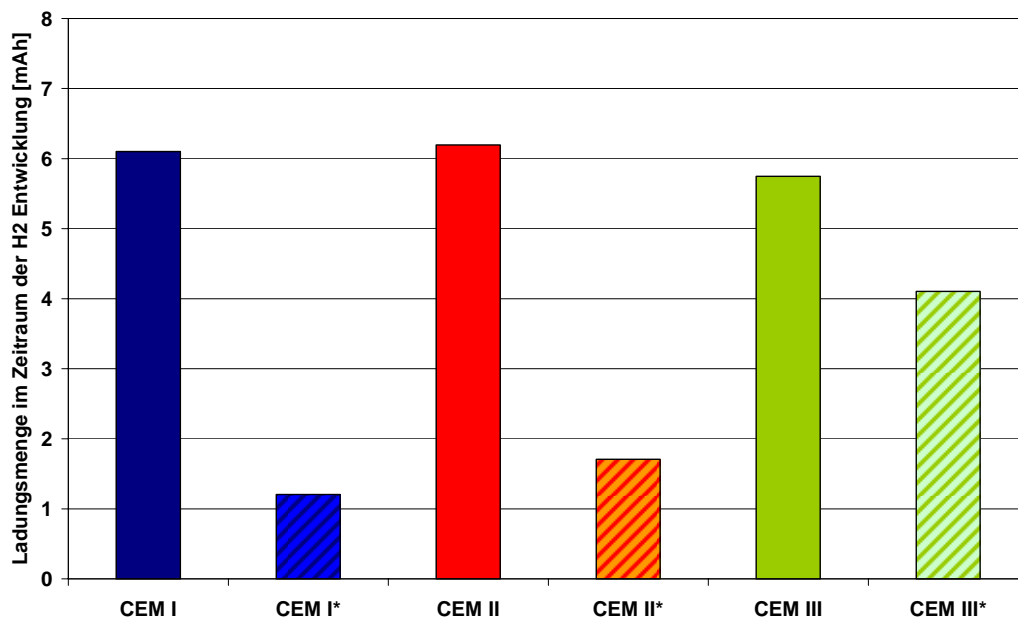


Abb. 45: Errechnete Ladungsmengen aus Elementströmen im Zeitraum der H_2 -Entwicklung innerhalb der ersten 12 Stunden bei Kontaktelementen Stahl / verzinkter Stahl in unterschiedlichen Betonen; Streubänder aus jeweils 6 Proben (3 glatt, 3 gerippt)

Es ist deutlich zu erkennen, dass in allen chromatreduzierten Betonen mit Mittelwerten von 6 mAh die höchsten Ladungsmengen auftraten. Bei den chromathaltigen Betonen kann eine Abstufung mit dem Gehalt an löslichem Chromat im Zement (Portlandzementklinkeranteil) beobachtet werden. Die Proben im CEM I* hatten eine Ladungsmenge von im Mittel 1 mAh, was auf die ausgeprägte Inhibition im Bereich der Frischbetonphase zurückzuführen ist. Beim CEM II* war die Inhibitionsphase abgeschwächt, es ist jedoch ebenfalls eine signifikant geringere Ladungsmenge von ca. 1,8 mAh zu erkennen. Beim CEM III* mit dem geringsten Anteil an Chromat konnte mit einer Ladungsmenge von 4,1 mAh ein Wert festgestellt werden, der den Proben im chromatreduzierten CEM III Beton nahe kommt. Mit steigendem Anteil an löslichem Chromat sinkt folglich die Menge an gebildetem Wasserstoff innerhalb der Frischbetonphase und somit die wasserstoffbedingte Porenbildung. Auch dies wurde durch die visuelle Auswertung der Grenzflächen bestätigt (siehe Abschn. 5).

Aus den gemessenen Elementströmen sind die daraus resultierenden Masseverluste der verzinkten Stahlproben über einen Zeitraum von 120 Stunden (5 Tagen) ermittelt worden. Die Streubänder der flächenbezogenen Masseverluste der unterschiedlichen Betone sind in Abb. 46 dargestellt.

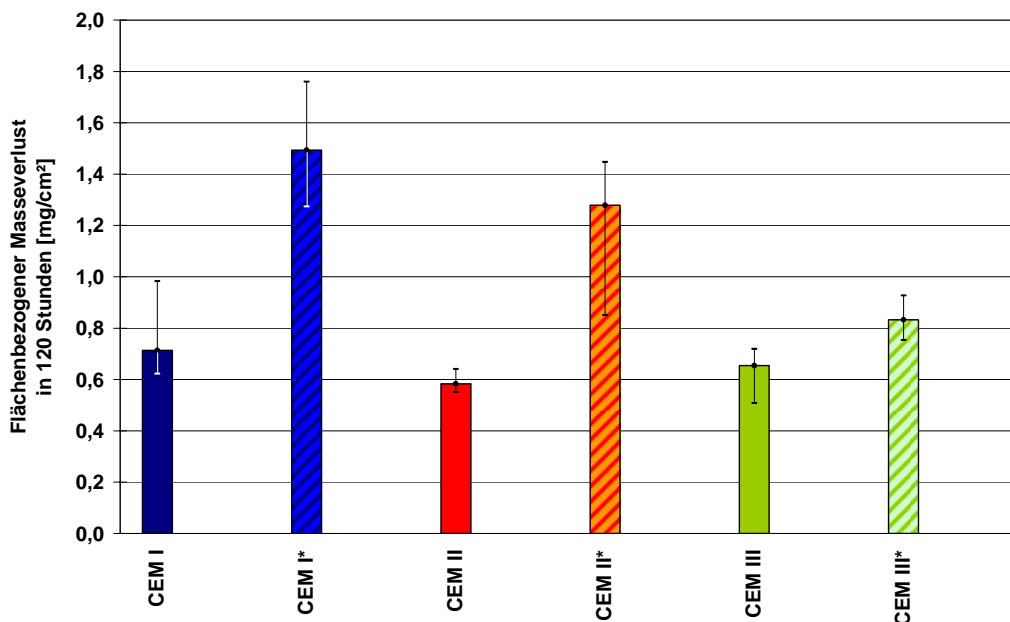


Abb. 46: Flächenbezogene Massenverluste von verzinktem Stahl aus Elementströmen von Kontaktelementen Stahl / verzinkter Stahl in unterschiedlichen Betonen; Streubänder aus jeweils 6 Proben (3 glatt, 3 gerippt)

Das bisher beobachtete Verhältnis zwischen chromathaltigen und chromatreduzierten Proben dreht sich nun um. Die chromathaltigen Betone zeigen im Vergleich zu den chromatreduzierten Betonen signifikant höhere Masseverluste. Der Einfluss der Zementart ist bei den chromathaltigen Betonen deutlich zu erkennen, bei den chromatreduzierten

Varianten überschneiden sich die Streubänder. Die umgerechneten effektiven Abtragswerte der Zinkschicht liegen für die minimalen (CEM II) und maximalen (CEM I*) Masseverluste zwischen 0,8 und 2,1 μm .

Bezüglich der mittleren Zinkschichtdicken des Ausgangsmaterials von ca. 140 μm kann auf Grundlage der elektrochemischen Untersuchungen und den daraus ermittelten Massenverlusten somit ein technisch relevanter Zinkabtrag bis zur Deckschichtbildung ausgeschlossen werden. Der Unterschied im Zinkabtrag zwischen chromathaltigen- und chromatreduzierten Betonen ist zu vernachlässigen, auch wenn sich die hier vorgenommenen Berechnungen ausschließlich auf den Anteil der Elementkorrosion beziehen.

6.2 Stabauszugsversuche

Wie in Abb. 45 anhand der ermittelten Ladungsmengen bereits beschrieben, ist innerhalb der ersten 12 Stunden, bei Verwendung von chromathaltigen Zementen von einer geringeren Gefügestörung auszugehen. Die in Kapitel 5 dargestellten Bilder belegen dies ebenfalls. Eine Ausnahme bildet hier der CEM III, aufgrund des geringen Chromatgehaltes. Bei Betrachtung der in Abb. 47 dargestellten Ergebnisse ist eine Korrelation zu den in Abb. 43 beobachteten Verweilzeiten der Potentiallage des CEM III im Bereich der Wasserstoffentwicklung zu erkennen.

In Abb. 47 ist dargestellt, wie sich die Verbundspannung bei den Serien mit und ohne Chromatreduzierer ausbildet. Deutlich ist zu erkennen, dass sich die Streubreiten bei CEM I und CEM II nicht überschneiden. Bei den Serien mit einem CEM III als Bindemittel ist dieser Unterschied nicht ausgeprägt, was auf ein ähnliches elektrochemisches Verhalten zurückzuführen ist. Im Bereich des Haftverbundes ist ebenfalls festzuhalten, dass die Ergebnisse unabhängig von der Geometrie des Stabes sind. Es zeigt sich in Abb. 47 deutlich, dass die Werte von gerippten und glatten verzinkten Betonstählen, je Serie, in einem Wertebereich liegen. Dies ist auch ein Hinweis auf die gute Reproduzierbarkeit der durchgeführten Untersuchungen.

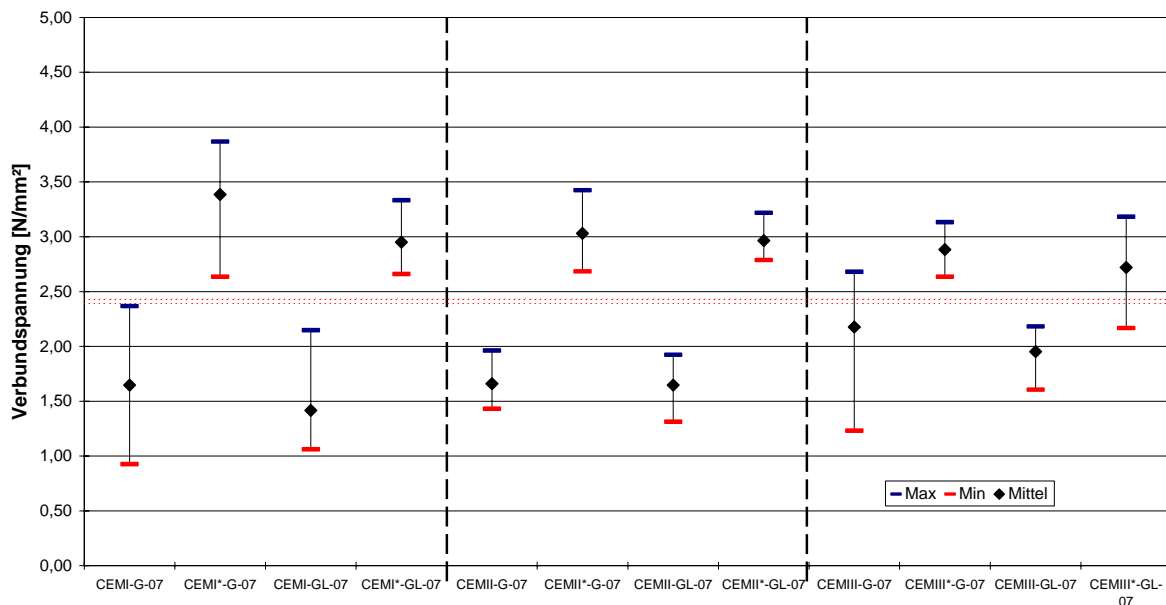


Abb. 47: 7-Tage-Haftverbund, Verschiebeweg 0,01mm, CEMI, II und III jeweils chromatreduziert und chromathaltig, gerippte und glatte verzinkte Betonstähle

Ein anderes Bild zeigt sich bei den 28 Tage Festigkeiten, hier überschneiden sich nahezu alle Streubänder, siehe Abb. 48. Die nach sieben Tagen sehr deutlichen Unterschiede sind hier durch die Nachhydratation und das Aufwachsen von Zink- Oxidationsprodukten kompensiert. Anhand der Mittelwerte lässt sich bei CEM I und CEM II jedoch klar zuordnen, ob ein chromathaltiger oder ein chromatreduzierten Zement als Bindemittel verwendet wurde. Bei den Serien, die mit einem CEM III hergestellt wurden, ist dieser Unterschied nicht mehr zu erkennen.

Aus den bisher gewonnenen Erkenntnissen lässt sich daraus eine gleichermaßen gestörte Verbundzone bei Verwendung eines CEM III ableiten. Die in Abb. 29 und 30 dargestellten Proben mit der sichtbar gestörten Verbundzone sowie die Auszugsversuche, bei einem Verschiebeweg von 0,01 mm und einem Prüfalter von 28 Tagen, bestätigen dies.

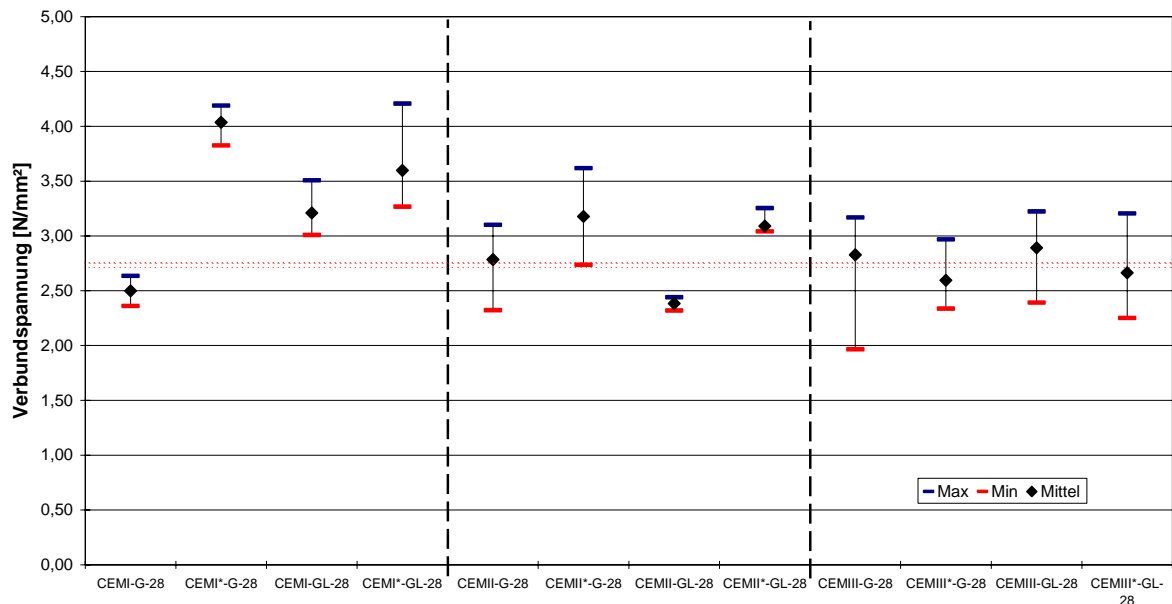


Abb. 48: 28-Tage-Haftverbund, Verschiebeweg 0,01mm, CEMI, II und III jeweils chromatreduziert und chromathaltig, gerippte und glatte verzinkte Betonstähle

Die Beurteilung der Ergebnisse der Auszugsversuche bei einem Verschiebeweg von 0,5 mm lassen sich nur unter Zuhilfenahme der Betondruckfestigkeiten interpretieren. Eine kurze Erörterung hierzu und eine vereinfachte grafische Darstellung sollen die Problematik besser verständlich machen.

Die Abb. 49 zeigt in vereinfachter Form die Krafteinleitung im Zuge der Zugkraftbeanspruchung und die daraus resultierende Druckkräfte in der Betonsteinmatrix bei einem Verschiebeweg von 0,5 mm.

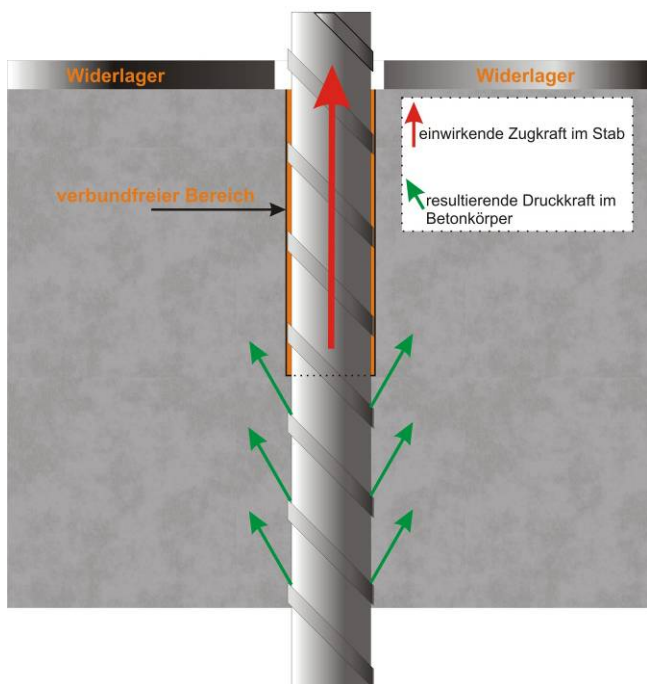


Abb. 49: Schematische Darstellung der Krafteinleitung beim Stabauszugsversuch

Eine Änderung der Betonsteinmatrix hat eine Zu- oder Abnahme der Druckfestigkeit zufolge und somit auch eine Zu- oder Abnahme der aufnehmbaren Zugkraft, welche über den Betonstahl in den Würfel eingeleitet wird.

Betrachtet man die 28 Tage Druckfestigkeiten eines chromathaltigen CEM I mit erhöhtem w/b-Wert und erhöhtem Natriumäquivalent mit den gleichartigen Ergebnisse aus den Auszugversuchen so ist eine Korrelation deutlich zu erkennen, siehe Abb. 50.

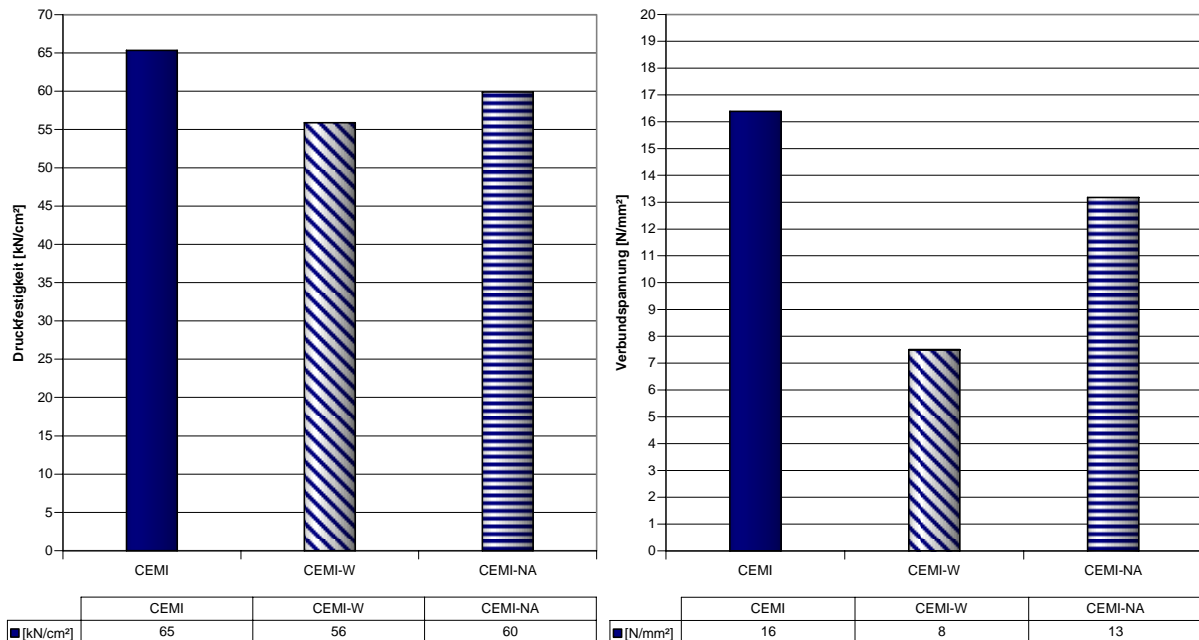


Abb. 50: Korrelation der Betondruckfestigkeit (links) mit dem Scherverbund (rechts), bei 0,5 mm Verschiebeweg, an CEM I Probekörpern mit variiertem w/b-Wert und Na₂O-Äquivalent

Bei Betrachtung der Druckfestigkeitswerte und der verminderten Lastabtragung bei 0,5 mm Verschiebeweg ist eine deutliche Korrelation zu erkennen. Die Serien mit erhöhtem w/b-Wert erreichen nur ca. 80% der Druckfestigkeit der normalen Rezeptur und daraus resultierend nur 60 % des Scherverbundes.

Die Darstellung der Ergebnisse in Abb. 51 zeigt den variierenden Haftverbund. Nach 7 Tagen zeichnen sich die chromathaltigen Zemente CEM I und CEM II, bei den verzinkten Betonstählen (vz-BSt) durch einen erhöhten Haftverbund gegenüber dem Betonstahl (BSt) aus. Die chromatreduzierten Zemente und auch der der chromathaltige CEM III zeigen bei Verwendung eines verzinkten Betonstahls eine deutliche Abminderung des Haftverbundes

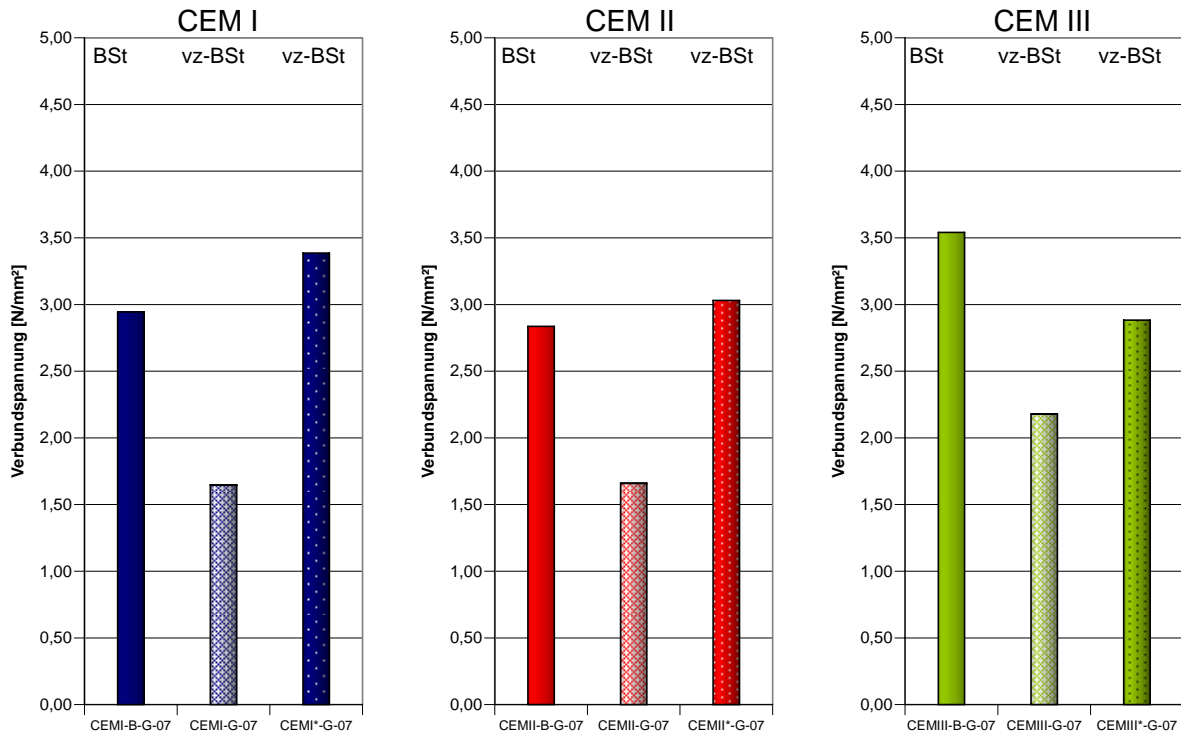


Abb. 51 Mittelwerte des 7 Tage- Haftverbunds, Verschiebeweg 0,01 mm, Betonstahl und verzinkter Betonstahl in chromatreduzierten und chromathaltigen Beton, v.l.n.r. CEM I, CEM II und CEM III

Die Abminderung des Haftverbundes der verzinkten Betonstähle bei Verwendung eines chromatreduzierten Betons liegt in Bereichen von 10 - 45 % gegenüber dem Betonstahl. Eine detaillierte Darstellung des Haft- und Scherverbundes ist in Tabelle 4 aufgeschlüsselt.

Vergleicht man die 7-Tage Werte einer Serie bei einem Verschiebeweg von 0,5 mm in Bezug auf die aufnehmbaren Kräfte eines Betonstahls, so wird deutlich dass durch die geänderte Verbundzone und Rippengeometrie eines verzinkten Betonstahls eine Abminderung erfolgt, siehe Abb.52

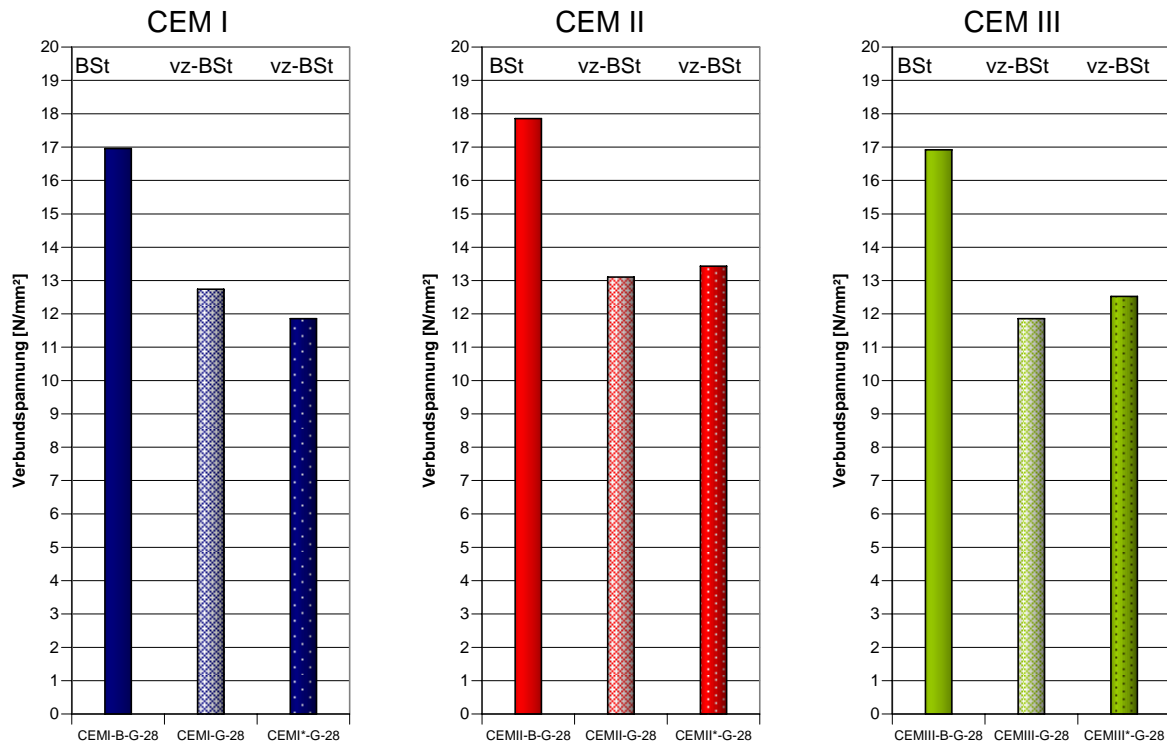


Abb. 52 Mittelwerte des 7 Tage- Scherverbunds, Verschiebeweg 0,5 mm Betonstahl und verzinkter Betonstahl in chromatreduzierten und chromathaltigen Beton, v.l.n.r. CEM I, CEM II und CEM III

Die prozentuale Abminderung des Scherverbundes liegt bei Verwendung eines verzinkten Betonstahls für alle Zemente zwischen 25 – 30 %.

Vergleiche des 28-Tage-Haftverbundes eines Betonstahls bei einem Verschiebeweg von 0,01 mm und eines verzinkten Betonstahls in chromatreduziertem als auch chromathaltigem Beton ergeben die in Abb. 53 dargestellten Ergebnisse. Es wird deutlich, dass bei chromatreduzierten Betonen der anfängliche Haftverbund eines verzinkten Betonstahls in Bezug auf den nicht verzinkten Stahl abgemindert wird. Chromathaltige Zemente CEM I und CEM II hingegen zeigen eine Zunahme des Haftverbundes, was auf eine spätere Deckschichtbildung und einen über den untersuchten Zeitraum insgesamt höheren Ladungsumsatz zurückzuführen ist, siehe Abb. 40 und 45. Bei Verwendung eines CEM III zeigt sich eine Reduktion des Haftverbundes unabhängig davon ob ein chromathaltiger oder –reduzierter CEM III verwendet worden ist.

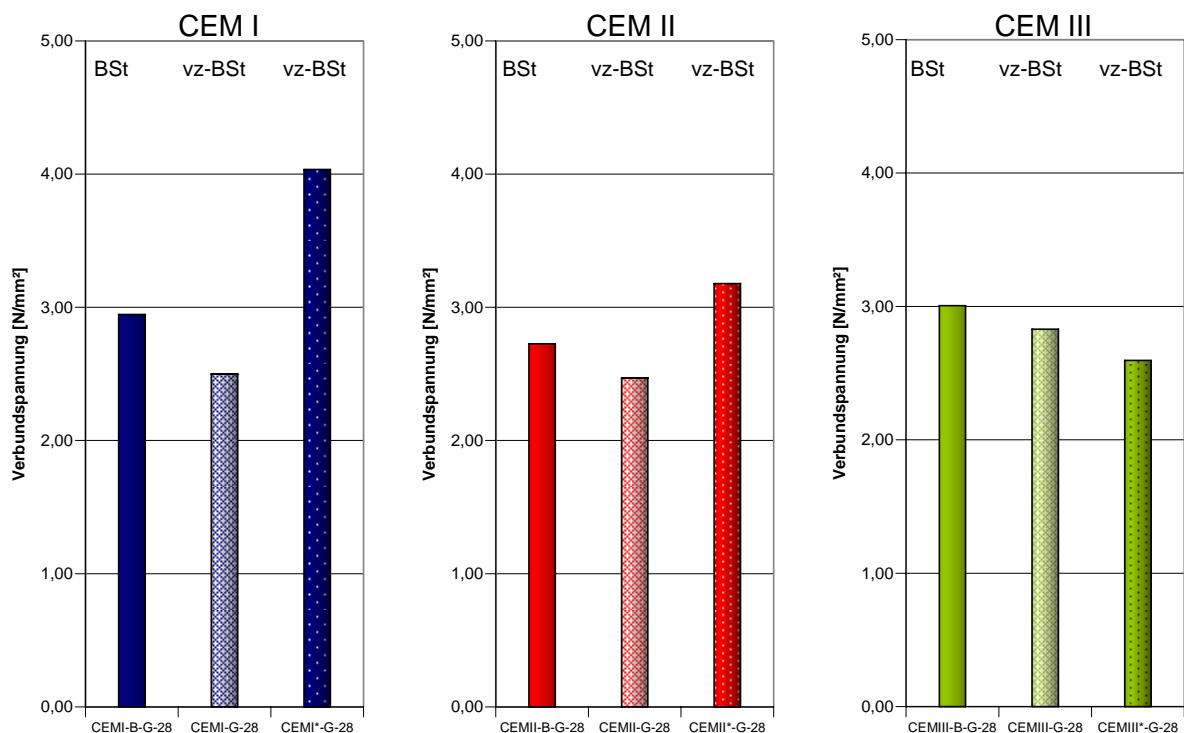


Abb. 53: Mittelwerte des 28 Tage-Haftverbunds, Verschiebeweg 0,01mm Betonstahl und verzinkter Betonstahl in chromatreduzierten und chromathaltigen Beton, v.l.n.r. CEM I, CEM II und CEM III

Der in Abb. 54 dargestellte Scherverbund bei CEM I zeigt gegenüber den 7- Tage- Werten (vgl. Abb. 52) einen Zuwachs des Scherverbundes bei den verzinkten Betonstählen, jedoch keinen Zuwachs bei Betrachtung des Betonstahls. Bei CEM II und CEM III ist wie auch bei den 7- Tage- Werten eine deutliche Abminderung des Scherverbundes der verzinkten Betonstähle zu erkennen. Die Abminderung liegt hier zwischen 20 und 30 %.

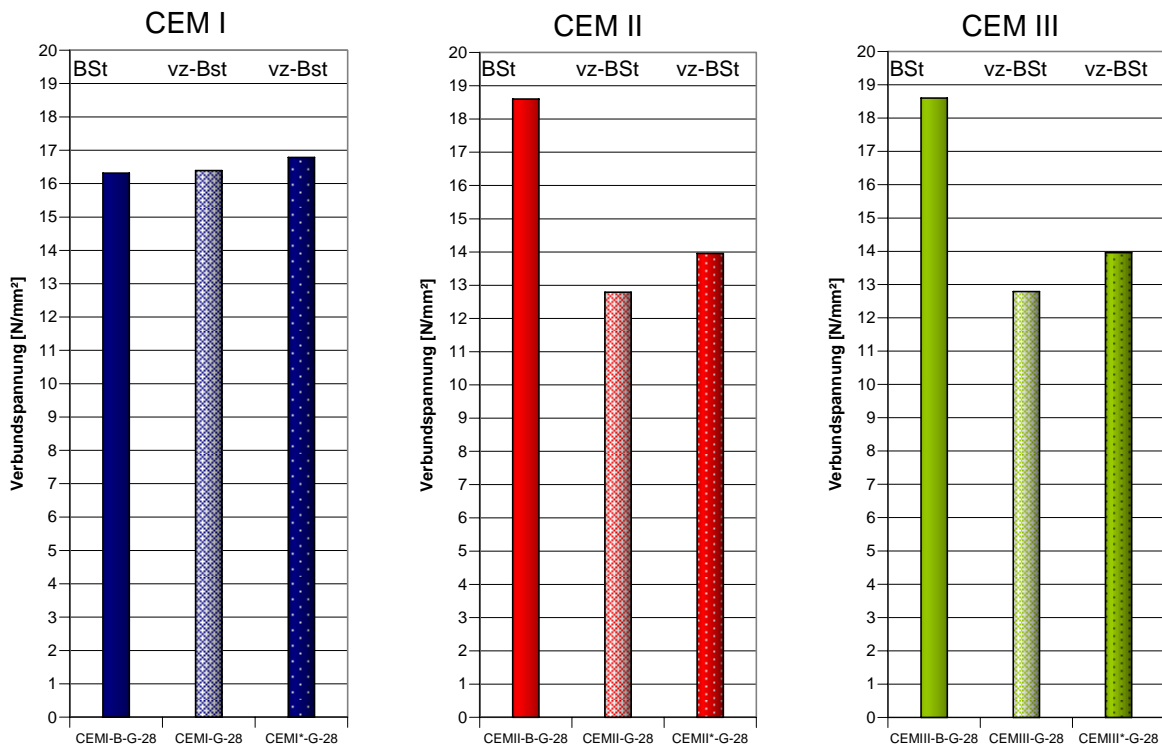


Abb. 54: Mittelwerte des 28- Tage- Scherverbunds, Verschiebeweg 0,5mm Betonstahl und verzinkter Betonstahl in chromatreduzierten und chromathaltigen Beton, v.l.n.r.: CEM I, CEM II und CEM III

In Tabelle 4 wird detailliert dargestellt wie sich die Variation des Chromatgehaltes unter Betrachtung des Prüfaltes und der jeweiligen Zementsorten auf den Haft- und Scherverbund auswirken. Abminderungen sind in der Tabelle mit negativem Vorzeichen und ein Zuwachs mit positivem Vorzeichen versehen.

Tabelle 4: Abminderung des Haft- und Scherverbundes bei Verwendung verzinkter Betonstähle (Werte auf volle 5 % gerundet)

CEM I								
7 d				28 d				Verschiebeweg
chromatreduziert		chromathaltig		chromatreduziert		chromathaltig		
0,01	0,50	0,01	0,50	0,01	0,50	0,01	0,50	
-45	-25	+15	-30	-15	0	+40	+5	% - Abminderung

CEM II								
7 d				28 d				Verschiebeweg
chromatreduziert		chromathaltig		chromatreduziert		chromathaltig		
0,01	0,50	0,01	0,50	0,01	0,50	0,01	0,50	
-40	-30	+10	-25	-10	-20	+20	-20	% - Abminderung

CEM III								
7 d				28 d				Verschiebeweg
chromatreduziert		chromathaltig		chromatreduziert		chromathaltig		
0,01	0,50	0,01	0,50	0,01	0,50	0,01	0,50	
-40	-30	-20	-30	-10	-30	-15	-25	% - Abminderung

6.3 Zusammenfassung

Die elektrochemischen Messungen haben für alle Serien eine Auswirkung des Chromats auf das Korrosionsverhalten und die Deckschichtbildung an verzinkten Betonstählen ergeben. Die Unterschiede waren dabei für CEM I und II besonders ausgeprägt, für den CEM III dagegen deutlich geringer. Chromathaltige Probenreihen der Zemente CEM I und II zeigten im Frühstadium eine deutliche Inhibition der Zinkkorrosion. Dadurch verringert sich die Menge des vor der Erstarrung des Betons gebildeten Korrosionswasserstoffs. An Probekörpern mit chromatreduzierten Zementen tritt diese Inhibition nicht auf. Untersuchungen der Verbundzone zeigen deutlich, dass hier eine ausgeprägte Porenentwicklung im Bereich der Grenzfläche verzinkter Stahl / Betonsteinmatrix vorliegt. Diese ist auf eine starke Wasserstoffentwicklung am verzinkten Stahl im Frischbeton zurückzuführen. Für den CEM III kann ein solcher Unterschied nicht festgestellt werden. Da der Chromatanteil aufgrund des geringeren Anteils an Portlandzementklinker bereits im Ausgangszustand geringer ist, wird keine signifikante Auswirkung auf die Porenstruktur der Verbundzone beobachtet.

Ein signifikanter Unterschied an den Proben mit erhöhtem Na_2O -Äquivalent konnte weder bei den elektrochemischen Untersuchungen noch an der Ausbildung der Verbundzone festgestellt werden. Bei den Stabauszugversuchen werden regelmäßig etwas verminderte Verbundspannungen an den aufdotierten Proben beobachtet. Dieser Unterschied ist jedoch auf die ebenfalls verringerte Betonfestigkeit zurückzuführen.

Bei Ausbildung eines Kontaktelementes zwischen Stahl und verzinktem Stahl tritt die Wasserstoffbildung wie erwartet am Stahl auf. Die Verbundzone zwischen verzinktem Stahl und Betonsteinmatrix bleibt in diesem Fall ungestört. Aus der geflossenen Ladungsmenge kann wiederum deutlich die Wirkung des Chromats als Inhibitor erkannt werden. An den Proben mit chromathaltigen Zementen liegen die umgesetzten Ladungsmengen in den ersten 12 Stunden deutlich unterhalb der Ladungsmengen für die chromatreduzierten Zemente. Auch hier ist der Unterschied zwischen den Zementarten CEM I und CEM II wieder besonders ausgeprägt, während am CEM III nur geringfügige Unterschiede beobachtet werden. Betrachtet man dann Zeiträume über 5 Tage dreht sich das Verhältnis genau um. Dann sind die Ladungsmengen an den chromathaltigen Proben höher, wobei die Abstufung zwischen den Zementarten erhalten bleibt. Die Ausbildung schützender Deckschichten am verzinkten Stahl im erhärteten Beton setzt offensichtlich einen gewissen Ladungsumsatz, also eine bestimmte Zinkkorrosion voraus. Dieser Ladungsumsatz wird bei chromathaltigen Zementen erst nach längeren Zeiträumen erreicht, da die Deckschichtbildung verzögert abläuft. Grund dafür ist die Inhibition der aktiven Zinkauflösung innerhalb der ersten 12 Stunden, durch welche die Zinkkorrosion herabgesetzt wird. Die Inhibition der aktiven Zinkauflösung ist unabhängig von der späteren Deckschichtausbildung zu betrachten. Dies zeigt sich bei den elektrochemischen Versuchen daran, dass insbesondere bei stark ausgeprägten Inhibitionseffekten in der Frischbetonphase, der Deckschichtbildung im erhärteten Beton ein erneuter Einbruch des Potentials in den Bereich der aktiven Zinkauflösung vorausgeht. Am Mechanismus dieser Deckschichtbildung, der vermutlich auf einer weitgehenden Entkopplung des Zinks und der Korrosionsprodukte des Zinks von der hochalkalischen Umgebung beruht, hat das Chromat keinen wesentlichen Einfluss. In Betonen mit chromatreduzierten Zementen bildet sich die Deckschicht demzufolge bereits nach wesentlich kürzeren Zeiten, da hier die notwendige Zinkmenge viel schneller in Lösung

geht. Noch kürzer sind dann die Zeiten bei der Ausbildung von Kontaktelementen. Die durch den Elementstrom bedingte höhere Auflösungsrate am Zink bewirkt hier meist schon nach wenigen Stunden eine Deckschichtbildung. Aufgrund dieser Beobachtungen kann deshalb davon ausgegangen werden, dass die Abzehrung der Zinkschicht infolge der Anfangskorrosion in der Frischbetonphase weitgehend unabhängig vom Chromatgehalt ist. Sie liegt für alle im Vorhaben untersuchten Bedingungen etwa in der gleichen Größenordnung. Prinzipiell ist bei einer erhöhten Zinkkorrosion im noch nicht erstarrten Beton auf Grund der höheren Ionenbeweglichkeit generell mit einer stärkeren Abwanderung von Zinkkorrosionsprodukten zu rechnen. Diese stehen dann für eine Deckschichtbildung und ggf. die Entkopplung von der alkalischen Umgebung nicht mehr zur Verfügung und müssen dann aus der Zinkschicht erneut gebildet werden. Allerdings sind die relevanten Zeiten von ca. 6 bis maximal 12 Stunden offensichtlich zu gering, um hier merkbare Unterschiede beim Verbrauch der Zinkschicht hervorzurufen.

Problematisch für den Einsatz verzinkter Bauteile in Betonen mit chromatreduzierten Zementen ist folglich nicht eine erschwerte oder verzögerte Deckschichtbildung am Zink. Es konnte im Gegenteil nachgewiesen werden, dass gerade bei Verwendung chromathaltiger Zemente die eigentliche Deckschichtbildung verzögert wird. Entscheidend für die störungsfreie Ausbildung der Verbundzone ist vielmehr die Inhibition der aktiven Zinkauflösung durch das Chromat innerhalb der ersten Stunden. Dadurch wird im Zeitraum vor der beginnenden Erstarrung die Entwicklung größerer Mengen von Korrosionswasserstoff verhindert. Der bei chromathaltigen Zementen nach dem Zeitpunkt der Erstarrung entstehende Korrosionswasserstoff infolge einer verzögerten Deckschichtbildung schädigt die Verbundzone dagegen nicht mehr, da er im Porengefüge des Betons abtransportiert werden kann.

Einen signifikanten Einfluss auf den Zeitraum der Deckschichtbildung zeigte die Variation des w/b-Wertes des Betons. Unabhängig vom Chromatgehalt wird bei Anhebung des w/b-Wertes von 0,45 auf 0,55 eine deutliche Verzögerung der Deckschichtbildung beobachtet. So sind die Zeiten bis zur Deckschichtbildung für die Betonmischung mit w/b von 0,55 sowohl für den CEM I als auch den CEM II etwa dreimal so lang wie für Mischungen mit einem w/b-Wert von 0,45. Beim CEM III sind die Unterschiede deutlich geringer.

Bei den im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Untersuchungen wurden einige Proben im Anschluss an die Messungen ausgebaut und die verbliebenen Zinkschichten untersucht. Allerdings ließen sich aus diesen Untersuchungen keine gesicherten Aussagen zur Abzehrung der Zinkschichten ableiten. Da die Reinzinkphase teilweise sehr fest mit der Betonsteinmatrix verbunden war, gab es im Bereich der spröden Eisen-Zink-Legierungsphase aufgrund der beim Ausbau der Stäbe einwirkenden Kräfte unregelmäßige Schichtausbrüche. Diese Schichtausbrüche erfolgen überwiegend oberhalb oder in der Eisen-Zink Legierungsphase, in einigen Fällen aber auch bis in den Bereich des Grundmaterials. Signifikante Unterschiede zwischen verzinktem Stahl aus Betonproben mit chromathaltigen bzw. chromatreduzierten Zementen wurden nicht beobachtet.

Ein Aufsteigen des gebildeten Korrosionswasserstoffs an die noch nicht erstarrte Betonoberfläche wurde bei den durchgeführten Untersuchungen nicht beobachtet. Der gebildete Wasserstoff verblieb überwiegend in Nahbereich der Grenzfläche, an dem er gebildet wurde. Probleme mit der Beeinträchtigung von Betonsichtflächen sind deshalb nur zu erwarten, wenn verzinkte Bewehrung oder Einbauteile im Kontakt mit einer Stahlschalung

stehen. Der sich in diesem Fall an der Grenzfläche Stahlschalung/Betonsteinmatrix bildende Wasserstoff kann zu einer deutlich poröseren Oberfläche des Betons führen. Allerdings ist dies nur zu erwarten, wenn am Bauteil nennenswerte Flächenanteile verzinkten Materials vorliegen und die Stahloberfläche in den Bereich der Wasserstoffentwicklung polarisiert wird. Vorliegende Ergebnisse aus anderen Untersuchungen [6,7] zeigten, dass bei einem Flächenverhältnis Stahl : Zink von 10 : 1 der Stahl nicht mehr in den Bereich der Wasserstoffbildung polarisiert wird. Bei kleineren Flächenanteilen des Stahls ist in Abhängigkeit von weiteren Einflussgrößen eine Wasserstoffentwicklung am Stahl möglich und unter einem Verhältnis von 5:1 als gegeben anzunehmen.

Die Gesamtauswertung der Stabauszugversuche ergab, dass für die chromatreduzierten Varianten aller untersuchten Zemente eindeutig nachweisbare Störungen in der Verbundzone auftreten. Für den bei einem Verschiebeweg von 0,01 mm geprüften Haftverbund treten im Prüfalter von 7 Tagen Abminderungen der mittleren Verbundspannung von ca. 40 % auf. Der nur am CEM I geprüfte Einfluss des w/b-Wertes zeigt, dass eine Erhöhung des w/b-Wertes die nachteiligen Auswirkungen der abgesenkten Chromatgehalte weitgehend kompensiert. Die Abminderung liegt in diesem Fall dann nur noch bei ca. 10 %.

Im Prüfalter von 28 Tagen nehmen die festgestellten Unterschiede im Haftverbund deutlich ab. Für alle chromatreduzierten Zemente wird noch eine Abminderung von 10-15 % festgestellt. Für die chromathaltigen Zemente CEM I und CEM II wird, wie in der Literatur beschrieben ein verbesserter Haftverbund ermittelt. Die Verbundspannungen für den Haftverbund liegen 20-40 % höher, als am unverzinkten Betonstahl. Für den chromathaltigen CEM III wird dagegen weiterhin eine Abminderung von ca. 15 % beobachtet. Im CEM III ist der Chromatgehalt für eine ausreichende Inhibition der Zinkkorrosion in der Frischbetonphase offensichtlich bereits zu gering.

Die erzielten Ergebnisse zeigen damit eine gute Korrelation zu den elektrochemischen Untersuchungen, die in chromatarmlen Betonen eine schnelle Deckschichtbildung und damit einhergehend eine starke Zinkkorrosion in der Frühphase erkennen ließen. In Betonen mit chromathaltigen Zementen (mit Ausnahme des CEM III) sowie mit erhöhtem w/b-Wert wurden dagegen inhibierende Effekte bzw. eine insgesamt verzögerte Deckschichtbildung beobachtet. Diese führen offensichtlich zu einer geringeren Störung der Verbundzone und bleiben daher ohne nachteilige Auswirkungen auf den Haftverbund.

Die Ermittlung des Scherverbundes bei Verschiebewegen von 0,5 mm lässt eine signifikante Beeinflussung der Verbundspannungen durch den Chromatgehalt nicht erkennen. Hier kommt der Druckfestigkeit der Betonsteinmatrix und der veränderten Rippengeometrie verzinkter Stähle die überwiegende Bedeutung zu. Deshalb werden für Proben mit erhöhtem w/b-Wert, die eine signifikant verminderte Druckfestigkeit aufweisen, auch die geringsten Verbundspannungen ermittelt.

Mit den Ergebnissen konnte eine Beeinträchtigung der Verbundzone als Folge der Chromatreduzierung für die Zementarten CEM I und CEM II eindeutig nachgewiesen werden. Die Störung der Verbundzone ist in Bezug auf die sich ausbildende Porenstruktur als dauerhaft anzusehen. Die für den Verbund nachteiligen Auswirkungen werden mit zunehmendem Betonalter jedoch weitgehend kompensiert. So führt die Festigkeitsentwicklung mit zunehmendem Betonalter insgesamt dazu, dass die Verbundspannungen auch in der gestörten Verbundzone ansteigen, aber die Ausgangswerte für chromathaltige Betone nicht ganz erreichen. Für den CEM III ist in Abhängigkeit vom

Ausgangsgehalt an Chromat im Portlandzementklinker davon auszugehen, dass eine wesentliche Veränderung der Verbundzone durch die weitere Absenkung des Chromatgehaltes nicht zu erwarten ist. D.h. für den CEM III kann prinzipiell davon ausgegangen werden, dass bei geringem Ausgangsgehalt an Chromat im Portlandzementklinker bereits vor der normativen Absenkung der Grenzwerte keine ausreichende Inhibition erfolgte und dadurch bereits früher Störungen der Verbundzone auftraten. Diese Annahme konnte anhand der Ergebnisse für den chromathaltigen CEM III innerhalb des Vorhabens bestätigt werden. Die entsprechenden Proben zeigten ebenfalls einen verminderten Haftverbund. Ein zusammenfassender Gesamtüberblick über die aus den durchgeführten Untersuchungen bzgl. der Aufgabenstellung abzuleitenden Aussagen wird in der Tabelle 5 gegeben.

Tabelle 5: Zusammenfassung der Erkenntnisse aus den Untersuchungen

Problemstellung	chromatreduziert	nicht chromatreduziert
Zinkkorrosion	keine Inhibitionswirkung	inhibiert bei ausreichender Konzentration die aktive Zinkkorrosion im Frischbeton
Deckschichtbildung	keine wesentliche Auswirkung, beschleunigte Deckschichtbildung	keine wesentliche Auswirkung, verzögerte Deckschichtbildung
Wasserstoffentwicklung	tritt im Frischbeton auf	vor der Ansteifung weitgehend unterdrückt, später möglich, am CEM III auch vor der Ansteifung möglich
Störung von Sichtflächen infolge Wasserstoffentwicklung	bei Stahlschalung in Verbindung mit verzinkten Einbauteilen/Stahlbewehrung möglich	nicht zu erwarten, am CEM III an der Stahlschalung
Ausbildung der Verbundzone	wird gestört	bei CEM I und CEM II ungestört, bei CEM III Störungen möglich
Dauerhaftigkeit des Korrosionsschutzes	keine Anhaltspunkte für eine Beeinträchtigung	keine Anhaltspunkte für eine Verbesserung
Haftverbund (Verschiebeweg 0,01 mm)	wird gestört Abminderung ca. 40 %* nach 7 Tagen und max. 10 %* nach 28 Tagen	CEM I und II 10-15 %* höhere Verbundspannungen nach 7 Tagen und bis 40 % nach 28 Tagen CEM III mit Abminderung von 15-20 %*
Scherverbund (Verschiebeweg 0,5 mm)	keine Auswirkungen Unterschiede nur durch Rippengeometrie	keine Auswirkungen Unterschiede nur durch Rippengeometrie

* bezogen auf die ermittelten Werte an unverzinktem Betonstahl

In wie weit die beschriebenen Störungen der Verbundzone und des Haftverbundes im jungen Beton in der Praxis etwa bei Ausschulfristen oder ggf. der Abminderung von Verbundspannungen zu berücksichtigen sind, muss durch den SVA „Betonstähle“ auf der Grundlage der vorliegenden Ergebnisse abschließend geklärt werden.

Die Korrelation der Ergebnisse aus elektrochemischen Untersuchungen, der Untersuchungen der Verbundzone und der Ermittlung der Verbundfestigkeiten hat gezeigt, dass die aus elektrochemischen Untersuchungen gewonnen Messwerte geeignet sind, sichere Aussagen über Störungen in der Verbundzone abzuleiten. Hinweise auf Störungen liefert eine lange Verweildauer des Freien Korrosionspotentials im Bereich der Wasserstoffbildung innerhalb der ersten 12 Stunden nach der Betonage und das Fehlen eines typischen Potentialanstiegs infolge der Inhibition der anodischen Zinkauflösung. Für Kontaktelemente lässt die im Potentialbereich der Wasserstoffentwicklung umgesetzte Ladungsmenge auf Verbundstörungen schließen. Je länger die Potentiale innerhalb den ersten 12 Stunden im Bereich der Wasserstoffentwicklung liegen bzw. je höher der Ladungsumsatz innerhalb dieser Zeiten ist, umso stärkere Störungen werden in der Verbundzone beobachtet. Mit diesen Störungen korrelieren die verringerten Verbundspannungen bei einem Verschiebeweg von 0,01 mm.

Durch diesen eindeutigen Zusammenhang wird es möglich, in Screeningversuchen umfangreichere Parameterstudien bzgl. verschiedener Zementarten, Betonzusammensetzungen oder sonstigen Randbedingungen durchführen zu können, ohne wesentlich aufwändigere Stabauszugversuche durchführen zu müssen. So lassen sich z.B. auch der Einsatz anderer Inhibitoren und deren notwendige Konzentration hinsichtlich der Eignung zur Unterdrückung der Wasserstoffentwicklung in der Frischbetonphase untersuchen. Dies eröffnet für die weitere Bauforschung die Möglichkeit, Unterschiede ohne die systembedingten starken Schwankungen der Stabauszugversuche durch relativ einfache Versuche mit hoher Reproduzierbarkeit zu gewinnen. Verbundversuche können dann auf wenige, als besonders kritisch bzw. als unkritisch identifizierte Parameter beschränkt werden.

Literatur

- [1] Nürnberger, U.: Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin 1995

- [2] Koch, R. u. Wohlfahrt, R.: Verzinkte Stäbe – Rippengeometrie und Verbundverhalten feuerverzinkter Betonstahl, Beton+Fertigteil-Technik (1989), Nr. 2, S. 52-57

- [3] Kaesche, H.: Die Korrosion der Metalle, Springer Verlag, 1990

- [4] Heiligenstaedt, P. und Bohnenkamp, K.: Untersuchungen zum wasserstoffinduzierten Sprödbbruch verzinkter Spannstähle im Beton, Arch. Eisenhüttenwesen 47 (1976) Nr. 2, S.107-112

- [5] Nürnberger, U.: Verhalten feuerverzinkter Bewehrungsstähle in alkalischem Beton unter Berücksichtigung des Alkali- und Chromatgehaltes der verwendeten Zemente. Zusammenfassung des bekannten Wissens, Beton- und Stahlbetonbau 102 (2007), Nr. 3, S. 144-153

- [6] Dr. A. Burkert, A. Burkert, G. Eich, J. Lehmann, Dr. J. Mietz: Galvanized constructional elements in contact with prestressing steel, Materials and Corrosion 59 (2008) Nr. 2, S. 131-138

- [7] Burkert, A., Mietz, J., Lehmann, J., Eich, G., Burkert, A.: Verzinkte Bauteile in Kontakt mit Spanngliedern
Forschungsbericht 282 (2008) 1-28, Hrsg.: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

- [8] RILEM, Bond test for reinforcement steel. 2. Pull-out test, 2nd. Edition (1983) S.218-220

- [9] DIN EN 1766:2000-03, Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Prüfverfahren - Referenzbetone für Prüfungen; Deutsche Fassung EN 1766:2000