



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Laborversuche zur Korrosions- beständigkeit von Mikropfählen und permanenten ungespannten Ankern (Bodennägel)

**Essais de laboratoire sur la résistance à la corrosion des
micropieux et des tirants d'ancrage permanents passifs
(clous)**

**Laboratory tests on the corrosion resistance of micro piles
and permanent untensioned anchors (soil nails)**

TFB AG
Dr. Yves Schiegg
Dr. Stefanie von Greve-Dierfeld

Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz
Dr. Martin Brem

**Forschungsprojekt AGB 2019/002 auf Antrag der Arbeitsgruppe Brücken-
forschung (AGB)**

September 2025

1800

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Laborversuche zur Korrosions- beständigkeit von Mikropfählen und permanenten ungespannten Ankern (Bodennägel)

**Essais de laboratoire sur la résistance à la corrosion des
micropieux et des tirants d'ancrage permanents passifs
(clous)**

**Laboratory tests on the corrosion resistance of micro piles
and permanent untensioned anchors (soil nails)**

TFB AG
Dr. Yves Schiegg
Dr. Stefanie von Greve-Dierfeld

Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz
Dr. Martin Brem

**Forschungsprojekt AGB 2019/002 auf Antrag der Arbeitsgruppe Brücken-
forschung (AGB)**

September 2025

1800

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Dr. Yves Schiegg

Mitglieder

Dr. Stefanie von Greve-Dierfeld

Dr. Martin Brem

Begleitkommission

Präsident

Dr. Martin Käser

Mitglieder

Prof. Dr. Ueli Angst

Prof. Dr. Walter Kaufmann

Prof. Dr. Albin Kenel

Dr. Kristian Schellenberg

René Krättli

Duncan Moore

Antragsteller

Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Zusammenfassung	7
Résumé	10
Summary	13
1 Einleitung	16
1.1 Ausgangslage	16
1.2 Zielsetzung des Forschungsprojekts	17
2 Korrosionsschutz von ungespannten Ankern und Mikropfählen in der Schweiz....	19
2.1 Anforderungen an den Korrosionsschutz.....	19
2.2 Selbstbohranker	21
3 Korrosionsgefährdung von Mikropfählen	23
3.1 Korrosion von Stahl im Erdboden und Betonkorrosion	24
3.1.1 Korrosion von Stahl im Erdboden	24
3.1.2 Expositionsklassen, bezogen auf Böden und Grundwasser.....	25
3.1.3 Chemischer Angriff an zementösen Werkstoffen.....	26
3.1.4 Auslaugung von Beton und Füllgut	27
3.1.5 Schweizerische Dauerhaftigkeitsprüfungen	29
3.1.6 Beispiel-Szenarien für eine Korrosionsgefährdung von Mikropfählen	30
3.2 Korrosionsfortschritt im Erdboden	31
3.2.1 Korrosivität des Baugrunds	31
3.2.2 Korrosionsabtrag in unterschiedlichen Böden	32
3.2.3 Galvanische Korrosion – Ausbildung von Makroelementen	33
3.2.4 Feldversuch SBB-Lärmschutzwand	34
4 Laborversuche.....	36
4.1 Untersuchungen am Füllgut (Einpressmörtel)	36
4.1.1 Bindemittel und Mischungen	36
4.1.2 Frischmörtelprüfungen	37
4.1.3 Festmörtelprüfungen	40
4.2 Auslagerungsversuche in Sandboxen	45
4.2.1 Sandboxen	45
4.2.2 Bodenmaterial ("Perth Sand")	46
4.2.3 Bodenlösungen	47
4.2.4 Pfahlkonfigurationen und Schutzstufen	49
4.2.5 Verwendete Messtechnik	51
4.2.6 Soil Box	52
4.2.7 ER Probes	52
4.2.8 Widerstandsmessungen (Dichtigkeit Hüllrohr).....	53
4.2.9 Korrosionspotenzial, Eigenkorrosion und Makroelementkorrosion.....	54
4.2.10 Ausbau der Mikropfähle und Analyse der Korrosionsangriffe.....	57
4.3 Laboruntersuchungen in Lösung (Lollipop-Versuche)	65
4.3.1 Probenherstellung	65
4.3.2 Untersuchungsmatrix	66
4.3.3 Probenlagerung und Messkonfiguration	66
4.3.4 Korrosionspotenzial und Makroelementkorrosion	67
4.3.5 Eigenkorrosionsrate	69
5 Zusammenfassung der Ergebnisse und Folgerungen.....	71
5.1 Füllgut.....	71
5.2 Festmörteleigenschaften und Dauerhaftigkeit	72

5.3	Korrosion und Korrosionsschutz von Mikropfählen	74
5.3.1	Allgemeines	74
5.3.2	Laboruntersuchungen	75
5.4	Korrosivität des Bodens	76
6	Verbesserungen für die Praxis und Hinweise für die Normierung	78
6.1	Ausbildung des Pfahlkopfs.....	78
6.1.1	Ausführung und Prüfung Qualitätssicherung	79
6.2	Zusätzliche konstruktive Verbesserungen	80
6.2.1	Korrosionsschutz von Muffenstößen (Kupplungsstellen)	80
6.2.2	Überdeckungen des Tragglieds mit Füllgut	81
6.3	Qualitätssicherung und Überwachung.....	81
6.4	Zukünftiger Forschungs- und Normierungsbedarf	82
	Glossar.....	83
	Literaturverzeichnis.....	84
	Projektabschluss	87

Zusammenfassung

Ausgangslage und Zielsetzung

Der Einsatz von Bodennägeln und Mikropfählen stellt in vielen Fällen eine wirtschaftliche Lösung dar, insbesondere in beengten Platzverhältnissen, wo der Einsatz grosser Maschinen schwierig oder unmöglich ist. Der Korrosionsschutz solch ungespannter Verankerungen muss bei langfristiger Nutzung in der Regel der Schutzstufe 2 gemäss Norm entsprechen. Probleme bei den Injektionsarbeiten und ungenügende Widerstände bei der Kontrolle der Dichtigkeit der Hüllrohre führen in der Praxis häufig zu Unsicherheiten bezüglich der Dauerhaftigkeit solcher Systeme, was den Einsatz von Mikropfählen trotz bauartbedingter Vorteile einschränkt.

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde mittels Laborversuchen untersucht, unter welchen Bedingungen mit einer erhöhten Korrosionsgefährdung von ungespannten Ankern (Bodennägel) und Mikropfählen zu rechnen ist.

Vorgehen

Untersuchungen an Füllgut

Es wurden fünf verschiedene Füllgutmischungen untersucht, wobei eine Mischung kommerziell erhältlich ist. Eine Mischung aus einem Portlandkompositzement und zwei Zusatzmitteln mit $w/b < 0.4$ wird auch für die Injektion von Spanngliedern verwendet. An den Mischungen wurden Frischmörteleigenschaften wie Fliessvermögen, Blutwasserbildung und Entmischungsstabilität gemäss Norm SN EN 445 geprüft. Weiter wurden die Festigkeitsentwicklung nach 1, 3, 7 und 28 Tagen gemessen sowie diverse Dauerhaftigkeitskennwerte bestimmt. Als neue Prüfung wurde der Widerstand gegen Auslaugen durch weiche Wässer oder chemisch lösenden Angriff untersucht.

Korrosionsversuche an Mikropfählen / Bodennägeln

Unter Laborbedingungen wurden Mikropfähle mit Schutzstufe 1, 2a und 2b korrosionstechnisch untersucht. Dazu wurden Pfahlabschnitte in grossen, sandgefüllten Boxen während rund einem Jahr ausgelagert. Parallel dazu wurden analoge Versuche in definierten Bodenlösungen durchgeführt. Geprüft wurde der Einfluss von künstlich eingebrachten Ausführungsfehlern und Defektstellen am Korrosionsschutz auf den Korrosionsfortschritt der Tragglieder.

Als Bodenmaterial in den Boxen wurde ein Sandgemisch, bekannt als «Perth-Sand» hergestellt, das mit unterschiedlich korrosiven Bodenlösungen getränkt wurde. Nebst den Pfahlabschnitten wurde ein Bewehrungsnetz aus nichtrostendem Stahl eingelegt (simulierte Fundamentbewehrung). Mit dieser Konfiguration konnte der Korrosionsfortschritt am Tragglied direkt gemessen bzw. aufgezeichnet werden. Anschliessend wurden die Tragglieder schichtweise ausgebaut und die Korrosionsangriffe an Schliffbildern dokumentiert. Die Auslaugversuche wurden in Bodenlösungen und beschleunigt in 6 M Ammoniumnitratlösung ausgeführt.

Ergebnisse und Folgerungen

Füllgut

Mischungen rein aus Zement und Wasser ohne Zusatzmittel zeigen ein ungünstiges Verhalten bezüglich Blutwasserbildung und Entmischung. Das kommerziell erhältliche Füllgut und das Füllgut für Vorspannung weisen hingegen eine gute Stabilität auf. Je nach Art des Zusatzmittels wird zur Aktivierung eine hohe Mischenergie benötigt, wofür sich beispielsweise Kolloidalmischer eignen. Aus der Praxis ist bekannt, dass die Messung der Fliesszeit gemäss Norm SN EN 445 nur bei w/b -Werten über 0.5 oder durch Zugabe von Fliessmittel zuverlässig funktioniert. Dickflüssigere Suspensionen können den konisch geformten Trichter verstopfen.

Die Festigkeit und Rohdichte korreliert generell gut mit dem w/b-Wert. Die Mischungen mit puzzolanisch und hydraulisch wirkenden Zusatzstoffen zeigen zwischen 7 und 28 Tagen noch eine signifikante Steigerung der Druckfestigkeit. Die häufig geforderte Druckfestigkeit von 25 MPa nach 28 Tagen wird von den Mischungen mit $w/b \leq 0.5$ klar erreicht. Für $w/b \geq 0.6$ wird dieser Wert hingegen knapp erreicht oder nur leicht überschritten.

Zur Prüfung der Dauerhaftigkeitseigenschaften wurden die Verfahren gemäss Norm SIA 262/1 angewendet. Der Frosttausalz-widerstand wurde mit der Prüfung «Frostwiderstand nach Schnellverfahren TFB» bestimmt.

Der Chloridwiderstand nimmt mit zunehmendem Anteil puzzolanisch bzw. hydraulischer Zusatzstoffe zu und mit zunehmendem w/b-Wert ab. Es konnte ein deutlicher Zusammenhang zwischen dem w/SiO₂-Gehalt und dem Chloriddiffusionskoeffizienten festgestellt werden.

Wenn ein hoher Sulfatwiderstand gefordert wird, kann dies nur mit der Verwendung von Zementen mit hohem Sulfatwiderstand (SR oder HS-CH Zemente) sicher erreicht werden (siehe SIA Register der frei gegebenen Zemente).

Der Karbonatisierungswiderstand ist zwar für die Exposition von Einpressmörteln kaum massgebend, kann aber Rückschlüsse auf den Auslaugwiderstand bzw. den Widerstand gegenüber chemischem Angriff liefern. Tendenziell war der Karbonatisierungswiderstand eher tiefer als erwartet, was mit Schwindrissbildung während der Trocknung der Proben erklärt werden kann. Ein Zusammenhang zwischen w/CaO und Karbonatisierungskoeffizient ist vorhanden.

Frosttausalz-widerstand – Nur die Mischung mit $w/b < 0.5$ zeigt einen hohen Widerstand, was auf das geringe Porenvolumen zurückgeführt werden kann.

Bei den neuartigen Auslaugversuchen konnte nachgewiesen werden, dass die Auslaugeschwindigkeit bei Füllgut-Mischungen etwa 2.3 bis 6-mal langsamer verläuft als die Karbonatisierung. Trotzdem muss die Auslaugung von erdvergrabenen Betonbauteilen oder Verankerungen bei langen Nutzungsdauern und Bindemitteln mit reduziertem Klinkergehalt in Zukunft genauer beachtet werden.

Korrosionsversuche an Traggliedern

Die verschiedenen korrosionstechnischen Versuche in Lösung und Sandböden haben gezeigt, dass Mikropfähle mit Schutzstufe 2a grundsätzlich gut vor Korrosion geschützt sind, solange das Kunststoffhüllrohr intakt ist. Mikropfähle mit Schutzstufe 2b (Tragglied aus nichtrostendem Chrom-Stahl) haben auch in korrosiver Umgebung eine gute Korrosionsbeständigkeit gezeigt.

Mit ungenügender Dauerhaftigkeit ist hingegen zu rechnen, wenn Defektstellen am Hüllrohr und eine fehlende oder schadhafte/ausgelaugte Umhüllung des Tragglieds vorhanden sind. Je nach Zusammensetzung und Feuchtigkeit des Bodens muss in diesem Fall mit Korrosionsraten zwischen 0.02 und 0.2 mm/Jahr gerechnet werden. Eine Zunahme des Korrosionsabtrags mit zunehmender Korrosivität der Bodenlösung hat sich grundsätzlich bestätigt. Bei den Lösungsversuchen war klar ersichtlich, dass die Korrosionsraten an Fehlstellen in der Mörtelumhüllung von Mikropfählen mit Schutzstufe 1 höher sind als bei Pfählen mit Schutzstufe 2a. Dies kann damit erklärt werden, dass der unter dem alkalischen Füllgut passivierte Stahl eine kathodische Wirkung hat, was eine Makroelementbildung mit der aktiven Fehlstelle zur Folge hat und den Korrosionsangriff verstärkt.

Ein besonders grosses Korrosionsrisiko besteht dann, wenn ungenügend geschützte Mikropfähle mit der Bewehrung von Fundamenten, Bodenplatten, Stützmauern etc. elektrisch verbunden sind. Durch diese äussere Makroelementbildung wird der Stahlabtrag im Vergleich zur Korrosion ohne Einfluss der Bewehrung stark beschleunigt (um ca. eine Grössenordnung). Im Extremfall wurde bei Traggliedern mit Schutzstufe 2a ein Korrosionsfortschritt von mehr 2 mm/Jahr gemessen. Dabei hat sich gezeigt, dass sich der Korrosions-

angriff wegen dem isolierenden Hüllrohr seitlich nicht ausbreiten kann und demzufolge verstärkt in die Tiefe fortschreitet. Kupplungen, die mit Schrumpfschläuchen geschützt werden, bilden eine Schwachstelle. Schon bei kleinen Defekten (Perforierungen, Risse) dringt Feuchtigkeit in die Kupplung ein, was flächige Korrosionsangriffe am Tragglied und an der Muffe auslöst. Aufgrund der Ergebnisse dieser Arbeit wurden konkrete Vorschläge zur Verbesserung des Korrosionsschutzes gemacht und Auswirkungen auf die Normierung diskutiert.

Die Ergebnisse der Lösungsversuche mit kleinen Lollipop-Prüfkörpern konnten die Resultate der Auslagerungsversuche bestätigen. Zudem haben die Versuche gezeigt, dass die Zusammensetzung und die Qualität des Füllguts praktisch keinen Einfluss auf den Schadenfortschritt haben.

Empfehlungen und Hinweise für die Normierung

In der Praxis ist unbedingt darauf zu achten, dass zwischen Tragglied der Verankerung und der Bewehrung des verankerten Bauteils kein elektrischer Kontakt besteht. Diese Massnahme muss messtechnisch und im Minimum visuell kontrolliert werden.

Das ASTRA fordert schon heute den Einbau von Pfahlkopfschutzrohren, um die Bildung von Schwachstellen am Korrosionsschutz im Übergang vom Boden in den Konstruktionsbeton zu verhindern.

Die Verbesserung des Korrosionsschutzes an Kupplungsstellen ist ebenfalls von grosser Bedeutung. Die Verklebung des Schrumpfschlauchs mit dem Hüllrohr erfordert einen trockenen und sauberen Untergrund. Zudem sollte der Einsatz von Schmelzbändern unter dem Schrumpfschlauch gefordert werden.

Eine Erhöhung der Überdeckungen vom Stahltragglied im Hüllrohr bei werkseitiger Injektion von 5 auf 10 mm ist zu prüfen, auch wenn dies eine Gewichtszunahme bewirkt. Um den Widerstand gegen chemischen Angriff und Auslaugen zu erhöhen, kann eine Erhöhung der Dicke des Füllmörtels zwischen Hüllrohr und Bohrlochwand in der Schutzstufe 2a von aktuell 20 auf 25 bis 30 mm in Betracht gezogen werden.

Für die Eigenschaften von Füllgut und die Prüfmethode auf der Baustelle sollten klarere Vorgaben gemacht werden. Die Widerstandsmessungen zur Kontrolle der Dichtigkeit des Kunststoffhüllrohrs sollten weiterhin durchgeführt werden. In unproblematischen Böden (Kies- oder Grobsand-Gemische) könnte der Grenzwert von 100 auf 10 k Ω reduziert werden.

Mit der Einführung der Eurocodes 2. Generation stellt sich die Frage, wie die Anforderungen für den Korrosionsschutz von Bodennägeln und Mikropfählen in der Zukunft festgelegt werden sollten, z.B. über die nationalen Elemente (NE). Ebenso ist die Integration von Selbstbohrpfählen und gegebenenfalls weiteren Systemen in die Normen zu prüfen.

Zukünftiger Forschungsbedarf

Es ist zu untersuchen wie sich Korrosionsstellen bei Druckbelastung auf die Tragfähigkeit und Stabilität eines Pfahls auswirken, insbesondere bei langen Pfählen. Auch die Auswirkung von Auslaugung auf das Tragverhalten sollte genauer geklärt werden. In diesem Zusammenhang erachtet es die Forschungsstelle als sinnvoll, weiterführende Untersuchungen zum Auslaugverhalten von zementösen Systemen und auch von Beton durchzuführen und die Einführung einer neuen Auslaugprüfung zu diskutieren. Die Methoden für die Zustandserfassung und Überwachung von Bodennägeln und Mikropfählen müssen verbessert werden. Selbstbohrpfähle waren nicht Teil dieser Arbeit. Solche Systeme sollten hinsichtlich ihrer Dauerhaftigkeit ebenfalls genauer untersucht werden, da sie in der Praxis ebenfalls angewendet werden.

Résumé

Contexte et objectifs

L'utilisation de clous et de micropieux constitue dans de nombreux cas une solution économique, en particulier dans les espaces restreints où l'utilisation de grandes machines est difficile ou impossible. La protection contre la corrosion des ancrages sans précontrainte doit généralement correspondre au niveau de protection 2 selon la norme pour une utilisation à long terme. Des problèmes lors de l'exécution de l'injection et des résistances insuffisantes lors du contrôle de l'étanchéité des gaines conduisent souvent, dans la pratique, à des incertitudes quant à la durabilité de tels systèmes. Cela limite l'utilisation de micropieux malgré les avantages liés à leur construction.

Dans le cadre de ce projet de recherche, des essais en laboratoire ont été réalisés afin de déterminer dans quelles conditions il faut s'attendre à un risque accru de corrosion des tirants d'ancrage passives (clous) et des micropieux.

Méthode

Études sur le matériau d'injection

Cinq différents mélanges de matériaux d'injection ont été étudiés, dont un est disponible commercialement. Un mélange, composé d'un ciment composite Portland et de deux adjuvants avec un rapport e/cm < 0,4, est également utilisé pour l'injection d'éléments de précontrainte. Les propriétés du mortier frais telles que l'ouvrabilité, la formation d'eau de ressuage et la résistance à la ségrégation ont été testées sur les mélanges selon la norme SN EN 445. De plus, leur évolution de la résistance après 1, 3, 7 et 28 jours a été mesurée et diverses valeurs caractéristiques de la durabilité ont été déterminées. Un nouvel essai a été développé pour évaluer la résistance au lessivage par des eaux douces ou à l'attaque par dissolution chimique.

Essais de corrosion sur micropieux / clous

En laboratoire, des micropieux de niveau de protection 1, 2a et 2b ont été examinés sur le plan de la corrosion. Des sections de pieux ont été stockées dans de grandes boîtes remplies de sable pendant environ une année. Parallèlement, des essais d'exposition ont été réalisés dans des solutions de sol définies. L'influence de défauts d'exécution et de défauts de protection contre la corrosion, introduits artificiellement, sur la progression de la corrosion des éléments porteurs a été examinée.

Le matériau du sol dans les boîtes était un mélange de sable, connu sous le nom de « sable de Perth », qui a été imprégné de solutions de sol de différentes corrosivités. Un treillis d'armature en acier inoxydable a été placé à côté des sections de pieux pour simuler une armature de la fondation. Cette configuration a permis de mesurer et d'enregistrer directement le développement de la corrosion des éléments. Ensuite, les éléments ont été retirés du sol couche par couche et les attaques de corrosion ont été documentées en utilisant des images de section en coupe polie. Les essais de lessivage ont été réalisés dans des solutions de sol et à une vitesse accélérée dans une solution de nitrate d'ammonium 6 M.

Résultats et conclusions

Matériau d'injection

Les mélanges composés uniquement de ciment et d'eau, sans adjuvant, présentent un comportement défavorable en termes de formation d'eau de ressuage et de ségrégation. Le matériau de remplissage disponible dans le commerce et le matériau de remplissage pour la précontrainte présentent en revanche une bonne stabilité. Selon le type d'adjuvant, une énergie de mélange élevée est nécessaire pour l'activation, un mélangeur colloïdal, par exemple, convient bien à cette application. Dans la pratique, la mesure du temps

d'écoulement selon la norme SN EN 445 ne fonctionne de manière fiable qu'avec des rapports e/cm supérieurs à 0,5 ou en ajoutant un (super-)plastifiant. Les suspensions plus épaisses sont susceptibles d'obstruer l'entonnoir de forme conique.

La résistance et la densité apparente sont généralement bien corrélées avec le rapport e/cm . Les mélanges contenant des additifs pouzzolaniques et hydrauliques présentent encore une augmentation significative de la résistance à la compression entre 7 et 28 jours. La résistance à la compression exigée souvent, à savoir 25 MPa après 28 jours, est clairement atteinte par les mélanges avec $e/cm \leq 0,5$. En revanche, pour $e/cm \geq 0,6$, cette valeur est à peine atteinte ou seulement légèrement plus élevée.

Les méthodes selon la norme SIA 262/1 ont été utilisées pour tester les propriétés de durabilité. La résistance au gel en présence de sel de déverglaçage a été déterminée par l'essai « Résistance au gel - méthode rapide TFB ».

La résistance aux chlorures augmente avec la proportion d'additifs pouzzolaniques ou hydrauliques et diminue avec l'augmentation du rapport e/cm . On a pu constater une nette corrélation entre le rapport e/SiO_2 et le coefficient de diffusion des chlorures.

Si une résistance élevée au sulfate est demandée, elle ne peut être obtenue de manière sûre qu'avec l'utilisation de ciments à haute résistance au sulfate (ciments SR ou HS-CH) (voir le registre SIA des ciments autorisés).

La résistance à la carbonatation n'est certes pas déterminante pour l'exposition des mortiers d'injection, mais elle peut donner des indications sur la résistance au lessivage et à la résistance aux attaques chimiques. La résistance à la carbonatation a tendance à être plus basse qu'attendu, ce qui peut s'expliquer par la formation de fissures de retrait pendant le séchage des échantillons. Il existe un lien entre le rapport e/CaO et le coefficient de carbonatation.

Résistance aux sels de déverglaçage - Seul le mélange avec un rapport $e/cm < 0,5$ présente une résistance élevée, ce qui peut être attribué au faible volume des pores.

Lors des essais neufs de lessivage, il a été démontré que la vitesse de lessivage des mélanges de matériaux d'injection est environ 2,3 à 6 fois plus lente que la carbonatation. Néanmoins, le lessivage d'éléments en béton enterrés ou d'ancrages doit être pris en compte de manière plus précise à l'avenir dans le cas de longues durées d'utilisation et de liants à teneur réduite en clinker.

Essais de corrosion sur les éléments porteurs

Les différents essais de corrosion, réalisés en solution et dans des sols sableux, ont montré que les micropieux avec un niveau de protection 2a sont en principe bien protégés contre la corrosion à condition que le tube de protection en plastique reste intact. Les micropieux avec niveau de protection 2b (armature en acier inoxydable) ont également montré une bonne résistance à la corrosion, même dans un environnement corrosif.

En revanche, il faut s'attendre à une durabilité insuffisante en présence de défauts sur le tube de protection et d'un enrobage de l'armature manquant ou endommagé/lessivé. Selon la composition et l'humidité du sol, il faut s'attendre dans ce cas à des taux de corrosion entre 0,02 et 0,2 mm/an. Une augmentation de la perte de section par la corrosion avec l'augmentation de la corrosivité de la solution du sol s'est généralement confirmée. Lors des essais en solution, il est clairement apparu que les taux de corrosion au niveau des défauts de l'enrobage de mortier des micropieux avec un niveau de protection 1 sont plus élevés que ceux des pieux avec un niveau de protection 2a. Cela peut s'expliquer par le fait que l'acier passivé sous le produit de remplissage alcalin a un effet cathodique, ce qui entraîne la formation d'un macro-élément qui renforce l'attaque de la corrosion.

Le risque de corrosion est particulièrement élevé lorsque des micropieux insuffisamment protégés sont reliés électriquement à l'armature de fondations, de radiers, de murs de soutènement, etc. Cette formation de macroéléments externe accélère fortement l'érosion de

l'acier par rapport à la corrosion sans influence de l'armature (d'environ un ordre de grandeur). Dans un cas extrême, une progression de la corrosion de plus de 2 mm/an a été mesurée sur un micropieu avec un niveau de protection 2a. Il s'est avéré que l'attaque de la corrosion ne pouvant pas se propager latéralement en raison de la gaine isolante, progresse davantage en profondeur. Les raccords protégés par des gaines thermo rétractables constituent un point faible. Même en cas de petits défauts (perforations, fissures), l'humidité s'infiltre dans le raccord, ce qui déclenche des attaques de corrosion étendues sur l'élément porteur et le manchon. Sur la base des résultats de ce travail, des propositions concrètes ont été faites pour améliorer la protection contre la corrosion et les conséquences sur la normalisation ont été discutées.

Les résultats des essais de lessivage réalisés avec de petites éprouvettes Lollipop ont pu confirmer les résultats des essais d'exposition en solution. De plus, les essais ont montré que la composition et la qualité du produit d'injection n'ont pratiquement aucune influence sur la progression des dommages.

Recommandations et commentaires pour la normalisation

Dans la pratique, il faut absolument veiller à ce qu'il n'y ait pas de contact électrique entre l'armature de l'ancrage et l'armature de l'élément de construction ancré. Cette mesure doit être contrôlée par des mesures ou, au minimum, visuellement. L'OFROU exige d'ores et déjà l'installation de tubes de protection en tête de pieu afin d'éviter la formation de points faibles au niveau de la protection anticorrosion dans la transition entre le sol et le béton de construction.

L'amélioration de la protection contre la corrosion aux points de3 raccordement est également très importante. Le collage de la gaine thermorétractable sur le tube de gainage nécessite un support sec et propre. De plus, l'utilisation des bandes fusibles sous la gaine thermorétractable doit être exigée.

Une augmentation de 5 à 10 mm des recouvrements de l'élément porteur en acier dans le tube de gainage lors de l'injection en usine est à examiner, même si cela entraîne une augmentation de poids. Pour augmenter la résistance à l'attaque chimique et au lessivage, on peut envisager d'augmenter l'épaisseur du mortier d'injection entre le tube de gainage et la paroi du trou de forage au niveau de protection 2a, de 20 mm actuellement, à 25 ou 30 mm.

Des spécifications plus claires devraient être établies concernant les propriétés du matériau de remplissage et les méthodes de contrôle sur le chantier. Les mesures de résistance électrique pour le contrôle de l'étanchéité de l'enveloppe en plastique devraient continuer à être effectuées. Dans les sols non problématiques (mélanges de gravier ou de sable grossier), la valeur limite de résistance pourrait être réduite de 100 à 10 kΩ.

Avec l'introduction des Eurocodes 2ème génération, la question se pose de savoir comment les exigences pour la protection contre la corrosion des clous et des micropieux devraient être fixées à l'avenir, par exemple via les éléments nationaux. De même, l'intégration des pieux autoformant ainsi que des éventuels autres systèmes dans les normes doit être examinée.

Besoins supplémentaires de recherche

Il est nécessaire d'étudier l'impact des zones de corrosion sur la capacité portante et la stabilité d'un pieu en cas de charge de compression, en particulier pour les pieux longs. L'effet du lessivage sur le comportement structurel doit également être clarifié. Dans ce contexte, le centre de recherche estime qu'il serait judicieux de réaliser des études plus approfondies sur ce phénomène dans les systèmes à base de ciment ou de béton et de discuter de l'introduction d'un nouveau test de lessivage. Les méthodes de contrôle de l'état et de surveillance des clous et micropieux doivent être améliorées. Les pieux autoformant ont été exclus de ce travail. Ces systèmes devraient également être étudiés plus en détail en ce qui concerne leur durabilité, car ils sont également employés dans la pratique.

Summary

Initial situation and objectives

The use of soil nails and micropiles is, in many cases, an economical solution, especially in confined spaces where the use of large machines is difficult or impossible. The corrosion resistance of such non-tensioned anchors for long-term use must generally comply with protection level 2 in accordance to the standard. In practice, problems with grouting execution as well as insufficient electrical resistance when controlling the tightness of the encasing pipes often lead to uncertainties regarding the durability of such systems, which limits the use of micropiles despite their design-related advantages.

As part of this research project, laboratory tests were carried out to investigate the conditions under which an increased risk of corrosion can be expected from non-tensioned anchors (soil nails) and micropiles.

Approach

Tests on grouts

Five different grout mixtures were analysed, one of which is commercially available. A mixture of a Portland composite cement with two admixtures with $w/b < 0.4$ that is also used for the injection of prestressed tendons. Fresh mortar properties such as flowability, bleed water formation and segregation resistance were tested on the mixtures in accordance with standard SN EN 445. In addition, the strength development at 1, 3, 7 and 28 days was measured, and various durability parameters were determined. As a newly developed test, the resistance to leaching by soft water or chemically dissolving attack was analysed.

Corrosion tests on micropiles / soil nails

Under laboratory conditions, micropiles with protection levels 1, 2a and 2b were analysed with respect to corrosion. For this purpose, pile sections were stored in large, sand-filled boxes for around a year. At the same time, exposure tests were carried out in defined soil solutions. The influence of artificially introduced execution errors and defects in the corrosion protection on the corrosion progress of the structural members was tested.

The soil material in the boxes was a sand mixture known as 'Perth sand', which was soaked in soil solutions with varying degrees of corrosivity. In addition to the pile sections, a reinforcement mesh made of stainless steel was inserted (thus simulating foundation reinforcement). In this configuration, the corrosion progress on the load-bearing element could be measured and recorded directly. The load-bearing elements were then extracted layer by layer and the corrosion attacks on the sections were documented using micrographs. The leaching tests were carried out in soil solutions and in ammonium nitrate solution (6 M).

Results and conclusions

Grout

Mixtures consisting exclusively of cement and water without additives exhibit unfavourable behaviour with regard to bleeding and segregation. The commercially available grout and the grout for prestressing, on the other hand, exhibit good stability. Depending on the type of additive, a high mixing energy is required for activation, for which colloidal mixers, for example, are ideal. It is known from practical experience that measuring the flow time in accordance with SN EN 445 only works reliably with w/b values above 0.5 or by adding superplasticiser. More viscous suspensions may obstruct the conically shaped funnel.

The strength and bulk density generally correlate well with the w/b ratio. The mixtures with pozzolanic and hydraulic additives still show a significant increase in compressive strength between 7 and 28 days. The commonly required compressive strength of 25 MPa after 28

days is clearly achieved by the mixtures with $w/b \leq 0.5$. For $w/b \geq 0.6$, however, this value is just reached or only slightly exceeded.

To test the durability characteristics, the methods according to standard SIA 262/1 were applied. The frost de-icing salt resistance was determined using the TFB rapid frost resistance test.

The chloride resistance increases with an increasing proportion of pozzolanic or hydraulic additives and decreases with an increasing w/b value. A clear correlation was found between the w/SiO_2 content and the chloride diffusion coefficient.

If a high sulphate resistance is required, this can only be achieved reliably by using cements with a high sulphate resistance (SR or HS-CH cements) (see SIA register of approved cements).

Although the carbonation resistance is hardly a relevant factor for the exposure of injection mortars, it can provide information on the leaching resistance or the resistance to chemical attack. The carbonation resistance tended to be lower than expected, which can be explained by shrinkage cracking during the drying of the samples. There is a correlation between w/CaO and carbonation coefficient.

Freeze-thaw and de-icing resistance - Only the mixture with $w/b < 0.5$ shows a high resistance, which can be attributed to the low pore volume.

The novel leaching tests showed that the leaching rate of grout mixtures progresses around 2.3 to 6 times slower than carbonation. Nevertheless, the leaching of buried concrete components or anchors with long service lives and binders with a reduced clinker content must be considered more closely in future.

Corrosion tests on anchor steel bars

The various corrosion tests in soil solution and sandy soils have shown that micropiles with protection level 2a are generally well protected against corrosion as long as the plastic sleeve is intact. Micropiles with protection level 2b (load-bearing element made of stainless steel) have shown good corrosion resistance even in corrosive environments.

In contrast, insufficient durability is to be expected if there are defects in the plastic sleeve and a missing or damaged/leached grout covering of the load-bearing element. Depending on the composition and moisture of the soil, corrosion rates between 0.02 and 0.2 mm/year must be expected in this case. An increase in corrosion erosion with increasing corrosiveness of the soil solution has been confirmed. The solution tests clearly showed that the corrosion rates at defects in the mortar coating of micropiles with protection level 1 are higher than for piles with protection level 2a. This can be explained as due to the fact that the steel passivated under the alkaline filling material has a cathodic effect, which results in the formation of a macroelement with the active defect and increases the corrosion attack.

There is a particularly high risk of corrosion if insufficiently protected micropiles are electrically connected to the reinforcement of foundations, floor slabs, retaining walls, etc. Due to the formation of external macro elements, steel erosion is greatly accelerated compared to corrosion without the influence of the reinforcement (by approximately one order of magnitude). In extreme cases, corrosion progress of more than 2 mm/year was measured in load-bearing elements with protection level 2a. It was found that the corrosion attack cannot spread laterally due to the insulating sleeve and therefore progresses more in depth. Couplings that are protected with shrink sleeves are a weak point. Even small defects (perforations, cracks) allow moisture to penetrate into the assembly, which triggers extensive corrosion attacks on the load-bearing element and the coupling element. Based on the results of this work, concrete proposals were made for improving corrosion protection and the effects on standardisation were discussed.

The results of the tests with small lollipop test specimens confirmed the results of the exposure tests. The tests also showed that the composition and quality of the grout had practically no influence on the damage progression.

Recommendations and comments for standardization

In practice, it is essential to ensure that there is no electrical contact between the supporting element of the anchorage and the reinforcement of the anchored component. This requirement must be monitored by measurement and, as a minimum, visually.

FEDRO already requires the installation of pile head protection pipes to prevent the formation of weak points in the corrosion protection at the transition from the ground to the concrete structure.

Improving corrosion protection at coupling points is also very important. Bonding the shrink sleeve to the cladding tube requires a dry and clean substrate. In addition, the use of fusion tape under the shrink sleeve should be required.

An increase in the coverage of the steel load-bearing element in the sleeve during factory injection from 5 to 10 mm should be examined, even if this results in an increase in weight. In order to increase resistance to chemical attack and leaching, an increase in the thickness of the grout between the sleeve and the borehole wall for protection level 2a from the current 20 to 25 or 30 mm can be considered.

Clearer specifications should be made for the characteristics of the filling material and the on-site testing methods. The electrical resistance measurements to check the tightness of the plastic sleeve should continue to be carried out. In unproblematic soils (gravel or coarse sand mixtures), the limit value could be reduced from 100 to 10 k Ω .

With the introduction of the 2nd generation Eurocodes, the question arises as to how the requirements for the corrosion protection of soil nails and micropiles should be defined in the future, such as via the national annexes. The integration of self-drilling piles and possibly other systems into the standards should also be examined.

Future research needs

It is necessary to investigate how corrosion zones affect the load-bearing capacity and stability of a pile under compressive load, particularly in the case of elongated piles. The effect of leaching on the load-bearing behaviour should also be clarified in more detail. In this context, the research body considers it useful to carry out further investigations into the leaching behaviour of cementitious systems and concrete and to discuss the introduction of a new leaching test. The methods for evaluating and monitoring the condition of soil nails and micropiles must be improved. Self-drilling piles were not part of this work. Such systems should also be analysed in more detail with regard to their durability, as they are equally used in practice.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die Anwendung von ungespannten Ankern und Foundationen mit Mikropfählen gemäss Norm EN 14199 [12] stellt in vielen Situationen eine wirtschaftliche Lösung dar. Insbesondere bei engen Platzverhältnissen, wo der Einsatz von grossen Maschinen erschwert oder unmöglich ist, kann der Einsatz von Mikropfählen manchmal die einzige Lösung sein. Die in der Schweiz eingesetzten Mikropfahlsysteme stammen mehrheitlich von Schweizer Herstellern. Für ausländische Systeme existieren in verschiedenen europäischen Ländern Zulassungsverfahren, im Rahmen derer auch Aspekte der Dauerhaftigkeit und des Korrosionsschutzes geprüft werden. Eine Zulassung eines Systems erstreckt sich in der Regel über sämtliche Detailausbildungen und beinhaltet auch die Vorgaben für die Ausführung.

Auf Zug und Querbeanspruchung belastete Mikropfähle eines Pfahlbocks müssen gemäss Norm SIA 267 [17], in Abhängigkeit ihrer Korrosionsgefährdung im Boden, meist die Schutzstufe 2 erreichen. Dies wird dadurch erzielt, indem der Stahl durch ein PE-Hüllrohr und eine werkseitige Vorinjektion geschützt wird (Schutzstufe 2a). Alternativ dazu besteht die Möglichkeit, nichtrostenden Stahl zu verwenden und diesen mit einer Zementinjektion von mindestens 20 mm Dicke zwischen Bohrloch und Stahl zu schützen (Schutzstufe 2b). Der Einsatz von Mikropfählen der Schutzstufe 2a ist in der Schweiz weit verbreitet.

Bei grösseren Pfahllängen werden die Mikropfähle gekoppelt, wobei die Kupplungsstelle mittels Schrumpfschlauch vor äusseren Einwirkungen und Korrosion geschützt wird. Dadurch genügt der Korrosionsschutz solcher Kupplungen in der Regel den Vorgaben der Norm SIA 267 [17] nicht, da keine zementöse Umhüllung vorhanden ist. Bis heute ist der Forschungsstelle kein Verfahren zur separaten Injektion von Kupplungsstellen bekannt. Weiter treten vor oder während dem Einbau der Mikropfähle oftmals Beschädigungen des PE-Hüllrohrs auf, was zur Folge hat, dass der normativ geforderte messbare elektrische Widerstand des Mikropfahls nicht eingehalten werden kann, was wiederum zu einer Klassierung des Mikropfahls in der Schutzstufe 1 führt. Diese Umstände verursachen verständlicherweise grosse Unsicherheiten und Vorbehalte bezüglich des Einsatzes solcher Mikropfahlsysteme als permanente Bauteile.

Zum heutigen Zeitpunkt ist nicht hinreichend geklärt, wie stark das Korrosionsrisiko durch Fehlstellen am Hüllrohr oder die fehlende Injektion in den Kupplungsstellen gegenüber einer normgemässen Konstruktion erhöht wird. Es ist deshalb fraglich, ob Systeme, die über eine Zulassung in einem benachbarten europäischen Land verfügen, tatsächlich ein erhöhtes Korrosionsrisiko aufweisen und daher die Bedingungen für die Schutzstufe 2a nicht erfüllen können.

Weitere Fragen ergeben sich aus dem Umstand, dass die Injektionen für die Verfüllung des Bohrlochs und zur Herstellung des Verbunds mit dem Baugrund kaum normiert sind und, je nach Art des Füllguts, keine produktspezifischen Prüfverfahren vorhanden sind. Dies erschwert eine adäquate Ausschreibung und birgt die Gefahr, dass falsche oder ungeeignete Injektionsmittel zur Anwendung kommen, oder die gewünschten Eigenschaften auf der Baustelle nicht erreicht werden können (z.B. infolge ungeeigneter Mischer). Bei Selbstbohrankern, wo der Baugrund mit dem Injektionsgut vermischt wird, muss unter Umständen mit einer Gefährdung durch AAR gerechnet werden. Je nach geologischen Eigenschaften des Baugrunds kann dies auch bei Injektionsmitteln der Fall sein, die allein betrachtet nicht reaktiv sind. Weiter können Schädigungen der Injektion auch in sulfathaltigen Böden auftreten, wenn das Injektionsgut nicht sulfatbeständig ist.

Die geforderten Prüfungen am Injektionsgut gemäss der EN 445 [8] sind zur Qualitätssicherung eventuell nur bedingt geeignet, da sie für die Prüfung des Injektionsguts von Spanngliedern und gespannten Ankern etabliert wurden. Die an das Injektionsgut von Mikropfählen zu fordernden Eigenschaften können deutlich von den Eigenschaften des Injek-

tionsguts für Vorspannglieder abweichen, womit die heute geforderten Prüfungen womöglich nicht aussagekräftig sind. Dies ist sehr wahrscheinlich auch der Grund, weshalb in der Baupraxis kaum Prüfungen am Injektionsgut durchgeführt werden. Auf die Eigenschaften des Injektionsmittels abgestimmte Prüfungen könnten dazu dienen, die diesbezügliche Qualitätssicherung wesentlich zu verbessern [29].

Die beschriebenen Unsicherheiten haben dazu geführt, dass verschiedene Bauherren den Einsatz von Mikropfählen restriktiv einschränken und teilweise Verbote für gewisse Einsatzgebiete aussprechen. Dies, obwohl der Einsatz von Mikropfählen dank der für die Herstellung eingesetzten kleinen Gerätschaften grosse bautechnische Vorteile bietet. Die nachfolgend aufgeführten Forschungsarbeiten hatten zum Ziel, diese Unsicherheiten auszuräumen und die Qualitätssicherung zu verbessern, damit eine zuverlässigere Anwendung von Mikropfahl-Systemen ermöglicht wird.

Der Forschungsbereich Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB) der Forschung im Strassenwesen des ASTRA hat sich aus diesen Gründen zum Ziel gesetzt, die festgestellten Wissenslücken im Rahmen von drei Forschungsschwerpunkten zu schliessen:

«**Sachstandsbericht zur Dauerhaftigkeit von Mikropfählen und permanenten ungespannten Ankern**», AGB 2018/004, Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz (SGK), Dr. Vollenweider AG [23]

«**Zustandserfassung von bestehenden Mikropfählen und permanenten ungespannten Ankern**», AGB 2019/004, Hochschule Luzern, ETH Zürich, Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz (SGK), Emch & Berger AG, Ing. Pedrozzi & Associati SA [22]

«**Laborversuche zur Korrosionsbeständigkeit von Mikropfählen und permanenten ungespannten Ankern (Bodennägel)**», AGB 2019/002, TFB AG, Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz (SGK)

1.2 Zielsetzung des Forschungsprojekts

Es galt im Rahmen dieses Projektes primär die Frage zu beantworten, ob es bei ungespannten Ankern und Mikropfählen überhaupt ein relevantes Korrosionsproblem gibt und falls dies zutrifft, unter welchen Bedingungen mit einem erhöhten Korrosionsrisiko gerechnet werden muss. Dies ist aus heutiger Sicht noch nicht ausreichend geklärt.

Ziel dieser Forschungsarbeit war die Untersuchung des Korrosionsverhaltens von Mikropfählen und permanenten ungespannten Ankern der Schutzstufen 1 und 2a/b gemäss Norm SIA 267 [17] unter Laborbedingungen, respektive von aus heutiger Sicht als kritisch erachteten, konstruktiven Details solcher Systeme. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit waren mehrere Laborversuche durchzuführen, um die Korrosionsgeschwindigkeit unter realitätsnahen, wohldefinierten Bedingungen zu quantifizieren. Konkret sollten diese Versuche eine grobe Abschätzung der in ungünstigen Fällen möglichen maximalen Korrosionsraten erlauben (Worst-Case-Szenario).

Eine ebenfalls zu untersuchende Schwachstelle war die Kupplung von Mikropfählen. Die Kupplungsbereiche üblicher Mikropfahl-Systeme erfüllen bei Anwendung als permanente ungespannte Anker (Zugpfahl) die Normanforderungen hinsichtlich Korrosionsschutz (gemäss Norm SIA 267 [17], Ziffern 9.6.6.7 und 11.6.3) oft nicht, weil in den Kupplungsbereichen in der Regel eine Zementumhüllung des Zuggliedes fehlt und gegebenenfalls auch ein genügendes aussenliegendes Hüllrohr.

Weitere Schwachstellen, die bei den Laborversuchen zu berücksichtigen waren, sind nachfolgend aufgeführt:

- Defektstellen am Schrumpfschlauch bei Kupplungen, z.B. Risse im Schrumpfschlauch, abgelöste und unterläufige Schrumpfschläuche;
- Unvollständige Umhüllung der Pfähle (Fehl-/Hohlstellen);
- Exzentrischer Einbau des Tragglieds;
- Risse/lokale Zerstörung des inneren und äusseren Verpressmörtels;
- Unterschiedliche Korrosivität des Bodens, Variation des Wassergehalts im Boden;
- Korrosionsgefährdung infolge Makroelementbildung (elektrische Verbindung zwischen Mikropfahl und einer Fundamentbewehrung);
- Auslaugung des zementösen Korrosionsschutzes.

Nicht untersucht wurde der Korrosionsschutz von Selbstbohrpfählen und Permanent Systemen wie z.B. das in der Schweiz bekannte KÜPS ® [41].

2 Korrosionsschutz von ungespannten Ankern und Mikropfählen in der Schweiz

In der Schweiz sind die Verankerungen mit ungespannten Ankern in der Norm SIA 267 «Geotechnik» geregelt [17]. Ein ungespannter Anker ist ein Anker, der primär Zugkräfte in den Baugrund überträgt. Beim ungespannten Anker werden keine oder nur eine geringe Spannkraft aufgebracht (Abb. 1). Bei einem Mikropfahl handelt es sich per Definition um einen Bohrpfahl mit Durchmesser ≤ 300 mm mit Stab- oder Stahlrohrbewehrung und Pfahlmantelinjektion mit Mörtel oder Zementstein sowie eventuellen Nachinjektionen [17]. Ein Mikropfahl kann Druck-/Zug- oder kombinierten Beanspruchungen ausgesetzt sein. In der europäischen und auch in der Schweiz gültigen Norm SN EN 14199 «Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau – Mikropfähle» sind die Grundlagen für die Herstellung von Mikropfählen festgehalten [12]. Im Sinne einer Vereinfachung wird nachfolgend hauptsächlich der Begriff Mikropfahl verwendet.

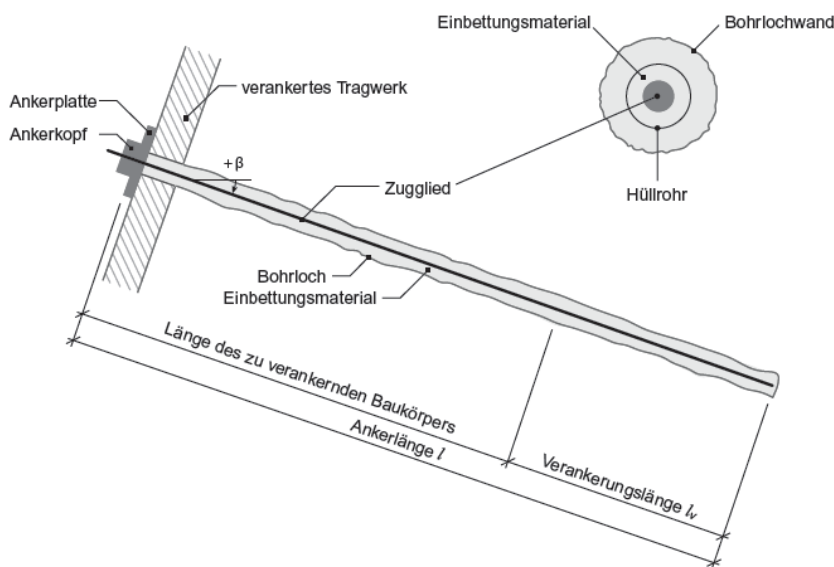


Abb. 1 Begriffserklärungen für ungespannte Anker [17].

2.1 Anforderungen an den Korrosionsschutz

Die Anforderungen an den Korrosionsschutz von ungespannten Ankern und Mikropfählen sind in der Norm SIA 267 [17] erläutert. Gemäss Ziffer 9.6.6.7 gelten für auf Zug beanspruchte Mikropfähle für den Korrosionsschutz die Anforderungen an ungespannte Anker gemäss den Ziffern 11.6.3 und 11.7.5.

Zur Festlegung der erforderlichen Korrosionsschutzmassnahmen für ungespannte Anker und Mikropfähle kommen gemäss Tab. 6 in [17] vier Schutzstufen zur Anwendung, die von der geplanten Nutzungsdauer (temporär ≤ 5 Jahre, permanent > 5 Jahre), der Bauwerksklasse gemäss Norm SIA 261 «Einwirkungen auf Tragwerke» [18] und der generellen Korrosionsgefährdung (Bodenart, Vorhandensein von Schadstoffen, Streuströmen oder Altlasten) abhängig sind. Auf die Schutzstufe 0 (keine besonderen Massnahmen) wird nicht näher eingegangen, da sie nur bei temporären Mikropfählen von Bedeutung ist.

Im Fall einer Nutzungsdauer > 5 Jahre kommt die Schutzstufe 1 (Abb. 2) bei den Bauwerksklassen I und II zum Tragen, sofern mit keiner speziellen Korrosionsgefährdung zu rechnen ist. Der Bauwerksklasse I können z.B. Wohn-, Büro-, Gewerbe- und Industriegebäude oder Parkgaragen zugeordnet werden. Zur Bauwerksklasse II gehören grössere Gebäude/öffentliche Gebäude, wichtige Kunstbauten oder Infrastrukturobjekte.

Bei langen Nutzungsdauern und allen Bauwerksklassen kommt in den meisten Fällen die Schutzstufe 2, seltener die Schutzstufe 3 zur Anwendung, da der Nachweis einer geringen Korrosionsgefährdung in der Praxis oft schwierig ist und bereits bei inhomogenem Bodenaufbau kaum zutrifft.

Die Schutzstufe 2 wird in die Kategorien 2a und 2b (entsprechend Kat. 3a und 3b für die Schutzstufe 3) unterteilt. Bei der Schutzstufe 2a wird das Tragglied durch ein PE-Hüllrohr und eine werkseitige Vorinjektion von mindestens 5 mm Stärke geschützt. Dazu kommt eine äussere, mindestens 20 mm dicke Mörtelschicht zwischen Hüllrohr und Bohrlochwand. Alternativ dazu besteht die Möglichkeit, nichtrostenden Stahl der Korrosionswiderstandsklasse 1 (KWK 1 gemäss Merkblatt SIA 2029 [15]) oder höher zu verwenden und diesen mit einer Zementinjektion von 20 mm Dicke zwischen Bohrloch und Stahl zu schützen (Schutzstufe 2b). In diesem Fall kann auf ein Kunststoffhüllrohr verzichtet werden, was vom Aufbau her der Schutzstufe 1 entspricht. Die Schutzstufen 2b und 3b dürfen nicht angewendet werden, falls eine kritische Streustromgefährdung vorliegt bzw. zu erwarten ist. Ein Bewehrungsstahl, der in der Schweiz für Mikropfähle zunehmend eingesetzt wird, ist Top12 der Steeltec AG, Emmenbrücke. Es handelt sich dabei um einen Chromstahl der KWK 1 [15].

Bei grösseren Pfahllängen werden die Mikropfähle häufig gekoppelt. Dies ist beispielsweise auf Baustellen der SBB üblich, damit die Pfähle oder Geräte zum Versetzen der Mikropfähle nicht mit der Fahrleitung in Kontakt kommen. Für Kupplungen gelten gemäss Ziffer 11.6.3.4.2 der SIA 267 die gleichen Anforderungen bezüglich Zementmörtel zwischen Zugglied und Bohrlochwand bzw. zwischen Zugglied und Hüllrohr wie für die Zugglieder. In der Praxis ist dies jedoch selten der Fall, da die Kupplungsstellen nicht separat injiziert werden. Der Hüllrohrstoss wird normalerweise auf der Baustelle mit einem aufgeflamten Schrumpfschlauch abgedichtet. Dadurch verbleibt in der Kupplungsstelle ein luftgefüllter Hohlraum, der aus Sicht der Dauerhaftigkeit prinzipiell eine Schwachstelle bildet. Beim Transport, Umschlag und bei der Lagerung auf der Baustelle sowie beim Einbau der Pfähle treten oftmals Beschädigungen des PE-Hüllrohrs auf. Dies hat zur Folge, dass die Dichtigkeit des Hüllrohrs örtlich reduziert ist, was je nach Grösse der Fehlstelle zu einer markanten Absenkung des elektrischen Widerstands des Mikropfahls führen kann. Dadurch sind die Anforderungen der Schutzstufe 2 nicht mehr eingehalten, was in vielen Fällen zu einer Herabstufung des Korrosionsschutzes, z.B. in die Schutzstufe 1 oder sogar 0 (direkter Kontakt des Tragglieds mit dem Boden), führt. Jedoch stellt sich die Frage, inwieweit und unter welchen Bedingungen die Korrosionsgefährdung infolge Fehlstellen am Hüllrohr oder fehlende Injektion in den Kupplungsstellen tatsächlich erhöht wird.

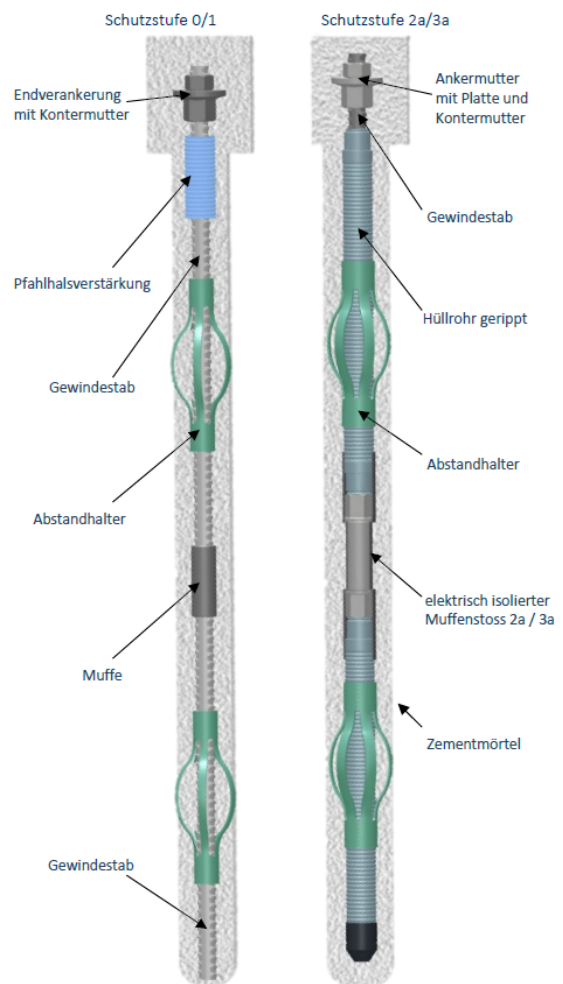


Abb. 2 Mikropfähle mit Schutzstufe 0 / 1 / 2b (links) und 2a / 3a (rechts) [55].

Abb. 3 zeigt die Mikropfähle mit der Schutzstufe 2a sowie den Schutzstufen 1 und 2b im Querschnitt. Bei der Schutzstufe 1 / 2b wird der Mikropfahl in ein Bohrloch versetzt und anschliessend mit Füllgut verpresst. Je nach Bodenbeschaffenheit erfolgt die Bohrung verrohrt, teilverrohrt oder unverrohrt (nur bei standfestem Boden oder Fels). Zur Zentrierung des Stahltragglieds werden längsgeschlitzte Kunststoff-Abstandhalter (Federkorbbidistanzhalter) um den Stab befestigt, die sich dank ihrer Flexibilität dem Bohrloch bis zu einem gewissen Grad anpassen können. Solche Abstandhalter werden auch bei der Schutzstufe 2a (3a) eingesetzt. Bei einer werkseitigen Vorinjektion wird die Zentrierung der Stäbe mit Hilfe einer PE-Schnur, die längs um das Tragglied gewickelt wird, sichergestellt. An allen Stellen, wo die Schnur am Hüllrohr anliegt, fehlt der zementöse Schutz.

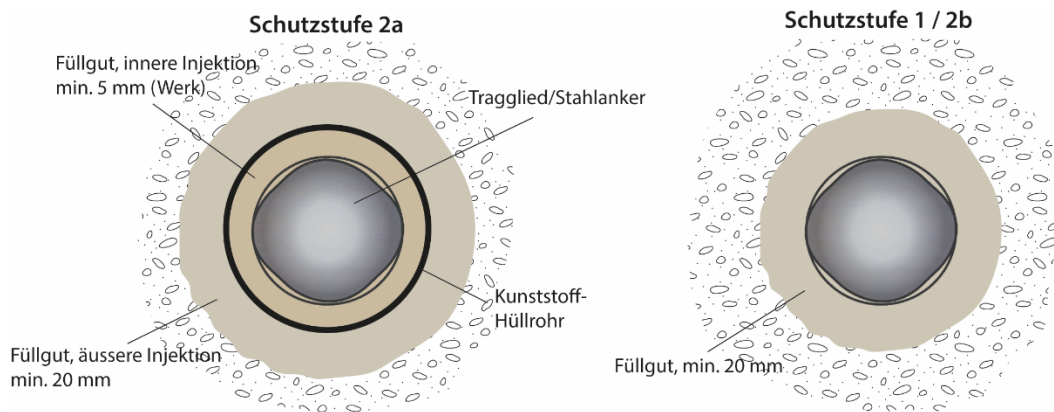


Abb. 3 Mikropfähle mit Schutzstufe 2a, 1 und 2b.

Gemäss [17] sind weder Anstriche noch Beschichtungen als Korrosionsschutz erlaubt. Dies wird damit begründet, dass Kunststoffbeschichtungen bei der Handhabung und beim Einbau der Mikropfähle beschädigt werden können. Ebenfalls nicht zugelassen sind Verzinkungen als Korrosionsschutz, da Zink in feuchter alkalischer Umgebung korrodiert. Die Anwendung eines «Korrosionszuschlags» durch Verwendung überdimensionierter Querschnitte ist nicht erlaubt. Laut Norm machen lokale Korrosion (Lochfrass) und Verbundschwächung infolge Rostbildung den Korrosionszuschlag wirkungslos. In der Norm ist weiter beschrieben, dass das Hüllrohr bei der Schutzstufe 2a und 3a mindestens 100 mm in den Tragwerksbeton hineinzuführen ist. Dadurch soll vermieden werden, dass der blanke Bewehrungsstahl in die Sauberkeitsschicht oder den Magerbeton zu liegen kommt, wo er nicht ausreichend gegen Korrosion geschützt ist. Zudem ist bei Mikropfählen mit langer Nutzungsdauer der gesamte Kopfbereich durch eine allseitig mindestens 50 mm starke Betonschicht oder gleichwertige Massnahmen gegen Korrosion zu schützen. Um eine Gefährdung durch Makroelementbildung zu verhindern, dürfen Stahlstab und -platte nicht in Kontakt mit der Tragwerksbewehrung stehen.

2.2 Selbstbohranker

Im Gegensatz zu Pfählen mit Schutzstufe 2a, die mittels verrohrter Bohrung versetzt werden, kommen häufig auch sogenannte Selbstbohranker zum Einsatz. Bei Selbstbohrpfählen besteht das Tragglied aus einem gerippten Rundstahl mit einer zentralen Hohlbohrung (Hohlstab) und einer Bohrkrone an der Spitze. Dieses Tragglied wird mit einer Drehschlagvorrichtung in den Baugrund getrieben, während gleichzeitig durch das zentrale Loch zementöses Füllgut eingepresst wird, das unmittelbar hinter dem Bohrkopf austritt. Der bei der Bohrung entstehende Ringraum wird somit laufend durch das Injektionsgut verfüllt. In günstigen Baugrundverhältnissen kann bei fachgerechter Ausführung eine durchgehende Umhüllung des Traggliedes mit Injektionsgut erreicht werden (Abb. 4). Bei ungünstigen Baugrundverhältnissen kann zwar eine gute Durchmischung des Baugrundes mit Injektionsgut im Bereich des Ringraumes und damit in der Regel eine gute Tragfähigkeit erreicht werden, eine durchgehende Umhüllung des Traggliedes mit reinem Injektionsgut hingegen ist jedoch nicht gesichert.



Abb. 4 Ausgrabung von Selbstbohrankern in einer Kiesgrube (Bild Y. Schiegg).

Selbstbohrpfahlsysteme werden von verschiedenen Firmen unter einem patentierten Markennamen angeboten (z.B. TITAN der FRIEDR. ISCHEBECK GmbH, KSB® und KÜPS® der Küchler Technik AG). Der Einbau der Pfähle erfolgt aber nicht in jedem Fall durch den Hersteller, sondern kann auch durch eine spezialisierte Bohrunternehmung ausgeführt werden. Normale Selbstbohrpfähle erreichen im günstigen Fall die Schutzstufe 1. Um den Korrosionsschutz zu verbessern, werden häufig sogenannte duplexierte Selbstbohrpfähle (Feuerverzinkung plus Epoxidharzbeschichtung) oder Tragglieder aus nichtrostendem Stahl eingesetzt. Abb. 5 zeigt das Selbstbohr-System KÜPS® der Küchler Technik AG, welches aus Zugglied und metallischem Hüllrohr besteht.

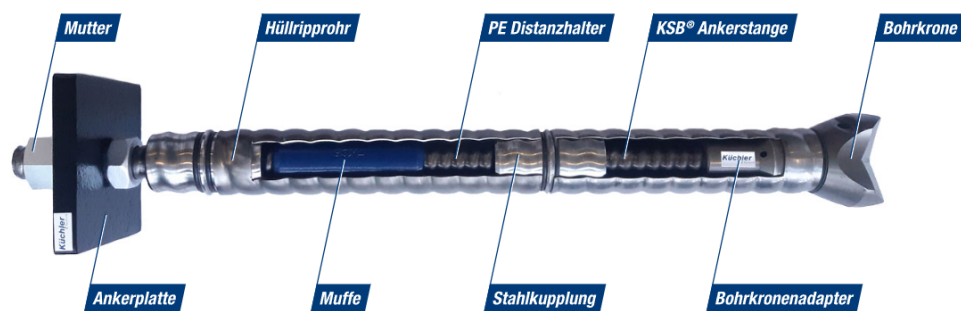


Abb. 5 KÜPS® - Selbstbohranker der Küchler Technik AG mit Zugglied und Hüllrohr [41].

3 Korrosionsgefährdung von Mikropfählen

Nach den heutigen Kenntnissen der Forschungsstelle gibt es nur wenige dokumentierte Schadenfälle, wo es erdbodenseitig zu erheblichen Korrosionsproblemen an ungespannten Ankern gekommen ist, insbesondere für neuere Systeme, wie sie in der Schweiz angewendet werden. In [59] wird auf das Problem galvanischer Korrosion in inhomogenen Böden und den Einfluss von Streuströmen eingegangen, was anhand von Ausgrabungen auch gezeigt werden konnte. Die Freilegung oder das Ausziehen von Verankerungen ist in der Regel aufwendig und muss aus Sicherheitsgründen sorgfältig geplant und ausgeführt werden. Gravierende Korrosion an Nägeln und Verankerungen kennt man auch von Minen (Australien, Afrika), in denen Erze oder Edelsteine abgebaut werden [35]. Die Bedingungen in solchen Minen können aus Sicht der Dauerhaftigkeit sehr ungünstig sein (aggressive Wässer, hohe Temperaturen). Es existieren noch weitere Beispiele von Ausgrabungen, wo bei fachgerechter Umhüllung des Tragglieds mit Zementmörtel hingegen keine Korrosionsschäden festgestellt wurden.

Eine besonders häufig referenzierte Arbeit über Korrosion in Böden stammt von M. Romanoff [51]. Sie dokumentiert mehrjährige Studien zu eingegrabenen Pfahlkonstruktionen in unterschiedlichen Böden. Vor allem die aus korrosionstechnischer Sicht detaillierte Charakterisierung der Böden kann für die Konzeption von Labor- und Feldversuchen sehr nützlich sein. In eine ähnliche Richtung gehen die Arbeiten von Escalante [28].

Dass Fehlstellen in der Umhüllung, insbesondere an den Kunststoffhüllrohren auftreten, zeigen eigene Erfahrungen aus der Praxis (Abb. 6).



Abb. 6 Ausgrabung /Mängel an Kunststoffhüllrohren: Oben links: Abgescherter Injektionsstutzen. Oben rechts: Undichter Hüllrohrstoss. Unten rechts: Defektstellen infolge mechanischer Einwirkungen (Fotos: Y. Schiegg).

Solche Schäden an im Werk vorgefertigten Mikropfählen können beispielsweise während dem Transport, beim Ablad, durch unsachgemässe Lagerung oder beim Umschlag auf der Baustelle entstehen. Ebenfalls bekannt sind übermässige Durchbiegungen beim einseitigen Anheben von langen Pfählen, was zu Beschädigungen an den Hüllrohren oder zu Rissbildungen der innerhalb des Hüllrohrs vorhandenen Zementsteinumhüllung führen

kann. Für das Aufrichten von langen Pfählen müssen Hilfskonstruktionen (z.B. U-Profile aus Stahl) verwendet werden. Ob solche Defekte für die Dauerhaftigkeit langfristig kritisch sind, hängt von verschiedenen Faktoren, u.a. von der Qualität der äusseren Bohrlochverfüllung, ab. In jedem dieser Fälle kann jedoch die Undichtigkeit des Hüllrohrs mit der Widerstandsmessung / gemäss [17] nachgewiesen werden.

3.1 Korrosion von Stahl im Erdboden und Betonkorrosion

3.1.1 Korrosion von Stahl im Erdboden

Die Begriffe und grundlegenden Zusammenhänge von Korrosionsprozessen metallischer Werkstoffe in unterschiedlichen Umgebungen sind in [23] ausführlich zusammengestellt. Aus diesem Grund werden im Folgenden nur die für Verankerungen im Erdboden massgebenden Prozesse erläutert.

Die Korrosion von Stahl in Kontakt mit dem Erdboden ist ein elektrochemischer Prozess, der als Redoxreaktion bezeichnet wird. Diese entsteht, wenn der Boden Feuchtigkeit (wässriger Elektrolyt) und Sauerstoff enthält. Als eigentliche Korrosionsreaktion (anodische Teilreaktion) findet die Stahl- bzw. Eisenauflösung gemäss Gl. (1) statt. Dabei werden Eisenionen aus dem metallischen Gefüge herausgelöst, die anschliessend als im Wasser gelöste Fe^{2+} -Ionen vorliegen.



In den meisten Böden wirkt der gelöste Sauerstoff (O_2) als Angriffsmittel. Dieser reagiert an der Stahloberfläche mit den überschüssigen Elektronen aus der anodischen Teilreaktion, was gemäss Gl. (2) als Sauerstoffreduktion bzw. kathodische Teilreaktion bezeichnet wird.



Die bei der kathodischen Reaktion entstehenden Hydroxidionen führen grundsätzlich zu einer Erhöhung des pH-Werts vom Boden im Nahbereich der Stahloberfläche. Jedoch verbinden sich die positiv geladenen Eisenionen mit den negativ geladenen OH^- -Ionen zu $Fe(OH)_2$, was gemeinhin als Rostbildung bekannt ist und einen kontinuierlichen Anstieg des pH-Werts verhindert. Der im Boden gelöste Sauerstoff hat ein Gleichgewichtspotenzial von $+0.5 V_{CSE}$. Für Stahl beträgt das Gleichgewichtspotenzial $-1.0 V_{CSE}$. Daraus resultiert eine Potenzialdifferenz von 1.5 V, die als treibende Kraft den Korrosionsprozess verursacht. Es kann davon ausgegangen werden, dass in natürlichen Böden meistens genügend Sauerstoff für die Korrosionsreaktion vorhanden ist [48].

Je nach Ausprägung der Korrosion kann es an der Korrosionsstelle auch zu Reaktionen der Eisenionen mit dem Wasser kommen, was gemäss Gl. (3) als Hydrolyse bezeichnet wird und zu einer Ansäuerung der Korrosionsstelle führt. Ein Teil des H_3O^+ wird zu gasförmigen H_2 (Wasserstoff) rekombiniert, kann jedoch auch in das metallische Gefüge einwandern, was bei hochfesten Stählen (gespannte Anker) Spannungsrisskorrosion auslösen kann.



Ist das Stahltragglied von zementösem Füllgut umgeben, kommt es analog zur Bewehrung im neuen Beton zur Passivierung der Stahloberfläche. Bei hohen pH-Werten als Folge der Hydratation des Zements kann die Metallauflösung durch die Bildung unlöslicher, fester Verbindungen (Eisenoxide) auf der Metalloberfläche vollständig gehemmt werden. Bilden diese Verbindungen eine festhaftende Schicht (Schutzfilm), so wird die Oberfläche passiviert und der Korrosionsvorgang praktisch gestoppt. Im passiven Bereich löst sich das Metall nur noch mit sehr kleiner Geschwindigkeit auf ($< 0.01 \text{ mm/Jahr}$). Der hohe pH-Wert kommt einerseits durch das beim Abbinden entstehende Calciumhydroxid $Ca(OH)_2$ und durch die alkalisch reagierenden Zementbestandteile Na_2O und K_2O zustande. Der pH-

Wert des Porenwassers ist daher abhängig von der Zusammensetzung des Zementes und von der Art der Zusatzstoffe (z.B. Kalkfiller, Flugasche, Silikastaub oder Hüttensand).

Die Stabilität des Passivfilmes kann hauptsächlich durch zwei Schadensmechanismen aufgehoben werden. Gelangt a) eine ausreichende Menge Chlorid (Bestandteil von Streusalz) durch das Porensystem des Zementsteins bis zur Stahloberfläche besteht eine Gefährdung für lokale Korrosion (Lochfrass) am Stahltragglied. Sinkt b) der pH-Wert der Porenlösung, z.B. infolge von Karbonatisierung des Zementsteins, kommt es zur Zerstörung des Passivfilmes und nachfolgender Korrosion des Bewehrungsstahles [50]. Chloride können beispielsweise von einer verkehrsreichen und im Winter mit Tausalz enteisten Strasse in ein verankertes Betonbauwerk eindringen und bei mangelhaft abgedichteten Mikropfählen Korrosion am Tragglied auslösen. Der Vollständigkeit halber ist auch noch die Beeinflussung durch Streuströme von Gleichstromanlagen zu erwähnen. Diese Gefährdung ist bei ungespannten Ankern und Mikropfählen in der Praxis nur selten von Bedeutung, da infolge der eher kurzen Ankerlängen eine unzulässige Beeinflussung durch Streuströme kaum auftritt.

3.1.2 Expositionsklassen, bezogen auf Böden und Grundwasser

Nebst den Korrosionsangriffen am Stahl sind diverse chemische Angriffe am Zementstein, welche die Überdeckung des Stahltragglieds schwächen und die nachfolgende Korrosion am Stahl begünstigen, zu beachten. Im Schlussentwurf des neuen Eurocodes 2. Generation EN 1992-1-1:2023 «Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1 1: Allgemeine Regeln und Regeln für Hochbauten, Brücken und Ingenieurbauwerke» [7] sind die Expositionsklassen bei chemischem Angriff durch natürliche Böden und Grundwasser gemäss Tab. 1 klassifiziert.

Tab. 1 Expositionsklassen bei chemischem Angriff, nach [7]

Expositionsklasse	Beschreibung der Umgebung
XA1	Chemisch schwach angreifende Umgebung
XA2	Chemisch mässig angreifende Umgebung
XA2	Chemisch stark angreifende Umgebung

Für den Fall Auslaugung, die in der Norm ebenfalls als chemischer Angriff geführt wird, gilt die Expositionsklasse XC2: «Betonoberflächen, die langem Wasserkontakt ausgesetzt oder dauerhaft in Wasser getaucht oder dauerhaft hoher Luftfeuchte ausgesetzt sind». Als Beispiele werden Gründungen und Wasserbehälterbauwerke angeführt. Weiter wird darauf hingewiesen, dass Auslaugung Korrosion verursachen könnte. In der Schweiz wird die Expositionsklasse XA(CH) gemäss der SN EN 206, NA.4.1 [62] in die zwei Unterklassen XA1s(CH) bis XA3s(CH) für den Angriff durch Sulfate und XA1c(CH) bis XA3c(CH) für lösenden Angriff aufgeteilt. Die Grenzwerte für die Expositionsklassen für chemischen Angriff durch natürliche Böden und Grundwasser sind in der Tab. 2 von [7] spezifiziert (Abb. 7).

Ist Bewehrungskorrosion infolge Anwesenheit von Chloriden zu erwarten, wird dies durch die Expositionsklassen XD1, *mässige Feuchte* (chloridhaltige Sprühnebel), XD2 *nass, selten trocken* (Schwimmbäder, chloridhaltige Industrieabwässer) und XD3 *wechselnd nass und trocken* (Brückenbauteile, Betonstrassen, Parkdecks) beschrieben [7]. Die Schweiz hat die Expositionsklasse XD2(CH) in zwei Unterklassen aufgeteilt, nämlich XD2a(CH) mit einem Chloridgehalt ≤ 0.5 g/l («Süsswasser», z.B. für übliche Schwimmbäder) und XD2b(CH) mit einem Chloridgehalt > 0.5 g/l («Salzwasser», zeitweise oder dauernd hohe Chloridgehalte, z.B. Solebäder).

Chemisches Merkmal	Referenz- prüfverfahren	XA1	XA2	XA3
Grundwasser				
SO ₄ ²⁻ [mg/l]	EN 196-2	≥ 200 und ≤ 600	> 600 und ≤ 3 000	> 3 000 und ≤ 6 000
pH	ISO 4316	≤ 6,5 und ≥ 5,5	< 5,5 und ≥ 4,5	< 4,5 und ≥ 4,0
CO ₂ [mg/l]	EN 13577	≥ 15 und ≤ 40	> 40 und ≤ 100	> 100 bis zur Sättigung
NH ₄ ⁺ [mg/l]	ISO 7150-1	≥ 15 und ≤ 30	> 30 und ≤ 60	> 60 und ≤ 100
Mg ²⁺ [mg/l]	EN ISO 7980	≥ 300 und ≤ 1 000	> 1 000 und ≤ 3 000	> 3 000 bis zur Sättigung
Boden				
SO ₄ ²⁻ [mg/kg] ^a gesamt	EN 196-2 ^b	≥ 2 000 und ≤ 3 000 ^c	> 3 000 ^c und ≤ 12 000	> 12 000 und ≤ 24 000
Säuregehalt nach Baumann-Gully [ml/kg]	EN 16502	> 200	in der Praxis nicht anzutreffen	
^a Tonböden mit einer Permeabilität unter 10 ⁻⁵ m/s dürfen in eine niedrigere Klasse eingestuft werden.				
^b Das Prüfverfahren schreibt die Extraktion von SO ₄ ²⁻ durch Salzsäure vor; alternativ darf Wasserextraktion angewendet werden, wenn am Verwendungsort des Betons entsprechende Erfahrungen vorliegen.				
^c Der Grenzwert 3 000 mg/kg sollte auf 2 000 mg/kg herabgesetzt werden, wenn ein Risiko der Ansammlung von Sulfationen im Beton infolge von Nass-Trocken-Zyklen oder kapillarer Saugkraft besteht.				

Abb. 7 Zusammensetzung von Böden und Grundwasser bei den Expositionsklassen XA1 bis XA3, aus [7].

3.1.3 Chemischer Angriff an zementösen Werkstoffen

Aus dem Boden können verschiedene Schadstoffe in die ca. 20 mm dicke Füllgut-Ummantelung (Schutzstufe 2a) einwandern. Im Fall von Beton gilt grundsätzlich, dass der Zementstein in der Regel chemisch weniger beständig ist als die deutlich dichtere Gesteinskörnung. Bei chemischem Angriff ist es wichtig zu unterscheiden, ob ein lösender oder treibender Schadensmechanismus vorliegt. Ein chemisch lösender Angriff (in der Literatur häufig als «Betonkorrosion» bezeichnet) kann durch die Einwirkung von Säuren, austauschfähigen Salzen, weichem Wasser oder starken Basen stattfinden [60, 61].

Bei erdvergrabenen Strukturen haben weiches Wasser > 7 °fH ein Lösen und Auslaugen der calciumhaltigen Phasen im Zementstein zur Folge. Ammonium-Salze mit ihrem NH₄⁺-Ion führen zu Austauschreaktionen mit Portlandit, wobei leicht lösliche Calciumsalze entstehen, die in den Boden wegdiffundieren. Der chemisch lösende Angriff erfolgt fortschreitend von der Betonoberfläche nach innen. Dabei werden Bestandteile des Zementsteins und ggf. der Gesteinskörnung durch die eindringenden Stoffe aufgelöst und anschliessend ausgelaugt. Der Angriffsgrad wird durch die Art, Konzentration und Menge der chemisch aggressiven Flüssigkeit und die Löslichkeit, d.h. Bedingungen für die Auslaugung der sich bildenden Salze im Beton bestimmt. Die Wirkung eines chemischen Angriffs ist umso stärker, je leichter die aggressive Flüssigkeit in den Beton eindringen kann. Der Schadenfortschritt hängt deshalb auch von der Porosität des Betons ab, welche das Eindringen der aggressiven Flüssigkeiten und das Auslaugen des Zementsteins bestimmt. Daneben wird der Angriffsgrad auch von der Temperatur und der Fliessgeschwindigkeit der angreifenden Lösung beeinflusst.

Sulfatangriffe auf den Zementstein sind komplexe Vorgänge, die sowohl chemische als auch physikalische Prozesse miteinander verbinden und die sowohl treibend als auch lösend wirken können. Bei einem externen Sulfatangriff durch eindringende Sulfatlösungen nimmt das Schadenausmass von der Oberfläche zum Betonkern hin ab bzw. hängt von der Eindringtiefe der aggressiven Sulfatlösung ab. Die von aussen in den Beton eindringenden Sulfatlösungen reagieren mit dem Zementstein und wirken durch Gips- und Etringitbildung treibend. Die Sprengwirkung der dabei entstehenden Sulfatkristalle führt zum

Absanden und Abblättern der Betonoberfläche, auf der weissliche bis gelbbraune Ausblühungen und Verfärbungen auftreten. Ein fortschreitender Sulfatschaden ist verbunden mit einer zunehmenden Rissbildung an der Betonoberfläche. Die Reaktionsfront kann mit der Zeit bis tief ins Innere des Betons führen. Das typische Rissbild besteht aus Netz- und Schalenrissen, die zu Abplatzungen führen. Sulfate sind im Vergleich zu Chloriden deutlich weniger korrosiv. Aus der Literatur gibt es jedoch Hinweise, dass Sulfate die Passivierung der Stahloberfläche ungünstig beeinflussen, so dass es rascher zur Auslösung von Korrosionsangriffen kommt.

Eine pH-Wert Absenkung infolge Karbonatisierung des Betons/Füllguts ist im Boden normalerweise nicht relevant, da die CO₂-Diffusion in Böden sehr langsam ist. Hingegen kommt der bis heute noch wenig beachteten Auslaugung des Betons zukünftig eine deutlich grössere Bedeutung zu. Durch die Auslaugung zementöser Werkstoffe werden einerseits alkalische Bestandteile abgebaut, was eine pH-Wert Absenkung zur Folge hat, und andererseits die festen Phasen des Zementsteingefüges allmählich zerstört, was schlussendlich einen Verlust der Festigkeit zur Folge hat. Weitere Details zum Thema Auslaugen von Beton können dem Kapitel 3.1.4 entnommen werden.

Frost-Angriff

Obwohl im Boden üblicherweise Temperaturen von mehr als 10 °C vorherrschen, kann es im oberflächennahen Ankerkopfbereich zu Frostangriffen kommen, was z.B. von Lawinenschutzbauten bekannt ist. Während des Gefrierens von Wasser im porösen Zementstein laufen mehrere Vorgänge ab, die den Frostwiderstand entscheidend beeinflussen. Beim Phasenübergang von Wasser zu Eis kommt es aufgrund der Dichteanomalie des Wassers zu einer Volumenzunahme von 9 %. Wenn im porösen Zementstein kein ausreichender Ausdehnungsraum in Form von leeren, zugänglichen Poren zur Verfügung steht, entsteht ein innerer Druck. Wird dieser Druck grösser als die Zugfestigkeit des Betons, kommt es zu einer Sprengwirkung. Durch wiederholte Frost-Tau-Zyklen entsteht ein sogenannter Pumpeffekt, der mit einer zunehmenden Sättigung des Betons verbunden ist. Das Wasser gefriert zuerst in den grösseren Poren. Da der Dampfdruck über dem Wasser grösser ist als über dem Eis, wandert das noch ungefrorene Wasser aus den kleineren Poren in die grösseren Poren und gefriert dort. Damit findet eine Entwässerung der feineren Poren und eine Eisansammlung in den grösseren Poren statt. Beim Auftauen schmilzt das Eis zuerst an der Betonoberfläche, während im Betoninneren das Porenwasser in den grossen Poren noch gefroren ist. Die erwärmte Betonrandzone dehnt sich aus und saugt das Schmelzwasser über die leeren Kapillarporen auf. Beim erneuten Gefrieren beginnt der Prozess von vorne.

3.1.4 Auslaugung von Beton und Füllgut

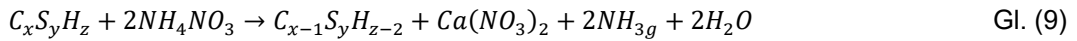
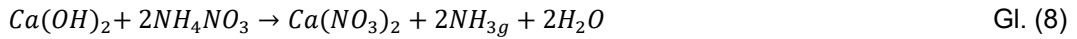
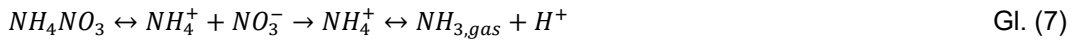
Beton in Kontakt mit deionisiertem Wasser führt zum Konzentrationsausgleich durch Auslaugen. U.a. diffundiert das in der Betonporenlösung befindliche Ca²⁺ in die Lösung mit geringerer Ca²⁺ Konzentration. Dies verringert den Ca²⁺-Gehalt der Betonporenlösung, sodass Calcium enthaltende Phasen in Lösung gehen theoretisch so lange bis anstehende Lösung, Betonporenlösung und Ca enthaltende Phasen im Gleichgewicht sind. Gl. (4) und Gl. (5) zeigen das in Lösung gehen von Portlandit und C-S-H Phasen [33].



Die Diffusion von Kalzium wird mit dem zweiten Fick'schen Diffusionsgesetz beschrieben [56]. Unter der Annahme konstanter Material- und Lösungsbedingungen kann der Auslaugfortschritt, bzw. der Fortschritt der Depassivierungsfront mit dem Wurzel-Zeit-Gesetz beschrieben werden, Gl. (6). Dabei sind x_L die Auslaugtiefe, t die Zeit in Sekunden, D_e der scheinbare Diffusionskoeffizient in m²/s, q_0 der Auslaugbare Kalziumgehalt im Zementstein in Mol, c_s die Löslichkeit von Portlandit in Mol und $L(t)$ die Auslaugrate in m/s^{0.5}.

$$x_L = \sqrt{\frac{2 \cdot D_e c_s}{q_0}} \cdot \sqrt{t} \quad \rightarrow \quad x_L = L(t) \sqrt{t} \quad \text{Gl. (6)}$$

Um das Auslaugen in deionisiertem Wasser zu beschleunigen, wird häufig Ammonium Nitrat verwendet [24, 54, 57, 38]. Hierbei wird angenommen, dass der Auslaugprozess derselbe, die Ca-Löslichkeit jedoch ca. 300-fach erhöht ist. Das Ammoniumnitrat zerfällt dabei zuerst in Lösung zu Ammonium und Nitrat. In basischer Umgebung zerfällt das Nitrat weiter zu gasförmigem Ammoniak und Wasserstoff, Gl. (7). Das Nitrat reagiert dann mit den Ca-enthaltenden Phasen nach z.B. Gl. (8) und Gl. (9).



Das Auslaugen führt zu einer Zunahme der Porosität und damit verbundenen Beeinflussung der mechanischen und Dauerhaftigkeitseigenschaften. Die Zunahme der Porosität ist umso grösser, je grösser der Anteil des Portlandit im Zementstein ist. Das Auslaugen des C-S-H trägt weit weniger zur Porositätszunahme bei [34].

Die Auslauggeschwindigkeit und die Porenstruktur gegenüber (fliessendem/ständig) deionisiertem Wasser wird von der Wasserzusammensetzung insbesondere seinem Kalk und CO_2 Gehalt beeinflusst (Abb. 8).

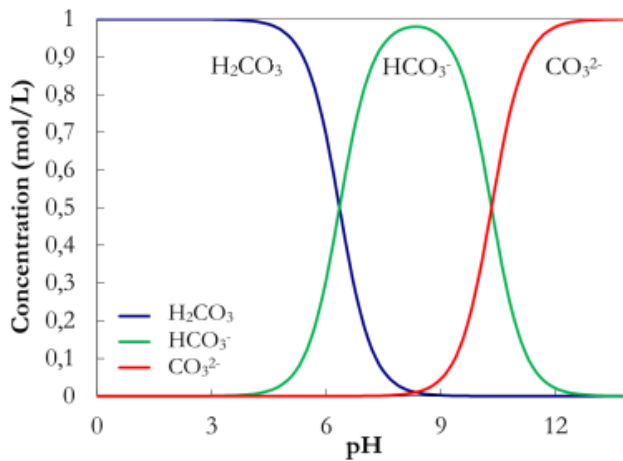
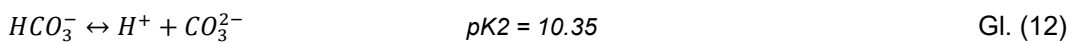
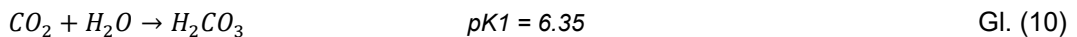
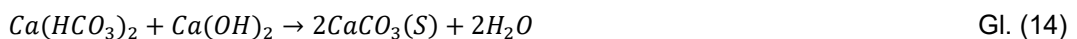
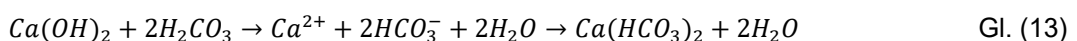


Abb. 8 Kalk-Kohlensäure Gleichgewicht bei 25°C.

Ist CO_2 in Kontakt mit Wasser löst es sich und bildet je nach pH-Wert Kohlensäure, Bicarbonat und Carbonat Ionen nach Gl. (10) bis Gl. (12).



Bei niedrigem pH reagiert die Kohlensäure mit dem Portlandit zu Calciumhydrogencarbonat. Weiteres Calcium führt zur Transformation zu Calciumcarbonat, welches sich an der Reaktionsfront niederschlägt, Gl. (13) und Gl. (14).



Diese Kalkschicht weist eine geringere Porosität auf und führt zu einer Verlangsamung des Auslaugfortschritts. Nach [32] wird bei $\text{pH} < 3$ keine Kalkschicht entstehen. Zwischen 3 <

pH < 7 nimmt die Kalkschicht immer weiter zu, sodass bei pH > 7 der Auslaugfortschritt nahezu zum Erliegen kommt.

In [34] wurden CEN-Standard-Mörtel aus unterschiedlichen Bindemitteln (CEM I, CEM II/B-LL, CEM III/B und CEM IV (D-V)) hergestellt und vergleichend in weichem Wasser (pH ≤ 6.5) untersucht. Abb. 9 zeigt die Korrelation zwischen natürlicher Auslaugung (L_{NA}) und beschleunigter Auslaugung in 6M NH_4NO_3 (L_{AC}) aus diesen Untersuchungen.

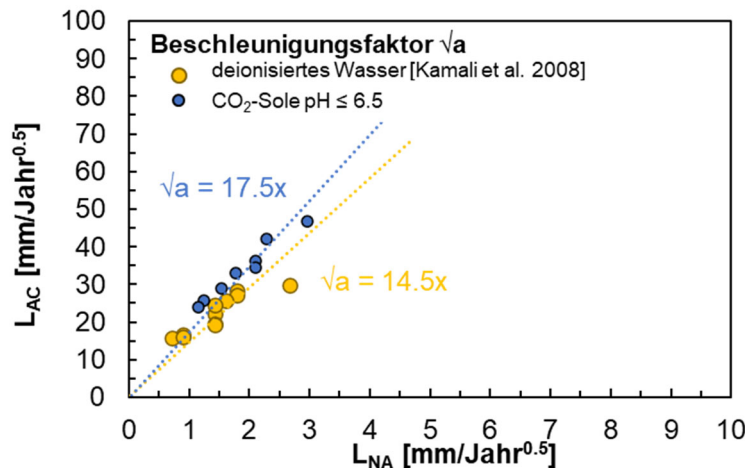


Abb. 9 Korrelation zwischen Auslaugraten in weichem Wasser pH ≤ 6.5 (L_{NA}) und Auslaugraten bestimmt in 6M NH_4NO_3 (L_{AC}) sowie die Korrelation zwischen natürlichem Auslaugen L_{NA} bestimmt in deionisiertem Wasser und beschleunigtem Auslaugen nach [39] aus [34].

Neben der Wasserhärte hängt die Auslaugrate massgebend von der Pufferkapazität des Bindemittels sowie der Porosität und damit dem w/b-Wert ab. Eine gute Korrelation wurde zwischen dem $w/(CaO_r + SiO_2)$ gefunden [34], da der reaktive CaO Gehalt die Menge an Auslaugbarem Material bestimmt und der reaktive SiO_2 Gehalt die Bildung von C-S-H Phasen. Abb. 10 zeigt die Korrelation zwischen Auslaugrate und $w/(CaO_r + SiO_2)$ (a) bei Auslaugen in 6M NH_4NO_3 und (b) bei Auslaugen in Sole mit pH ≤ 6.5.

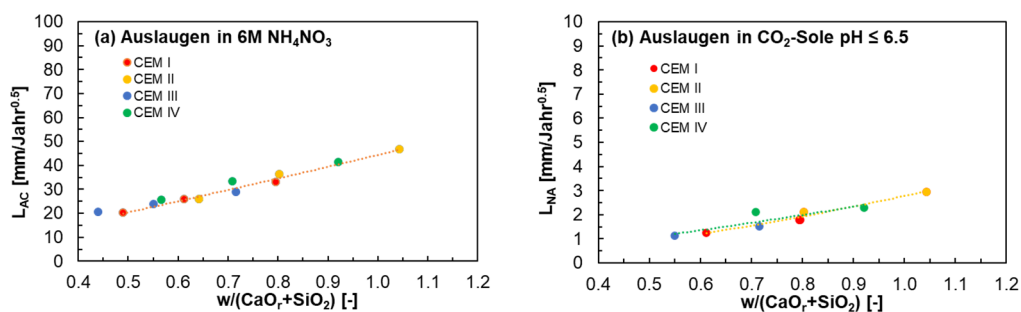


Abb. 10 Korrelation zwischen $w/(CaO_r + SiO_2)$ und Auslaugraten bestimmt in (a) 6M NH_4NO_3 Lösung (L_{AC}) und (b) in weichem Wasser pH ≤ 6.5 (L_{NA}) aus [34]

3.1.5 Schweizerische Dauerhaftigkeitsprüfungen

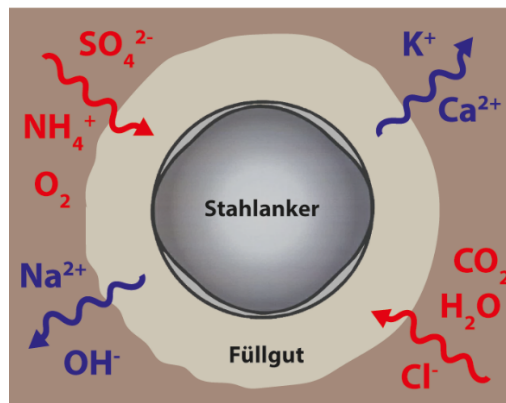
Zurzeit gibt es keine normierte, schweizerische Dauerhaftigkeitsprüfung zur Bestimmung des Widerstands gegen lösenden Angriff (XAc). Hingegen existiert gemäss [20] eine Dauerhaftigkeitsprüfung zur Bestimmung des Sulfatwiderstands bei der Expositionsklasse XAs. Dabei werden Prüfkörper einer zyklischen Beanspruchung durch Trocknen und jeweils anschliessender Lagerung in einer sulfathaltigen Lösung ausgesetzt, wodurch sie Sulfat aufnehmen. Während einer nachfolgenden Zusatzlagerung in der Sulfatlösung ohne Tränkungs- und Trocknungszyklen kann das Sulfat zusätzlich mit Bestandteilen im Prüfkörper reagieren und eine Volumenänderung des Prüfkörpers (Ausdehnung) bewirken.

Diese Längenänderungen werden an Messbolzen mit Hilfe eines präzisen Messgeräts bestimmt. Grundsätzlich wurde die Prüfung für Beton entwickelt, wobei Mischungen mit unterschiedlichen Zementarten, w/b-Werten und Zementleimvolumina verwendet wurden. Nebst Betonen mit Grösstkorn 32 mm, wurden auch solche mit Grösstkorn 8 mm geprüft. Bei anderen Zusammensetzungen, wie von Spritzbeton oder Füllgut, sind, gemäss Norm, die Ergebnisse von einer Fachperson auf ihre Plausibilität zu prüfen. Dies kann beispielsweise mit Hilfe einer mikroskopischen Gefügeuntersuchung durchgeführt werden. Mischungen mit hohem Bindemittelanteil reagieren stärker als Beton mit Zementgehalten um die 300 kg/m^3 .

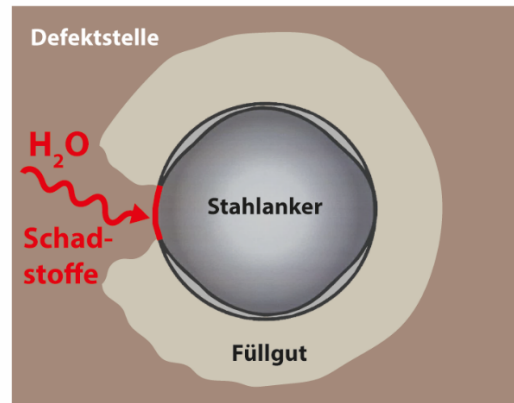
3.1.6 Beispiel-Szenarien für eine Korrosionsgefährdung von Mikropfählen

Die Einflüsse unterschiedlicher Expositionsbedingungen werden anhand der Abb. 11 für die Verankerungen mit Schutzstufe 1/2b und 2a/3a verdeutlicht. Wenn das Stahltragglied im Bohrloch zentriert und komplett von Füllgut umgeben ist, liegt die Stahloberfläche passiviert vor und ist, zumindest in der Anfangsphase, vor Korrosion geschützt. Eine Depassivierung der Stahloberfläche erfolgt erst, wenn genügend Schadstoffe (z.B. Chloride) auf der Stahloberfläche vorhanden sind, oder der pH-Wert des Füllguts auf unter 11.5 abgesunken ist. Es ist davon auszugehen, dass die pH-Wert Absenkung primär durch die Auslaugung des Portlandits $\text{Ca}(\text{OH})_2$ und nicht infolge Karbonatisierung verursacht wird. Schadstoffe wie Sulfate oder Ammonium können die Zementsteinmatrix angreifen, so dass der Korrosionsschutz der Verankerung wegen der Zerstörung des Füllguts verloren geht. In diesem Fall und bei Defektstellen in der schützenden Umhüllung (Kunststoffhüllrohr, Innen-/Ausseninjektion) kommt die Stahloberfläche direkt mit dem Erdboden bzw. der Feuchtigkeit im Boden in Kontakt, was einen Korrosionsangriff gemäss (1) und (2) auslöst.

Schutzstufe 1 / 2b

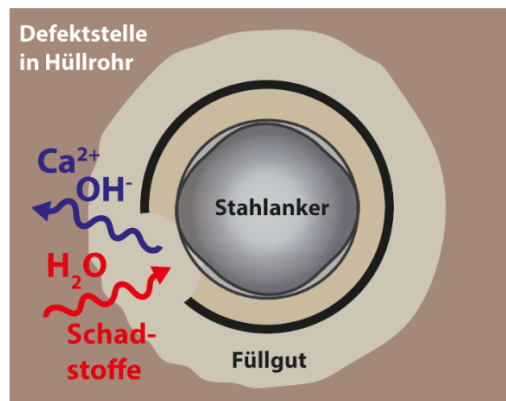


Einwirkung von Schadstoffen und Auslaugung des Füllguts

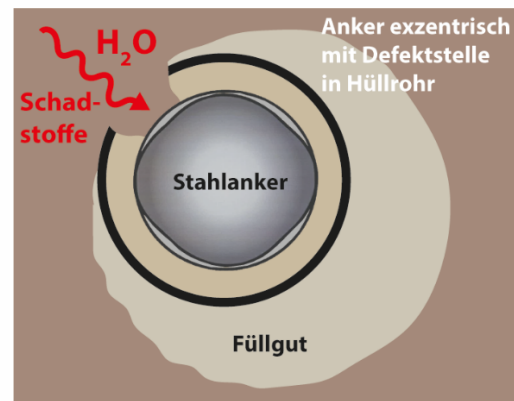


Direkte Einwirkung von Schadstoffen auf die Stahloberfläche in einer Fehlstelle oder gerissenem Füllgut

Schutzstufe 2a/3a



Einwirkung von Schadstoffen und Auslaugung des Füllguts in einer Fehlstelle oder gerissenem Füllgut



Direkte Einwirkung von Schadstoffen auf die Stahloberfläche in einer Fehlstelle oder gerissenem Füllgut

Abb. 11 Korrosionsgefährdung von Mikropfählen mit Schutzstufe 1/2b und 2a/3a anhand verschiedener Beispiel-Szenarien

3.2 Korrosionsfortschritt im Erdboden

Böden verhalten sich aus korrosionstechnischer Sicht gegenüber Stahl sehr unterschiedlich, da je nach Art und Struktur des Bodens sowie des Wasserangebotes (z.B. Grundwasser) sowohl die Feuchtigkeit als auch der Sauerstoffgehalt stark schwanken kann [47]. Bei veränderlichen Bodeneigenschaften entlang der Verankerung können in Fehlstellen der Umhüllung (z.B. bei Rissbildungen oder fehlendem Füllgut) galvanische Elemente (Belüftungselemente, Makroelemente) mit erhöhten Korrosionsraten an den Defektstellen entstehen [27]. Solche inhomogenen Verhältnisse können bei gewachsenen Böden in vielen Fällen nicht ausgeschlossen werden. Die bestimmenden Faktoren für die Korrosionseigenschaften von Böden können nachfolgender Aufzählung entnommen werden [51]:

- Aufbau des Bodens (Bodenart, Körnung, Bindigkeiten);
- pH-Wert des Bodens;
- Wassergehalt und Temperatur;
- Gehalt von Schadstoffen, z.B. lösliche Salze;
- Gehalt organischer Bestandteile bzw. von Mikroorganismen.

3.2.1 Korrosivität des Baugrunds

Bis heute gibt es keine einheitliche Einteilung von Böden hinsichtlich ihrer Korrosivität (häufig mit dem unzutreffenden Begriff «Aggressivität» bezeichnet). In [23] sind verschiedene Konzepte aus Normen für die Bewertung zusammengestellt. Spezifische Boden-Parameter wie Leitfähigkeit, pH-Wert, Salzgehalt etc., die generell einen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit von Ankersystemen haben, können mittels Baugrunduntersuchungen bestimmt werden [11, 13]. Einteilungen der Korrosionswahrscheinlichkeit aufgrund von Bodenanalysen mit Bestimmung von Bewertungszahlen findet man beispielsweise in [6].

Abb. 12 zeigt beispielhaft die grosse Variation des spezifischen Bodenwiderstandes bzw. der Leitfähigkeit unterschiedlicher Gesteine und von Wässern. Weitere, vergleichbare Tabellen mit Korrosionswahrscheinlichkeit für Stahl-/Gussrohre in Abhängigkeit von Bodeneigenschaften und verschiedenen Feuchtezuständen sowie eine Einteilung von Bodenwiderständen und Korrosivität (Tab. 2) wurden auch vom Geologischen Dienst Nordrhein-Westfalen publiziert¹.

In der Praxis werden korrosionstechnische Bodenuntersuchungen nicht routinemässig ausgeführt. Liegen keine solchen Ergebnisse vor, muss eine Beurteilung auf der sicheren Seite liegend vorgenommen werden, was eventuell nicht der wirtschaftlich besten Lösung entspricht. Ausserdem muss beachtet werden, dass der Bodenaufbau häufig nicht homogen ist, sondern aus verschiedenen Schichten bestehen und die Bildung von Belüftungselementen begünstigen kann (Kapitel 3.2.2).

Tab. 2 Bewertung des Bodenwiderstandes¹

Korrosivität	Bodenwiderstand in Ωm
stark korrosiv	unter 10
korrosiv	10 bis 50
mittel korrosiv	50 bis 100
leicht korrosiv	100 bis 200
sehr leicht korrosiv	200 bis 400
nicht korrosiv	über 400

¹ Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen, www.gd.nrw.de

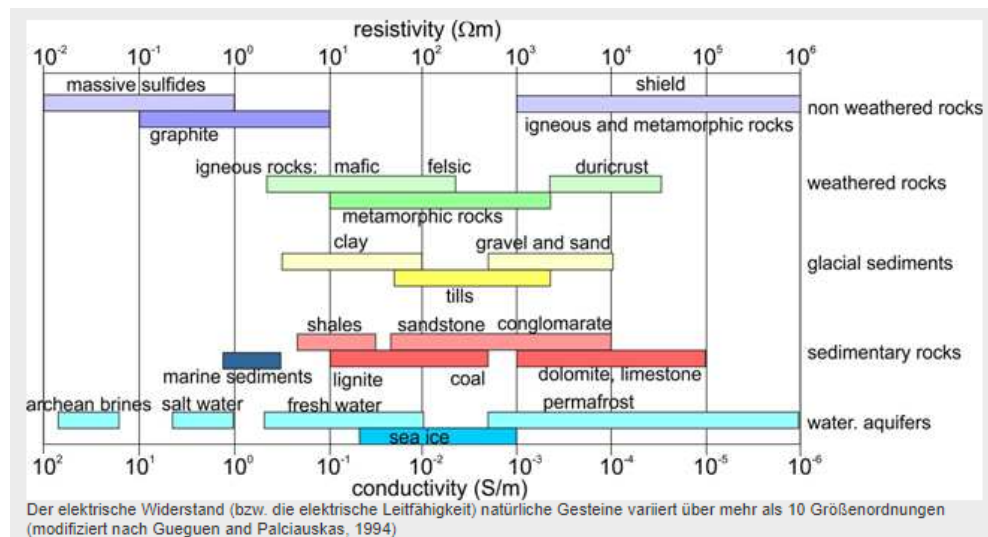


Abb. 12 Spezifischer Bodenwiderstand von Böden, BGR²

3.2.2 Korrosionsabtrag in unterschiedlichen Böden

In einer Studie von Nürnberger [48] wurde der Korrosionsabtrag nach 50 Jahren für Böden, die von I bis III klassiert wurden (soil classes), aufgrund von Langzeitversuchen abgeschätzt [51]. Bei der Klasse I (schwach korrosiv) handelt es sich um sandige bis kiesige Böden mit geringem Wassergehalt und einem spezifischen Bodenwiderstand $> 70 \Omega\text{m}$. Die Klasse II umfasst siltige Böden oder Feinsande mit mittlerem Wassergehalt und einem Bodenwiderstand zwischen 10 und $70 \Omega\text{m}$. Schlecht durchlüftete, lehmige Böden mit Bodenwiderständen unter $10 \Omega\text{m}$ gehören der Klasse III an.

Der Korrosionsfortschritt wurde vereinfacht als linear angenommen, wobei für die Bodenklassen I, II in den ersten vier Jahren eine höhere Korrosionsgeschwindigkeit als für die restlichen 46 Jahre berücksichtigt wurde. Dies wird damit begründet, dass sich die anfänglich grössere Abtragsrate durch die Bildung von Korrosionsprodukten bis zu einem gewissen Grad verlangsamt. Für die Bodenklasse IIIa und b ist die Korrosionsgeschwindigkeit über die gesamte Zeit konstant. Die Klasse IIIa wird als Extremfall bezeichnet. Die Abtragsraten variierten wie folgt:

Boden Klasse I (schwach korrosiv)

$v_{\text{kor}} (\leq 4 \text{ Jahre}) = 9 \text{ bis } 28 \mu\text{m/Jahr}$

$v_{\text{kor}} (> 4 \text{ Jahre}) = 2 \text{ bis } 7 \mu\text{m/Jahr}$

Boden Klasse II (mässig korrosiv)

$v_{\text{kor}} (\leq 4 \text{ Jahre}) = 18 \text{ bis } 35 \mu\text{m/Jahr}$

$v_{\text{kor}} (> 4 \text{ Jahre}) = 6 \text{ bis } 16 \mu\text{m/Jahr}$

Boden Klasse III (stark korrosiv)

$v_{\text{kor}} = 188 \mu\text{m/Jahr (IIIa)}$

$v_{\text{kor}} = 68 \mu\text{m/Jahr (IIIb)}$

In Abb. 13 ist der mit den obigen Angaben berechnete Korrosionsfortschritt grafisch dargestellt, wobei jeweils die obigen, maximalen Abtragsraten berücksichtigt wurden. Es ist ersichtlich, dass für die Klassen I und II nach 50 Jahren mit Korrosionsabträgen zwischen etwa 0.5 und 0.9 mm zu rechnen ist, was als geringer Angriff bezeichnet werden kann. Für die Klasse IIIb erreicht der Korrosionsabtrag ca. 3.5 mm und für IIIa mehr als 10 mm.

² Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, www.geozentrum-hannover.de.

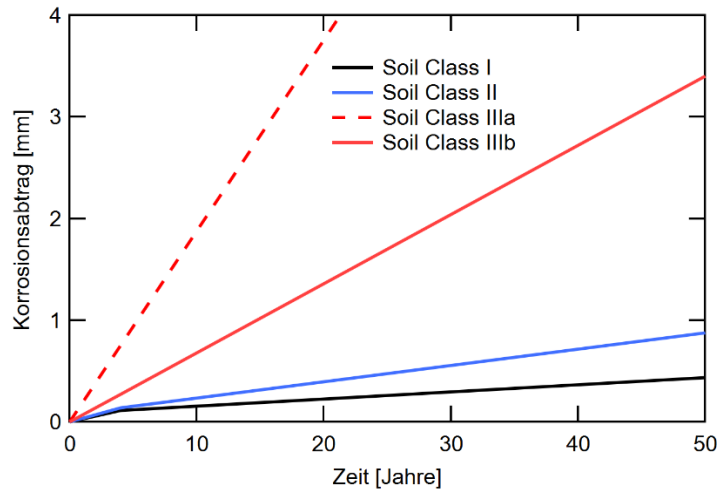


Abb. 13 Korrosionsabtrag von Stahl in Böden der Klassen I bis III über 50 Jahre, Daten aus [48].

3.2.3 Galvanische Korrosion – Ausbildung von Makroelementen

Normalerweise läuft die anodische und kathodische Reaktion bei der Korrosion von Stahl im Erdboden gleichmässig verteilt auf der Stahloberfläche ab, d.h. eine räumliche Trennung der Prozesse ist nicht vorhanden. Bei möglichen Fehlstellen in der zementösen Umhüllung können bei Mikropfählen mit Schutzstufe 1 und 2 b gemäss Abb. 14 verschiedene Arten von Korrosionsprozessen auftreten.

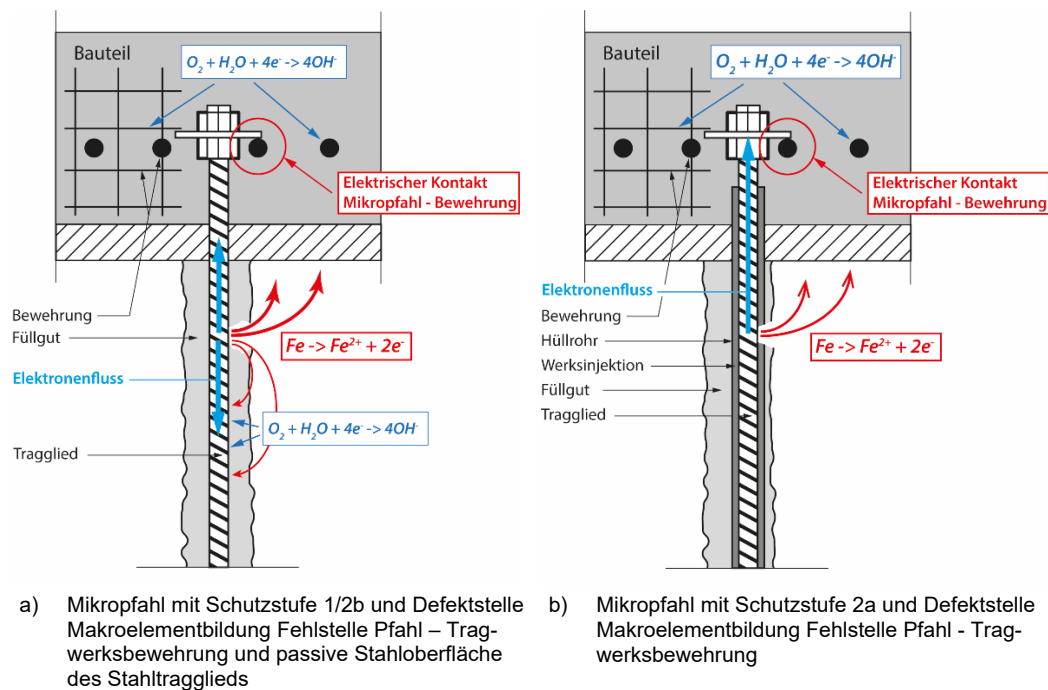


Abb. 14 Makroelementbildung bei Mikropfählen mit Schutzstufe 1/2b und 2a/3a

Wenn sich an der Fehlstelle eine Korrosionsstelle (Anode) ausbildet, wirkt der mit Mörtel umhüllte, passive Stahl als Kathode, was die Ausbildung eines sogenannten Makroelementes zur Folge hat. Bei der Schutzstufe 2a ist diese Elementbildung auf dem Pfahl wegen des isolierenden Kunststoffhüllrohrs unterbunden, d.h. der ionische Strom durch den Boden kann nicht fließen. Ein besonders starkes Makroelement bildet sich, wenn das Stahltragglied mit der Bewehrung eines Fundamentes elektrisch verbunden ist (Stahlstab und Bewehrung berühren sich). In diesem Fall kommt es infolge von Potenzialdifferenzen

zu einem Stromfluss zwischen der aktiven Defektstelle am Mikropfahl (Anode) und der passiven Stahloberfläche im Beton, die aus elektrochemischer Sicht als Kathode wirkt. Da die Oberfläche der Fundamentbewehrung um ein Vielfaches grösser ist die Fehlstelle, muss mit einem verstärkten Angriff am Tragglied gerechnet werden [36]. Es ist zudem davon auszugehen, dass eine hohe elektrische Leitfähigkeit des Bodens (entspricht einem tiefen Bodenwiderstand) den Korrosionsabtrag beschleunigt, wie dies im vorhergehenden Kapitel dargelegt ist.

3.2.4 Feldversuch SBB-Lärmschutzwand

Im Rahmen eines Feldversuches an einer Lärmschutzwand der SBB wurde von der Forschungsstelle die Korrosionsbeständigkeit verschiedener Mikropfahl-Systeme untersucht [53]. Folgende Systeme kamen zum Einsatz:

- Unlegierter GEWI-Stahl mit Schutzstufe 1 und 2a;
- Nichtrostender Stahl Top12 (zwei Oberflächenqualitäten) mit Schutzstufe 2b.

Um möglichst aussagekräftige Resultate während einer kurzen Versuchsdauer von 1.5 Jahren zu erhalten, mussten die Pfähle mit künstlichen Schwachstellen versehen werden (Abb. 15). Bei diversen Pfählen der Schutzstufe 1 wurden künstliche Schwachstellen mittels Lehm-Umhüllungen erzeugt. Bei den Pfählen mit Schutzstufe 2a wurden das Kunststoff-Hüllrohr und der Injektionsmörtel entfernt. Der freigelegte Stahlabschnitt wurde ebenfalls mit lehmigem Material umhüllt. Um eine Makroelementsituation mit der Schwachstelle als Anode und der Bewehrung im Beton als Kathode zu erzeugen, wurden die Pfähle mittels Messleitungen mit der Bewehrung der Fundamente verbunden. Für die kontinuierliche Datenerfassung wurden Funk-Datenlogger eingesetzt.



Abb. 15 Feldversuch mit Mikropfählen, Vorbereitung der Stahltragglieder.

Die Ergebnisse der Untersuchungen haben gezeigt, dass die Korrosionsströme generell zu gering waren, um eine gesicherte Aussage über das Korrosionsverhalten der verschiedenen Pfähle machen zu können. Vermutlich war der Wassergehalt im kiesigen Untergrund zu gering, damit sich wirksame Makroelemente ausbilden konnten. Jedoch konnte gezeigt werden, dass die Schutzstufe 2 im unbeschädigten Zustand einen wirksamen Korrosionsschutz darstellt. Bei den Top12-Pfählen waren klare Hinweise auf passives Verhalten vorhanden. Das Verhalten unter Beeinflussung durch Streuströme wurde nicht untersucht.

Nach Versuchsende wurden keine Pfähle ausgegraben, da sie in die gesamte LSW-Verankerung integriert sind. Auch wurde die Messeinrichtung nicht rückgebaut, um zu einem späteren Zeitpunkt erneute Messungen durchführen zu können.

4 Laborversuche

Bei den Laborversuchen wurden neben Frisch- und Festmörtelprüfungen auch Korrosionsprüfungen im «Kleinmassstab» durchgeführt (Lollipop-Proben). Ausgewählte Fälle sollten an realen Mikropfahlab schnitten in grossen Auslagerungskisten validiert werden. Als Bodenmaterial diente feiner Quarzsand, der mit künstlicher Bodenlösung plus Schadstoffen getränkt wurde, so dass möglichst gut definierte Versuchsbedingungen erreicht werden können. Zum Thema Auslaugen von Zementstein wurden in Ammoniumnitrat erste Versuche mit CEM I durchgeführt. Die Auslaugfront kann mit einem pH-Indikator (Phenolphthalein) deutlich sichtbar gemacht werden. Alle Dauerhaftigkeitsprüfungen, z.B. nach [20], wurden vom akkreditierten Baustoffprüflabor TFB AG in Wildegg durchgeführt. Die Prüfungen am Füllgut gemäss [8] sind ebenfalls Teil des akkreditierten Geltungsbereichs. Die Probenherstellung für die Auslaugversuche ist in Kapitel 4.3 beschrieben.

4.1 Untersuchungen am Füllgut (Einpressmörtel)

4.1.1 Bindemittel und Mischungen

Die untersuchten Füllgut-Mischungen sind in Tab. 3 zusammengestellt. Mix 05 und 06 entsprechen einem kommerziell erhältlichen Füllgut aus der Schweiz. Mix 07 ist eine Mischung aus einem Portlandkompositzement mit zwei pulverförmigen Zusatzmitteln, die auch für die Injektion von Spanngliedern verwendet wird. In der Schweiz wird meist noch mit reinem Portlandzement CEM I plus Fließmittel gearbeitet [10]. Allerdings lässt die Norm auch andere Zementarten zu, sofern sie für die Anwendung als Füllgut zugelassen sind. Aus diesem Grund hat sich die Forschungsstelle entschieden, für die Untersuchungen verschiedene Zemente einzusetzen.

Für das Einbringen der notwendigen Scherenergie zur Aktivierung der Zusatzmittel sind Kolloidalmischer besonders gut geeignet. Solche Mischer eignen sich speziell zur Herstellung von Suspensionen aus Bindemittel, Wasser und weiteren Zusätzen. Durch die hochtourige Mischpumpe werden starke Turbulenzen erzeugt, was eine optimale Wirkung der Zusatzmittel bewirkt. Bei Mix 08 und 09 wurden zwei verschiedene Portlandkompositzemente ohne die Beigabe von Zusatzmitteln verwendet.

Mit den Mischungen Mix 01 bis 04 wurden erste Vorversuche gemacht, die nicht Bestandteil dieses Berichtes sind. Aus diesem Grund wurde die Nummerierung für die effektiven Mischung bei Mix 05 begonnen.

Tab. 3 Füllgut-Mischungen

Name	Bindemittel	w/b [-]
Mix 05	CEM I + Hydrolith	0.65
Mix 06	CEM I + Hydrolith	0.60
Mix 07	CEM II/B-M(S-T) HS + ZM	0.39
Mix 08	CEM II/B-LL	0.50
Mix 09	CEM II/B-M(T-LL)	0.50

Tab. 4 zeigt die chemische Zusammensetzung der Bindemittel. Diese wurden mittels XRF (Röntgenfluoreszenz-Analysator) bestimmt bzw. aus der Zusammensetzung abgeschätzt.

Tab. 4 Chemische Zusammensetzung der Bindemittel

Oxid [Gew.-%]	CEM I 42.5 N	Hydro- lith ¹	CEM II/B-M(S-T) 42.5 R HS	CEM II/B-LL 32.5 R	CEM II/B-M(T-LL) 42.5 N
SiO ₂	19.8	57	24.93	14.5	18.15
Al ₂ O ₃	4.6	21	6.12	3.2	4.12
Fe ₂ O ₃	3.1	2	2.71	2.1	2.72
CaO	61.9	2	55.7	60.4	60.6
MgO	2.2	0	2.98	1.5	2.38
SO ₃	3.3	0	3.4	2.4	2.64
K ₂ O	0.87	6	0.99	0.69	0.75
Na ₂ O	0.25	9	0.27	0.17	0.22
Cl ₂	0.044	0	0.011	0.03	0.014
CaCO ₃	5	0	1.9	38	15.4

¹ abgeschätzt von Phonolith

Am Füllgut wurde die Fließzeit, der Siebrückstand, das Absetzen und die Frischmörtelrohddichte nach [8, 9, 10] durchgeführt. Am Festmörtel wurden die Druckfestigkeit und Rohddichte, der Chloridwiderstand und der Sulfatwiderstand nach [20] bestimmt.

4.1.2 Frischmörtelprüfungen

Abb. 16 zeigt (a) die Prüfung der Fließzeit mit Auslauftrichter, (b) das Einfüllen des Einpressmörtels auf das Sieb und (c) das Ausfließen durch den Trichter nach [8].

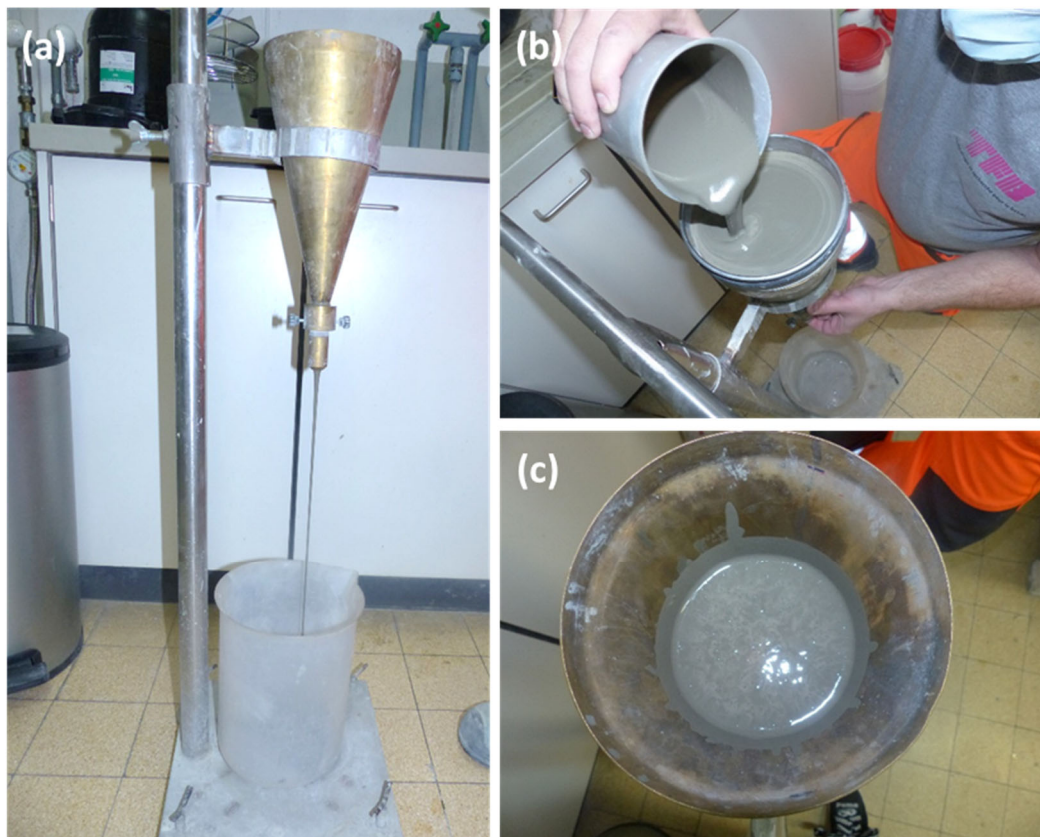


Abb. 16 Fließvermögen (links), Aufbau mit Trichter und Auffangbehälter (rechts oben), Befüllung des Siebs mit Zementleim (unten rechts), Auslauftrichter mit Zementleimfüllung.

Die Resultate zum Fließvermögen sind Abb. 17 angegeben. Die Fließzeit ist für die Zeitpunkte 0 (t_0) und 30 Minuten (t_{30}) nach dem Mischen dargestellt.

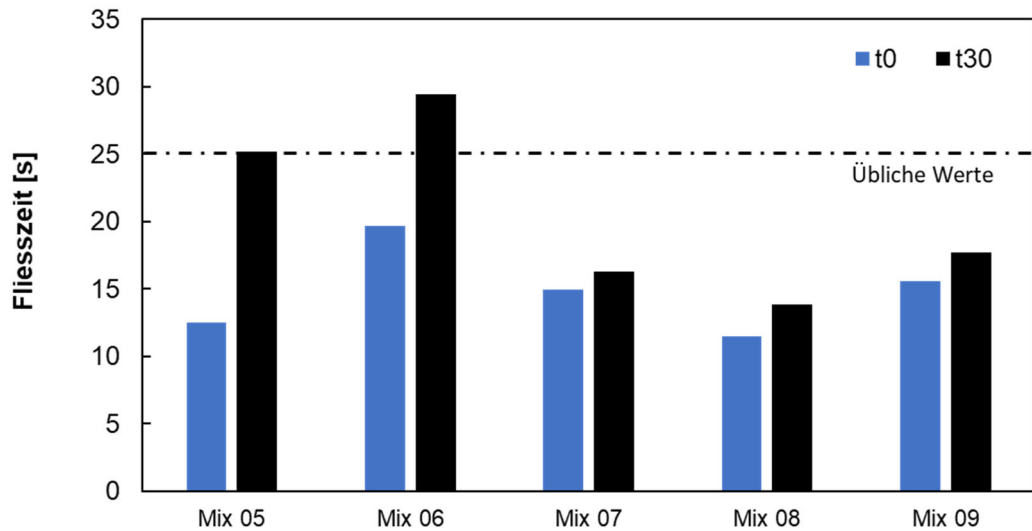


Abb. 17 Fließzeit der Mischungen in Abhängigkeit der Zeit ($t_0 = 0$ Minuten nach dem Anmachen und $t_{30} = 30$ Minuten nach dem Anmachen).

Die Fließzeit und damit die Viskosität sind bei allen Mischungen direkt nach dem Anmachen auf ähnlichem Niveau und unterhalb des 25 Sekunden Grenzwerts. Die geringe Viskosität wird entweder bei niedrigem w/b-Wert durch die Zugabe von Fließmittel bzw. bei hohen w/b-Werten (Mix 05 und 06) durch den erhöhten Wassergehalt sichergestellt. Wie erwartet nimmt die Fließzeit ohne Fließmitteleinsatz bei Erhöhung des w/b-Wertes ab (Mix 06 versus Mix 05). Der Einsatz von Ölschiefer in Mix 09 führt wie erwartet zu einer leichten Erhöhung der Viskosität (Erhöhung der Fließzeit). 30 Minuten nach dem Anmachen ist die Zunahme der Viskosität bei hohen w/b-Werten und damit des beschleunigten Erstarrens besonders ausgeprägt (Mix 05 und Mix 06).

Abb. 18 zeigt den Absetztest mit Vertikalrohr (Docht-Absetz-Test) nach [8]. Bild (a) zeigt das Vertikalrohr mit Litze, (b) das mit Einpressmörtel gefüllte Rohr, (c) Wasserabsonderungen (Bluten) an der Oberseite und teilweise fehlende Einpressmörtelumhüllung der Litze, (d) Skala zur Messung der Wasserabsonderung und (e) Entmischungen. Die Höhe des Füllguts und der Wasserabsonderungen wird während der ersten Stunde in Intervallen von 15 min und dann nach 2 h, 3 h und 24 h dokumentiert.

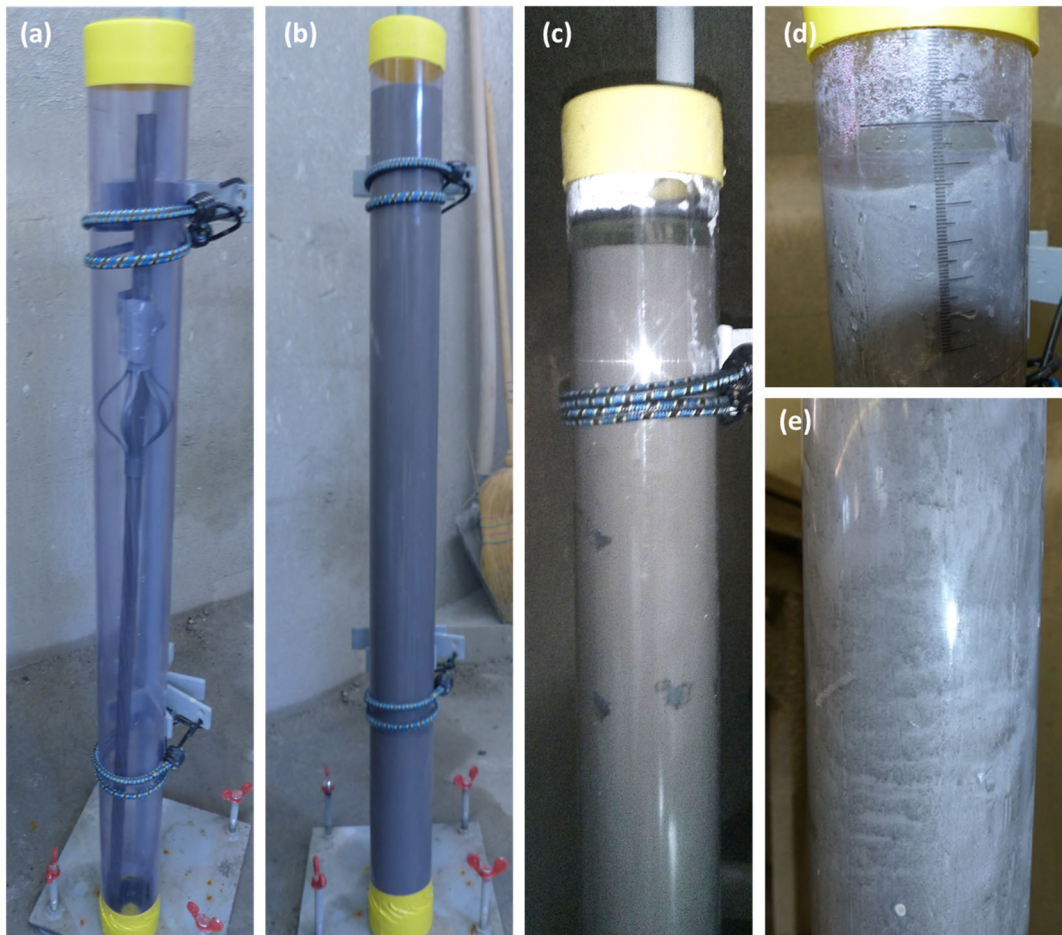


Abb. 18 Aufbau Absetztest (a), Gefülltes Standrohr (b), Wasserabsonderung und (c) prozentuale Volumenveränderung, (e) Entmischungserscheinungen (Mörtelbereiche unterschiedlicher Farbe bzw. Schlierenbildung).

Abb. 19 zeigt (a) die Blutwassermenge und (b) die Volumenverringering nach [8].

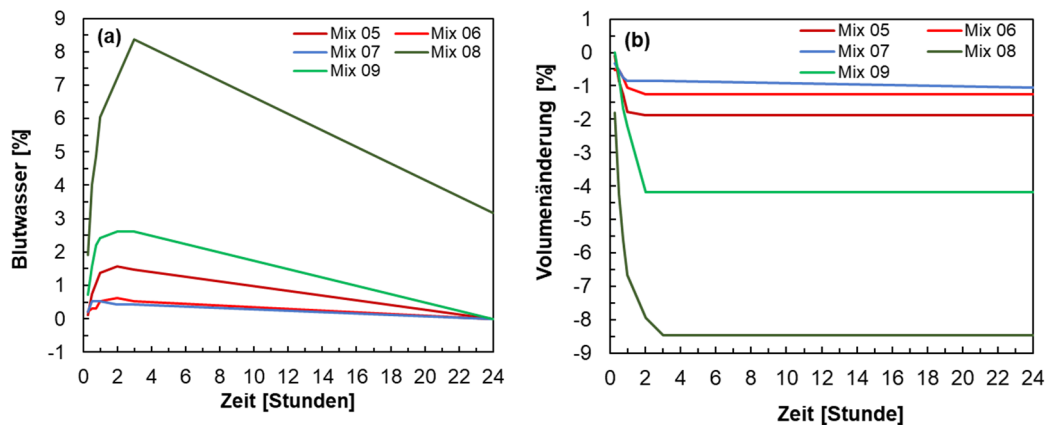


Abb. 19 (a) Blutwassermenge über 24 Stunden und (b) Volumenveränderung beim Absetzen im Vertikalrohr nach [8]. Negative Werte bedeuten Absetzen, positive Werte zeigen ein quellendes Verhalten.

Die geringste Blutwassermenge und die geringste Volumenveränderung zeigt Mix 07 mit w/b von 0.39 (Bemerkung: ohne Zusatzmittel ist eine solche Mischung nicht pumpfähig). Die Mischungen aus CEM I mit natürlichem Puzzolan (Mix 05 und 06) zeigen trotz hohem w/b Wert kaum Blutwasser wobei die Blutwassermenge und das Schwinden von w/b 0.6

(Mix 06) auf w/b 0.65 (Mix 05) zunimmt. Die Mischung Mix 08 aus CEM II/B-LL, d.h. einem reinen Hochbauzement und Wasser zeigt ausgeprägtes Bluten und Schwinden. Der Einsatz von puzzolanisch und hydraulisch wirkenden Ölschiefer im CEM II/B-M (T-LL) wirkt sich bei gleichem w/b-Wert gegenüber dem CEM II/B-LL positiv aus.

Abb. 20 zeigt die Flüssigkörperdichten nach [8] (a) im Einlass (t_0) und Auslass (t_{30}) und (b) als die Differenz ΔD . Mischungen Mix 06 und Mix 07 wurden zweimal untersucht, was an den Streubalken (\pm Standardabweichung) zu erkennen ist.

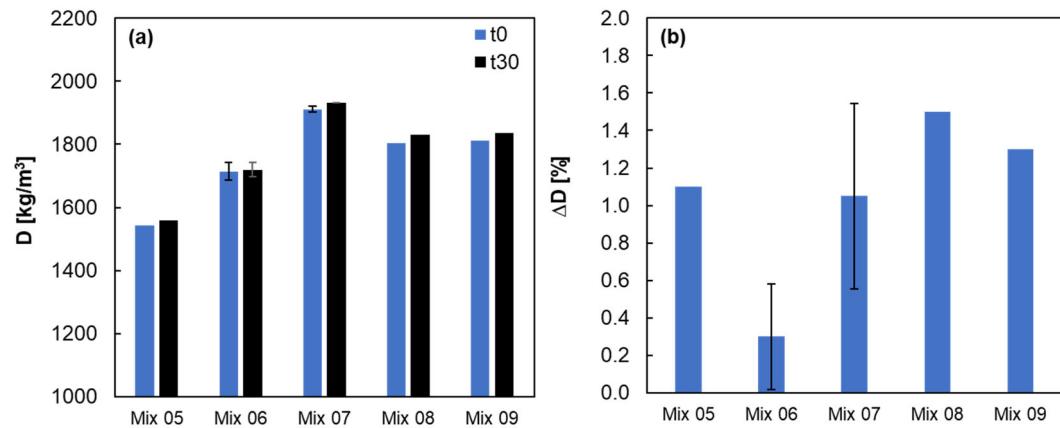


Abb. 20 (a) Flüssigkörperdichten im Einlass t_0 und Auslass t_{30} sowie (b) die Differenz der Dichten nach [8].

Die Flüssigkörperdichten nehmen mit zunehmendem w/b-Wert ab. Die Differenz der Dichte zwischen Ein- und Auslass sind beim CEM II/B-LL Mix 08 besonders ausgeprägt, gefolgt vom CEM II/B-M(T-LL) Mix 09.

Die speziell zusammengesetzten Einpressmörtel der Mischungen Mix 05 bis 07 zeigen das beste Verhalten in Bezug auf Bluten und Schwinden und zeigen auch bei Wahl des geeigneten Mischers (Mix 07) mit hoher eingebrachter Mischenergie zufriedenstellende Ausfließzeiten. Ein geringerer w/b-Wert der auf dem Markt befindlichen Einpressmörtel Mix 05 und Mix 06 verbesserte das Blut und Schwindverhalten zudem. Die Mischungen aus Wasser und Zement (ohne Fließmittel) mit handelsüblichem Hochbauzement (CEM II/B-LL Mix 08, CEM II/B-M(T-LL) Mix 09) zeigen ausgeprägteres Bluten und Schwinden, insbesondere das Füllgut mit CEM II/B-LL.

4.1.3 Festmörtelprüfungen

Abb. 21 (a) zeigt die Druckfestigkeitsentwicklung mit Streubalken ($\pm \sigma$) und (b) die Entwicklung der Festmörtelrohddichte. An die experimentell bestimmte Festigkeitsentwicklung wurde jeweils das am besten passende Modell nach [30] angefügt. Ob es sich dabei um das Modell für schnelle, mittlere oder langsame Festigkeitsentwicklung handelt, wurde ebenfalls angefügt.

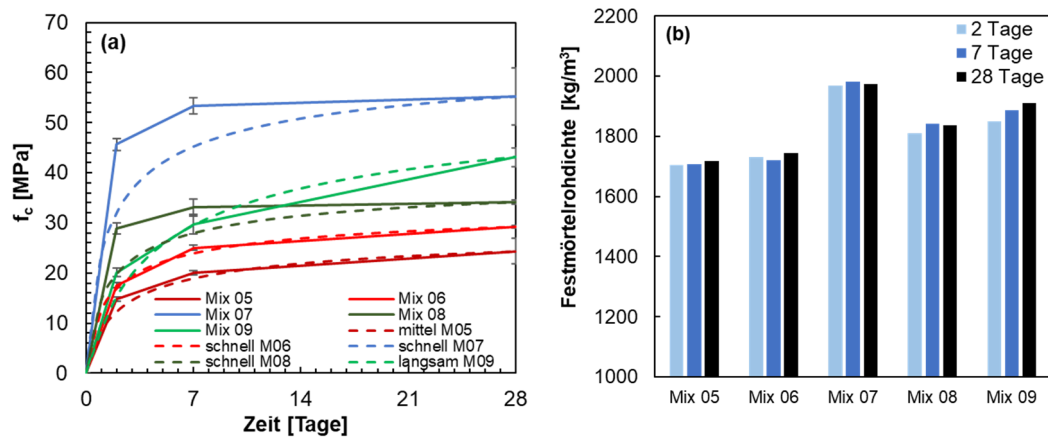


Abb. 21 (a) Druckfestigkeit nach 2, 7 und 28 Tagen (b) Festmörtelrohddichte nach 2, 7 und 28 Tagen.

Festigkeit und Rohddichte

Die Festigkeit und Rohddichte korrelieren generell mit dem w/b-Wert. Mit zunehmendem w/b-Wert nimmt die Druckfestigkeit ab und liegt insgesamt auf leicht niedrigerem Niveau als Beton des gleichen w/b-Werts. Gleiches gilt für die Mörtelrohddichte. Alle Mischungen mit puzzolanisch (Mix 05 und 06) sowie puzzolanisch und hydraulisch wirkenden Zusatzstoffen (Mix 09) nehmen zwischen 7 und 28 Tagen noch signifikant an Druckfestigkeit zu.

Eine relative gute Übereinstimmung mit dem fib Modell zur Festigkeitsentwicklung zeigen die Mischungen M05, M06 und M09 (CEM I bzw. CEM II/B-M(T-LL)). Eine deutlich schnellere Festigkeitsentwicklung als vom Modell vorhergesagt zeigen die Mischungen M07 (CEM II/B-M(S-T) plus Zusatzmittel) und M08 (CEM II/B-LL).

Chloridwiderstand

Abb. 22 zeigt (a) den Chloridwiderstand nach [20], Anhang B, und (b) den Chloridwiderstand der Mörtel in Abhängigkeit des w/SiO₂ nach [43]. Der Chloridwiderstand nimmt mit zunehmendem Anteil puzzolanisch bzw. hydraulischer Zusatzstoffe zu und mit zunehmendem w/b-Wert ab. Mix 08 zeigt mit Abstand den geringsten Chloridwiderstand. Die Daten passen gut zum in [43] beschriebenen Zusammenhang zwischen Chloridwiderstand und dem w/SiO₂-Gehalt im Zement.

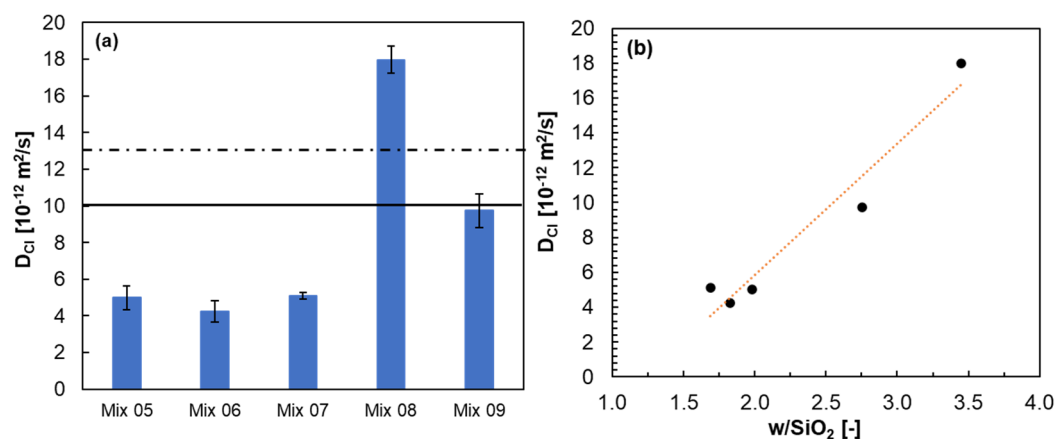


Abb. 22 (a) Chloridwiderstand nach [20], Anhang B, (b) Chloridwiderstand in Abhängigkeit des w/SiO₂ [43].

Sulfatwiderstand

Abb. 23 zeigt die gemessene Längenänderung bei der Prüfung des Sulfatwiderstands nach [20], Anhang D. Die Messung erfolgte an Zementsteinproben (Einpressmörteln). Deshalb ist eine ausgeprägtere Längenänderung als an Betonproben zu erwarten und die Grenzwerte nach [20], Anhang D, sind nicht direkt anwendbar, was auch in der Prüfanweisung entsprechend vermerkt ist. Das Verfahren wurde an Betonen mit w/b-Werten zwischen 0,45 und 0,60, Zementleimvolumina von 250 l/m³ bis 350 l/m³ und den Zementsorten CEM I, CEM I SR, CEM II/A-LL, CEM II/B-M und CEM III/B entwickelt.

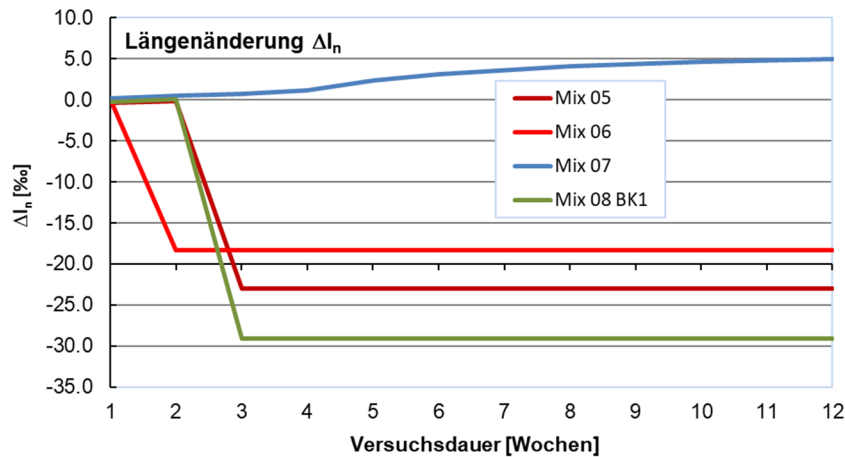


Abb. 23 Sulfatwiderstand Resultate der Längendehnung

Alle Bohrkern des Mix 09 und vier von fünf Bohrkernen des Mix 08 sind bereits während dem ersten Zyklus gebrochen (zu starke Volumenzunahme). Mix 06 ist nach dem ersten Zyklus und Mix 05 und 08 (ein Bohrkern) sind nach dem zweiten Zyklus gebrochen. Lediglich Mix 07 war effektiv messbar. Die Längenänderung lag über dem Grenzwert von [20], Anhang D, d.h. über 0.1 ‰. Dieser Grenzwert ist jedoch, wie bereits erwähnt, für Beton festgelegt worden. Der Mix 07, welcher ein in der Schweiz freigegebenen, sulfatbeständigen Zement enthält, hat die Prüfung durchlaufen. Die Probe wies zwar einzelne Risse auf, war ansonsten aber intakt. Aufgrund der Ergebnisse kann gefolgert werden, dass bei einem Risiko für Sulfatangriff ein in der Schweiz frei gegebener Zement mit hohem Sulfatwiderstand (SR- oder HS-Zemente) verwendet werden soll. Die entsprechenden Bindemittel sind im «Register der frei gegebenen Zemente, Zusatzstoffe und Kombinationen von Zement und Zusatzstoffen» des SIA aufgelistet [14]. Dieses Register wird laufend aktualisiert.

Karbonatisierungswiderstand

Abb. 24 zeigt den Karbonatisierungswiderstand der Mörtel in Anlehnung an [20], Anhang I. Der Karbonatisierungswiderstand ist zwar für die Exposition von Einpressmörteln kaum massgebend, kann aber Rückschlüsse auf den Auslaugwiderstand bzw. den Widerstand gegenüber chemischem Angriff liefern. In Abb. 22 (a) ist dem Karbonatisierungswiderstand der in [34] abgeleitete Grenzwert für den Karbonatisierungswiderstand in der XC2 Exposition (25 mm Überdeckung) angefügt. In Abb. 22 (b) ist dem Karbonatisierungswiderstand gegenüber dem w/CaO aufgetragen entsprechend dem Modell von [42].

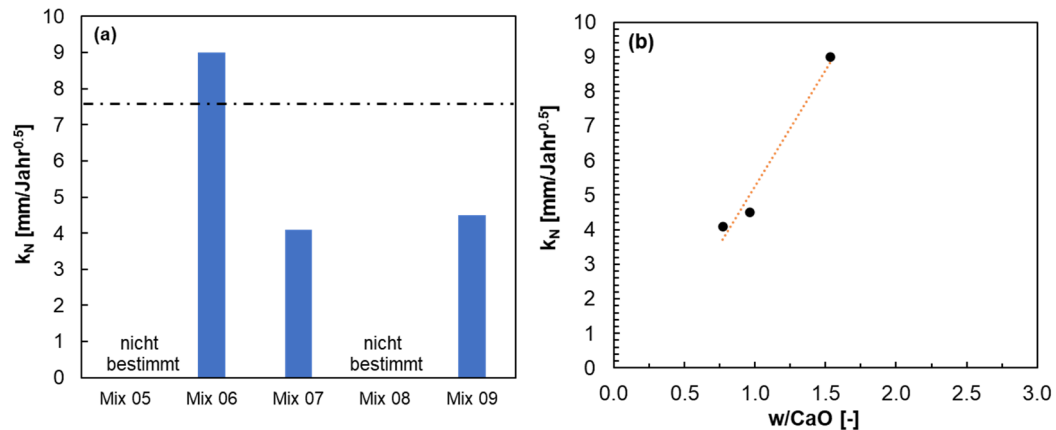


Abb. 24 (a) Karbonatisierungswiderstand in Anlehnung an [20], Anhang I, (b) Karbonatisierungswiderstand in Abhängigkeit des w/CaO .

Die Mischungen Mix 07 und Mix 09 liegen unterhalb des Grenzwertes für den Karbonatisierungskoeffizienten in der XC4- und XC3-Exposition. Damit wird auch der nach [34] ermittelte Grenzwert der XC2-Exposition (bei 25 mm Überdeckung) unterschritten. Mischung Mix 06 überschreiten den Grenzwert für die XC2 Exposition (gestrichelte Linie). Insgesamt liegen die Karbonatisierungswiderstände auf höherem Niveau als nach [42] zu erwarten wäre. Beispielsweise sollte der Karbonatisierungswiderstand des Mix 06 nach dem w/CaO Modell von Leemann bei rund $k_N \approx 7.5$ mm/Jahr^{0.5} liegen. Die Unsicherheit bei der Zusammensetzung der Mischung (Mix 06) und die erhöhten Karbonatisierungstiefen durch Risse infolge ausgeprägtem Trocknungs- und Karbonatisierungsschwinden der Zementleime aller drei Mischungen können ursächlich sein, vgl. Abb. 25.

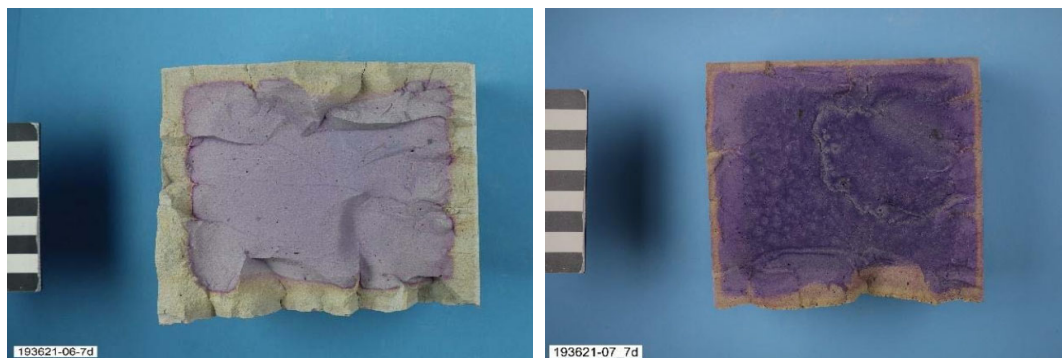


Abb. 25 Karbonatisierungstiefe nach 7 Tagen bei der Mischung Mix 06 (links) und der Mischung Mix 07 (rechts).

Frost- und Frost-Tausalzwiderstand

Die Frost-Tausalzbeständigkeit bei Calciumchlorid (-25°C) – Wasser (+20°C) Wechsel Lagerung wurde mit der akkreditierten Prüfung «Frostwiderstand nach Schnellverfahren TFB» ermittelt. Diese Prüfung hat den Vorteil, dass sie an kleinen Bohrkernen durchgeführt wird und sich zur Bestimmung des Frost- und Frost-Tausalzwiderstands eignet. Für die Prüfung werden in der Regel zwei Bohrkern (Länge je 100 mm, Ø 50 mm) benötigt. Ein Bohrkern wird wassergesättigt und anschließend entweder in einer Salzlösung (Frosttausalzbeständigkeit) oder Äthylenglykol-Lösung (Frostbeständigkeit) 10 Frosttauzyklen bei -25 °C/+20 °C unterworfen. Der andere Bohrkern dient als Referenzprobe. Danach werden die Proben getrocknet und mit einem fluoreszierenden Harz imprägniert. Zur Beurteilung der Frost- resp. Frosttausalzbeständigkeit wird sowohl die Oberfläche als auch das Innere der Probe mikroskopisch untersucht. Als Beurteilungsparameter dienen frost(tausalz)bedingte Gefügeschäden. An der Referenzprobe erfolgt der Vergleich zum ursprünglichen, ungefrosten Zustand. Als Resultat wird die Frost- bzw. Frosttausalzbeständigkeit in einer 5-stufigen Beurteilungsskala von schlecht bis hoch angegeben [58].

Abb. 26 fasst die Resultate von drei Füllgutmischungen (Mix 06, 07 und 09) in Form von Bildern zusammen.

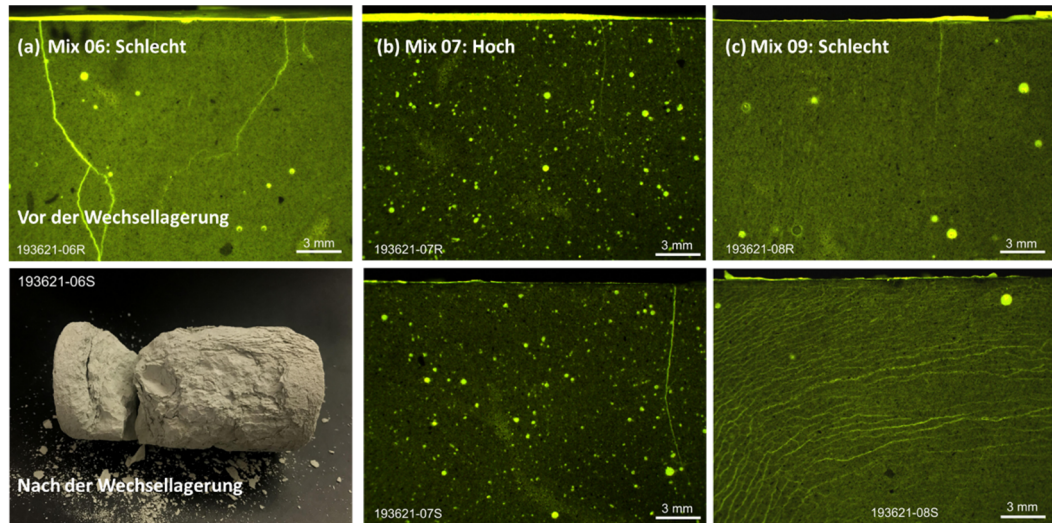


Abb. 26 Mikroskopische Aufnahme nach der Frost-Taumittelbeaufschlagung (a) Mix 06, (b) Mix 07 und (c) Mix 09.

Mix 06 und Mix 09 zeigen einen schlechten Frost-Tausalzstand. Dabei war das Gefüge der Probe der Mischung Mix 06 nach der Wechsellagerung so beeinträchtigt, dass keine mikroskopische Untersuchung durchgeführt werden konnte. Bei Mix 09 war nach der Frost-Taumittel Wechsellagerung ausgeprägte Rissbildung erkennbar. Lediglich der Mix 07 zeigte einen hohen Frost-Taumittelwiderstand und zeigte kaum Schädigungen des Gefüges nach der Wechsellagerung.

Auslaugwiderstand

Abb. 27 zeigt den Auslaugwiderstand nach der Schnellprüfung gemäss [34] in 6M NH_4NO_3 Lösung. Details zum Versuchsaufbau und -durchführung sind im Kapitel 4.3 enthalten.

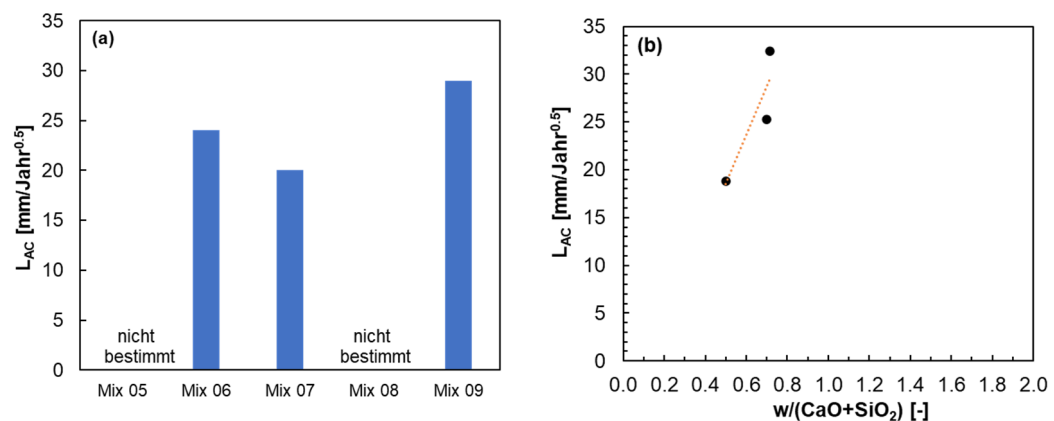


Abb. 27 (a) Auslaugwiderstand in der beschleunigten Auslaugprüfung (b) Auslaugwiderstand in Abhängigkeit des $w/(CaO+SiO_2)$ nach [34].

Der Auslaugwiderstand nimmt mit zunehmendem $w/(CaO+SiO_2)$ zu. Den höchsten Auslaugwiderstand zeigt Mix 07 mit $w/b = 0.39$ und CEM II/B-M(S-T), den geringsten zeigt Mix 09 mit $w/b=0.5$ und CEM II/B-M(T-LL).

Abb. 28 vergleicht (a) die Auslaugraten unter beschleunigten Bedingungen mit dem $w/(CaO+SiO_2)$ und (b) mit der Auslaugrate des selben Mörtels bzw. Füllguts mit natürlichen Auslaugraten. Ebenfalls angefügt sind Auslaugraten aus [34].

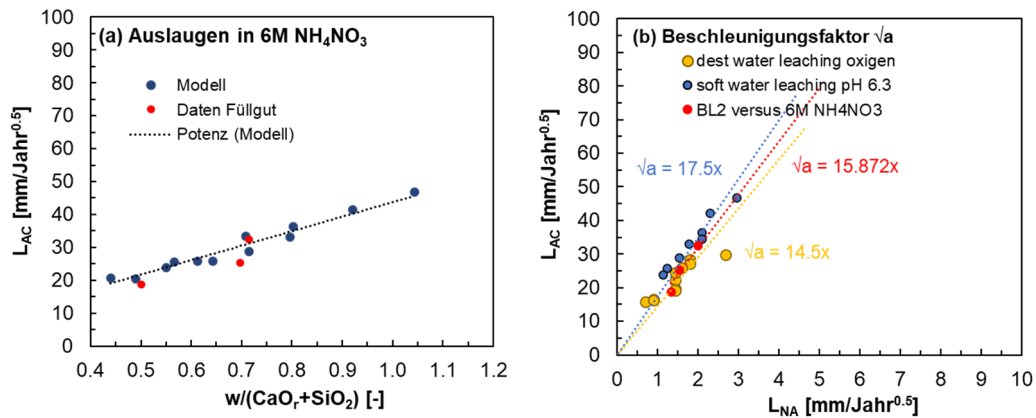


Abb. 28 Auslaugrate in Ammoniumnitrat im Vergleich zu Resultaten aus [34] (a) in Abhängigkeit des $w/(CaO+SiO_2)$ (b) als Vergleich zum natürlichen Auslaugen.

Die Auslaugraten vom Füllgut stimmen gut mit den Auslaugraten, die an Mörteln gemessen wurden, überein. Der Beschleunigungsfaktor beim Auslaugen in Ammoniumnitrat gegenüber Auslaugen in Bodenlösung BL2 ist rund 16-fach und damit etwas geringer als gegenüber destilliertem Wasser und etwas höher als gegenüber weichem Wasser mit pH ca. 6.3.

Die Auslaugraten unter natürlichen Bedingungen für Mix 06, 07 und 09 sind im Vergleich zu den natürlichen Karbonatisierungskoeffizienten in nachfolgender Tab. 5 zusammengestellt. Daraus ist ersichtlich, dass das Auslaugen verschiedener Füllgut-Mischungen etwa 2.3 bis 6-mal langsamer verläuft als die Karbonatisierung. Trotzdem muss die Auslaugung von erdvergrabenen Betonbauteilen oder Verankerungen bei langen Nutzungsdauern und Bindemitteln mit reduziertem Klinkergehalt in Zukunft genauer beachtet werden.

Tab. 5 Vergleich von Auslaug- und Karbonatisierungswiderständen für drei Füllgut-Mischungen unter natürlichen Bedingungen. L_{NA} = Auslaugkoeffizient, K_N = Karbonatisierungskoeffizient.

Mischung	Bindemittel	w/b-Wert	L_{NA} [mm/Jahr ^{0.5}]	K_N [mm/Jahr ^{0.5}]
Mix 06	CEM I + Hydrolith	0.60	1.5	9.0
Mix 07	CEM II/B-M(S-T)	0.39	1.3	4.0
Mix 09	CEM II/B-M(T-LL)	0.50	1.8	4.2

4.2 Auslagerungsversuche in Sandboxen

4.2.1 Sandboxen

Die Auslagerungsversuche erfolgten in grossen Sandboxen/-kisten. In jeder Sandbox befinden sich vier Bewehrungsstäbe aus nichtrostendem Stahl der Werkstoffnummer 1.4362 (Lean-Duplex Stahl) mit $\varnothing = 12$ mm. Die Stäbe wurden zur Überwachung des elektrischen Widerstands des Bodens verwendet. Ferner enthielt jede Kiste Bewehrungsmatten aus nichtrostendem Stahl der Werkstoffnummer 1.4362. Diese dienten als Kathode für die Ausbildung von Makroelementen zwischen Mikropfahl und einer simulierten Fundamentbewehrung. Ebenfalls enthalten war eine sogenannte ER-Probe zur Messung der Eigenkorrosion und drei bis vier Mikropfähle. Abb. 29 zeigt die Kistenabmessung und -instrumentierung im Längs- und Querschnitt sowie Bilder der Boxen.

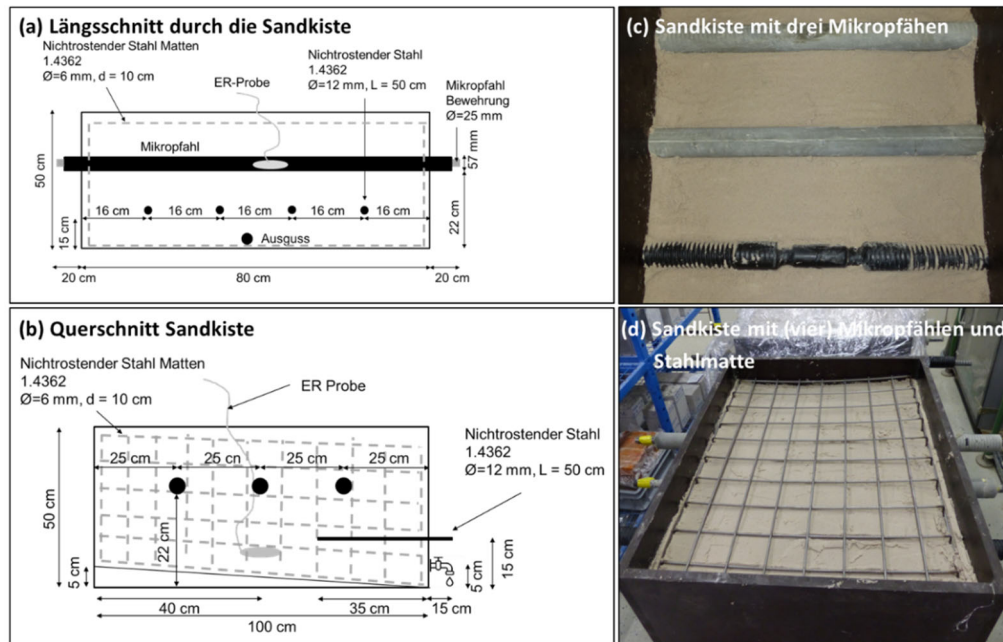


Abb. 29 Sandbox/-kiste (a) Längsschnitt (b) Querschnitt (c) Foto der Sandkiste mit noch partiell freiliegenden Mikropfählen, (d) Foto der Box nach Befüllung bis zur oberen Bewehrungsmatte.

Für die Untersuchungen wurden drei Sandboxes gewählt (Box 1, Box 2 und Box 3). Box 1 und Box 3 enthielt drei Mikropfähle und Box 2 enthielt 4 Mikropfähle. Nach Befüllung und Instrumentierung der Sandboxes wurden diese mit Folie abgedeckt, um eine Verdunstung des Wassers in der feuchten Sandfüllung zu verhindern. Die vorgefertigten Mikropfähle wurden freundlicherweise von der Stahlton AG, Herr Dr. D. Meyer, an die Forschungsstelle geliefert.

4.2.2 Bodenmaterial (“Perth Sand”)

Als Bodenmaterial wurde eine Sandmischung (Quarzsand) mit vergleichbarer Sieblinie und chemischer Zusammensetzung wie «Perth Sand» verwendet. Dazu wurden Quarzsande der Körnungen 0.06-0.25 mm, 0.06-0.3 mm, 0.1-0.6 mm, 0.3-0.9 mm und 0.7-1.2 mm entsprechend ihrer Kornverteilung so kombiniert, dass eine dem Perth Sand ähnliche Sieblinie erreicht wird [40, 49, 45]. Abb. 30 zeigt die Sieblinie des Perth Sandes nach [40] und die von der Forschungsstelle aus Einzelkomponenten angepasste Sieblinie.

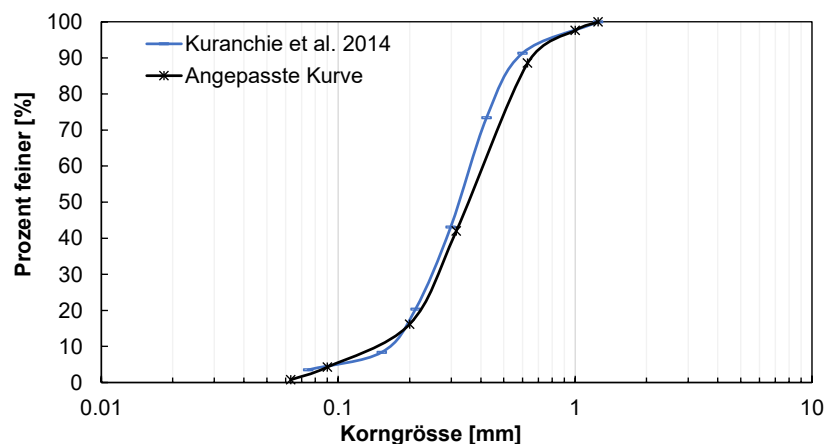


Abb. 30 Eigene, angepasste Sieblinie und die Perth Sand Sieblinie von [40].

Tab. 6 zeigt die Anteile der jeweiligen Körnung, die zum Erhalt der Perth Sieblinie verwendet wurden.

Tab. 6 Körnungen der Quarzsande und verwendete Massen	
Quarzsand Körnung	Gewichts-%
A 0.06 - 0.25	15
A 0.06 - 0.3	15
A 0.1 - 0.6	50
A 0.3 - 0.9	15
A 0.7 – 1.2	5

4.2.3 Bodenlösungen

Zur Tränkung des Sandes wurden zwei verschiedene Bodenlösungen gemäss Angaben der Schweizerischen Gesellschaft für Korrosionsschutz (SGK) ausgewählt und eine zusätzliche, stark korrosive Lösung. Bodenlösung BL1 und BL1_{mod} entsprechen üblichen Bodenporenwässern des schweizerischen Mittellandes. Bodenlösung BL2 entspricht dem Bodenporenwasser im Bereich von Thermalquellen aus dem Aargau (Säckingen) gemäss [46]. Tab. 7 zeigt die Zusammensetzung aller Bodenlösungen, wobei die später ausgeschlossene Bodenlösung mit * gekennzeichnet ist.

Tab. 7 Zusammensetzung der Bodenlösungen (BL)			
Zusammensetzung	BL1	BL1_{mod} *	BL2
pH [-]	8.63	9.06	7.85
S [mS/m]	140	181	> 20000
Cl ⁻ [mg/L]	177	177	8083
SO ₄ ²⁻ [mg/L]	495	480	1825
Na ⁺ [mg/L]	409	57	4805
HCO ₃ ²⁻ [mg/L]	153	153	0
Ca ²⁺ [mg/L]	0	200	1082
Mg ²⁺ [mg/L]	0	61	3

Zur Wahl und Bestimmung der Leitfähigkeit der Böden wurde in eine mit ofengetrocknetem Perth Sand gefüllten Soil-Box (ofengetrocknet) Leitungswasser bzw. Bodenlösung dazu titriert und jeweils der elektrische Widerstand gemessen. In Abb. 31 (a) ist der elektrische Widerstand dem Sättigungsgrad nach Gl. 15 gegenübergestellt. Anhand des Widerstands wurde die Korrosivität des Bodens gemäss Tab. 2 beurteilt.

$$S_d = \frac{w_{ist} - w_{105}}{w_{ges} - w_{105}} \quad \text{Gl. (15)}$$

In Gl. (15) ist S_d der Sättigungsgrad, w_{105} das Gewicht nach Ofentrocknung bei 105 °C bis Massekonstanz, w_{ges} das Gewicht nach Sättigung und w_{ist} ist das Gewicht nach Zugabe einer bestimmten Menge Bodenlösung.

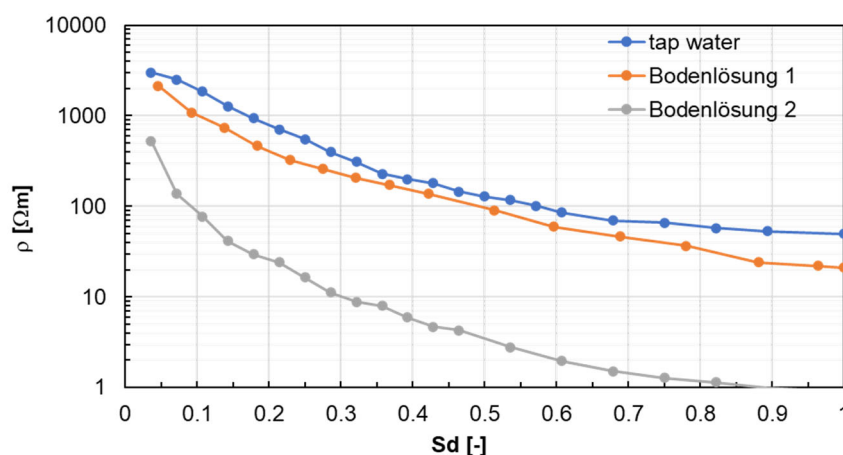


Abb. 31 Elektrischer Bodenwiderstand in Abhängigkeit vom Sättigungsgrad bei verschiedenen Bodenlösungen und Leitungswasser (tap water).

Gemäss Abb. 31 ist die Bodenlösungen BL1 nur wenig aggressiver als Leitungswasser. Bodenlösung BL2 wies bereits ab einem Sättigungsgrad von 0.1 einen elektrischen Widerstand von $< 100 \Omega m$ auf. Für die Befüllung der Sandkisten wurden anhand Abb. 31 die in Tab. 8 zusammengestellten Sande gewählt. Bei Box 1 und 2 wurde die gleiche Bodenlösung (BL1) gewählt, jedoch mit einem unterschiedlichen Sättigungsgrad.

Tab. 8 Nummer der Sandkiste (Box) mit Angaben zur Korrosivität der Sande

Sandkiste (Nr.)	Box 1	Box 2	Box 3
Korrosivität Ziel	Mittel bis korrosiv	Mittel bis korrosiv	stark korrosiv
Gewählte Bodenlösung	BL1	BL1	BL2
Sättigungsgrad aus Abb. 30	0.7	0.9	0.65
Max. elektrischer Widerstand	40 Ωm	20 Ωm	2 Ωm

Im Verlauf der Auslagerung wurde der spezifische Widerstand der Sandfüllung mittels Vierpunkt-Widerstandsmessung überwacht (Details siehe Kapitel 4.2.5). Abb. 32 zeigt die gemessenen spezifischen Elektrolytwiderstände der drei Sandboxen.

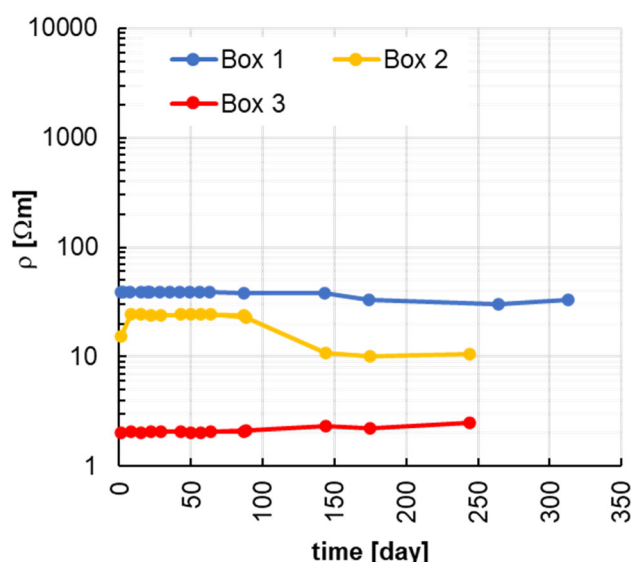


Abb. 32 Zeitliche Überwachung des spezifischen Bodenwiderstands in den Boxen.

Mit Ausnahme von Box 2 ist der spezifische elektrische Widerstand weitgehend konstant über die Auslagerungszeit. In Box 2 nahm der spezifische elektrische Widerstand ab. Dies ist auf einen Wechsel des Sandmaterials zurückzuführen, da die Kathodenmatten infolge

Korrosion an den Punktschweissungen ausgetauscht werden mussten. Anstelle von Schweissverbindungen wurden Bindedrähte aus nichtrostendem Stahl verwendet.

4.2.4 Pfahlkonfigurationen und Schutzstufen

Mikropfähle der Schutzstufe 2a mit und ohne Kupplung wurden von der Firma Stahlton AG geliefert. Das äussere Hüllrohr und die äussere Zementumhüllung wurden von der TFB AG durchgeführt. Mikropfähle der Schutzstufe 1 und 2b wurden bei der TFB AG durchgeführt. Für die äussere Umhüllung (Schutzstufe 2a) bzw. die Umhüllung wurde die Mischung Mix 06 (CEM I mit Hydrolith $w/b = 0.6$) verwendet. Abb. 33 zeigt die Herstellung.



Abb. 33 (a) Herstellung Schutzstufe 1 (SS1), (b) Schutzstufe 2 (SS2a) mit Kunststoffhüllrohr und exzentrische Lage des Stahltragglieds, (c) Proben der Schutzstufe SS2b (nicht-rostender Stahl) hergestellt mit Bewehrungsstäben der Korrosionswiderstandsklasse KWK 1 [15].

Abb. 34 zeigt die Vorrichtung zur Herstellung der Mikropfähle (a) und zur Sicherstellung der zentrischen Lage der Bewehrung bei Schutzstufe 1 und 2b (b) bzw. der exzentrischen Lage für die Schutzstufe 2a (c).

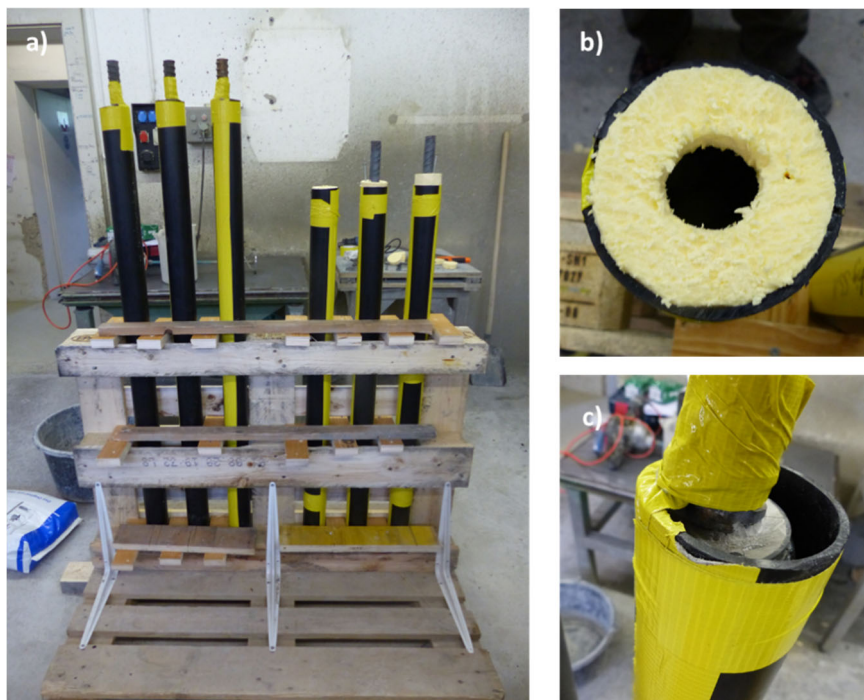


Abb. 34 Vorrichtung zur Herstellung der Mikropfähle (a) und zur Sicherstellung der zentrischen Lage der Bewehrung bei der Schutzstufe 1 und 2b (b) bzw. exzentrischen Lage bei der Schutzstufe 2a (c).

Alle Stähle der Schutzstufen 2a/b und 1 wurden mit einer kreisförmigen Fehlstelle mit Durchmesser 2 cm² eingebaut, vgl. Abb. 35. Die Fehlstellen wurden mittels einer Bohrmaschine ohne Schlagfunktion erstellt.



Abb. 35 Künstliche Fehlstellen in Mikropfählen (a) SS1, (b) SS2a (Hüllrohr entfernt) und (c) SS2b.

Ferner wurden Kupplungsstellen untersucht. Dazu wurde die Kupplung nach Herstellervorgaben mit dem bereitgestellten Schrumpfschlauch überzogen. Drei der vier verwendeten Kupplungen wurden mit einer Fehlstelle (einen Schnitt von 3 cm Länge) eingesetzt und eine Kupplung ohne Fehlstelle. Abb. 36 zeigt (a) die Kupplung ohne Schrumpfschlauch und (b) die Kupplung mit Schrumpfschlauch und Fehlstelle (Schnittstelle auf der Oberseite). Tab. 9 fasst zusammen welche Mikropfähle je Sandbox ausgelagert wurden.

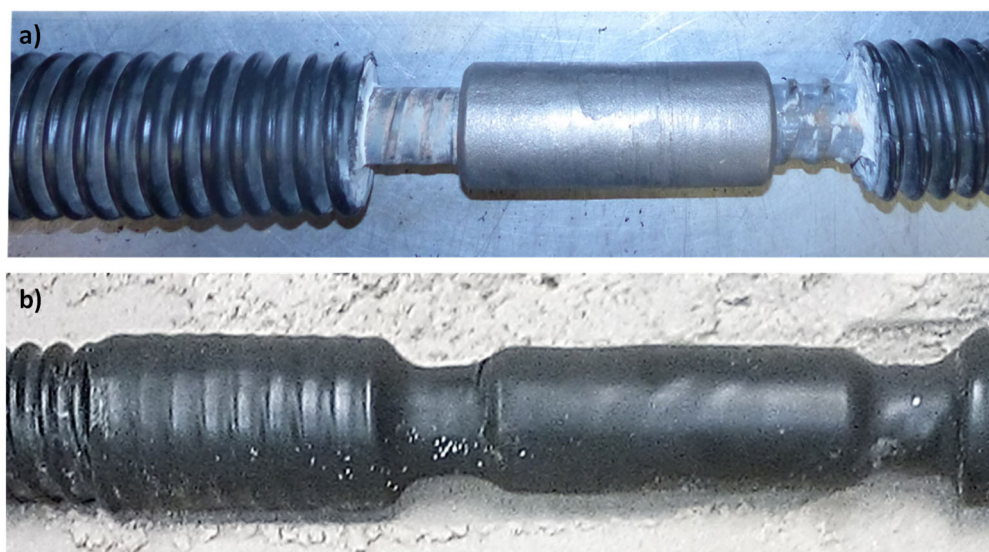


Abb. 36 Schutzstufe 2a (a) Kupplung ohne Schrumpfschlauch (b) Kupplung mit Schrumpfschlauch.

Tab. 9 Nummer der Sandkiste (Box) mit Korrosivität des Bodens und Art sowie Anzahl der Mikropfähle

Sandkiste (Nr.)	Box 1	Box 2	Box 3
Korrosivität Ziel	Mittel bis korrosiv	Mittel bis korrosiv	Stark Korrosiv
Pfahl 1	SS1 mit Fehlstelle $\varnothing = 2\text{cm}^2$	SS1 mit Fehlstelle $\varnothing = 2\text{cm}^2$	-
Pfahl 2	SS2a exzentrisch mit Fehlstelle $\varnothing = 2\text{cm}^2$	SS2a exzentrisch mit Fehl- stelle $\varnothing = 2\text{cm}^2$	SS2a exzentrisch mit Fehlstelle $\varnothing = 2\text{cm}^2$
Pfahl 3	Kupplung mit Fehlstelle $L = 2\text{cm}$	Kupplung mit Fehlstelle $L = 3\text{cm}$	Kupplung mit Fehlstelle $L = 3\text{cm}$
Pfahl 4	-	SS2b mit Fehlstelle $\varnothing = 2\text{cm}^2$	Kupplung
Kathode	Kathodenfläche: 13949 cm^2		

4.2.5 Verwendete Messtechnik

Die Bewehrungsmatte in jeder Box diene als Fremdkathode (simulierte Fundamentbewehrung), gegen welche die Korrosionsströme (Makroelementströme) der Pfähle gemessen wurden (Abb. 37 (c)). Die Messung und Aufzeichnung des Makroelementstroms erfolgte pro Sandbox mit je einem Datenlogger «DS-Log4.0» der TFB Diagnostic AG, Abb. 37 (a) und (b). Es handelt sich dabei um eine spezielle elektronische Schaltung, die eine widerstandsfreie Strommessung erlaubt, womit eine unzulässige Beeinflussung des Korrosionssystems verhindert wird. Die Datenlogger waren über einen Raspberry Pi Einplatinencomputer mit dem Labor-Netzwerk (LAN) verbunden.

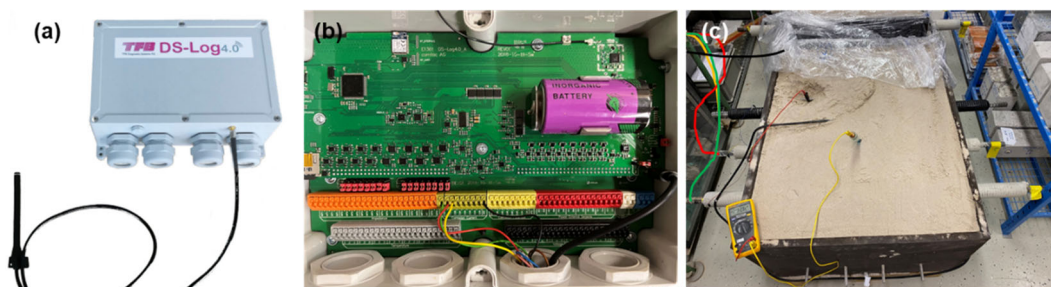


Abb. 37 Korrosionsmonitoring (a) DS-Log4.0 (b) Verkabelung der Mikropfähle (grün, rot, gelb) bzw. Gegenelektrode (schwarz) im DS-Log4.0 und (c) Box mit Verkabelung der Mikropfähle und der Gegenelektrode sowie Messung des Korrosionspotenzials.

Die periodische Messung des spezifischen Widerstands der feuchten Sandfüllung wurde mittels 4-Punkt-Widerstandsmessung nach Wenner durchgeführt. Als Elektroden dienten vier Stangen aus nichtrostendem Stahl, die im Sand eingegraben waren. Abb. 38 (b) zeigt die Durchführung einer 4-Punkt-Messung mit dem Geohm-Wechselstromwiderstandsgerät (Erdungsmessgerät).

Die Berechnung des spezifischen Widerstands aus dem gemessenen Widerstand erfolgte mit Gl. (1).

$$\rho_E = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R \quad \text{Gl. (16)}$$

ρ_e ist der spezifische Bodenwiderstand in Ωm , a ist der Abstand zwischen den nichtrostenden Bewehrungsstäben in der Box in m und R ist der gemessene Widerstand in Ω .

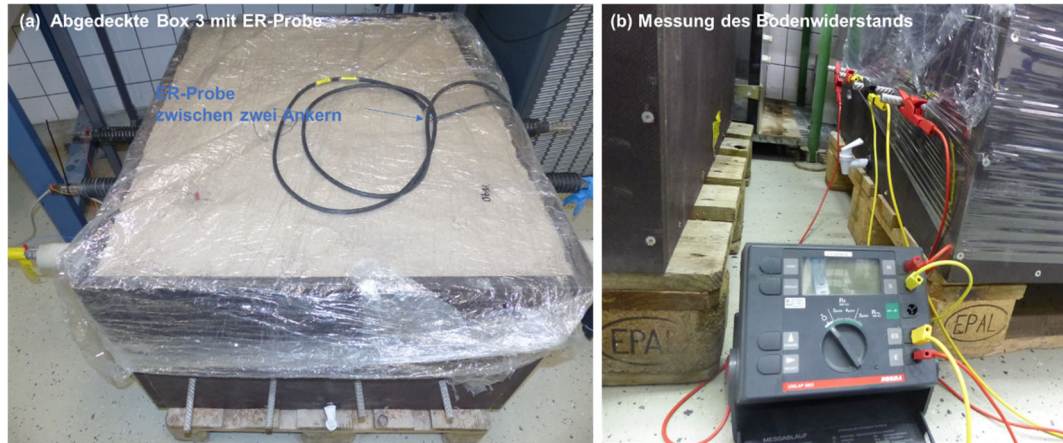


Abb. 38 (a) ER-Probe in Box 3 und (b) Vierpunkt-Widerstandsmessung mit dem Erdungsmessgerät Geohm.

Weiter wurde in jeder Box eine ER-Probe zur Messung der Eigenkorrosion (Stahlkorrosion im Boden ohne Einfluss eines Makroelements) eingebaut, Abb. 38 (a). Details zu den ER-Proben finden sich in Kapitel 4.2.7.

4.2.6 Soil Box

Für die Messung des spezifischen Widerstands von Bodenproben wird eine sogenannte Soil Box verwendet, wie sie in Abb. 39 (a) zu sehen ist. Die Box wird gemäss Abb. 39 (b) mit dem Bodenmaterial befüllt und anschliessend der Widerstand des Bodens mittels 4-Punkt-Messung bestimmt, Abb. 39 (c). Die Umrechnung auf den geometrieunabhängigen, spezifischen Wert erfolgt gemäss mittels Geometriefaktor der Soil Box (abhängig von der Anordnung und vom Abstand der Messelektroden).

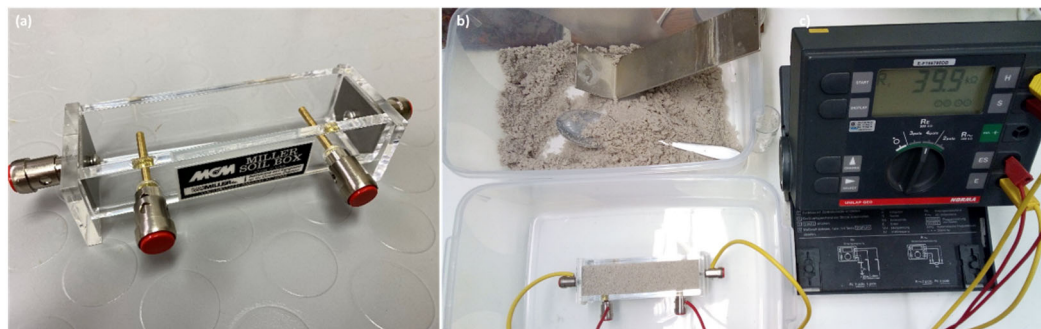


Abb. 39 (a) Foto Soil Box (b) Sand oben und befüllte Soil Box unten (c) Geohm Messung

4.2.7 ER Probes

Elektrische Widerstand-Sonden (ER Probes - **E**lectrical **R**esistance Probes) werden hauptsächlich im Boden angewendet und dienen der Korrosionsanalyse von Defektstellen in der Kunststoffbeschichtung von Rohrleitungen, wie z.B. kathodisch geschützte Gas- oder Ölleitungen. Solche Sensoren können auch in Stahlbetonbauteilen eingebaut werden. Das Messprinzip besteht darin, dass eine im Boden exponierte Stahlprobe (häufig auch Coupon genannt) infolge Korrosion einen Dickenabtrag erfährt, der mittels einer Widerstandsveränderung abgeschätzt werden kann. Infolge des Querschnittsverlustes der Stahlprobe nimmt der elektrische Widerstand bei Durchleitung eines definierten Messstroms zu. Die Steigung des Korrosionsabtrags über die Zeit entspricht der Korrosionsgeschwindigkeit [44].

Bei dieser Forschungsarbeit wurden drei ER Probes der Firma MetriCorr ApS, Dänemark, verwendet, d.h. ein Sensor pro Auslagerungsbox (Abb. 40). Die Stahloberfläche betrug 1

cm², die Dicke des Stahlplättchens 100 µm. Die Messungen wurden mit einem passenden Messgerät, ebenfalls von MetriCorr, in Abständen von ca. 0.5 bis 4.5 Monaten durchgeführt. Die maximale Auslagerungszeit in der Box 1 betrug rund 1.5 Jahre.



Abb. 40 ER Probe (ERv2) von MetriCorr.

In der Arbeit von [44] wurden die Ergebnisse von ER Probes mit den Resultaten von anderen elektrochemischen Methoden (LPR, EIS, Gewichtsverlust) verglichen. Generell konnte eine gute Übereinstimmung zwischen den verschiedenen Messtechniken bestätigt werden. Die Differenzen bei den Korrosionsraten mit ER Probes und anderen Methoden lagen durchwegs unter 45% (gilt für die beiden Fälle von gleichmässiger und lokaler Korrosion). Tendenziell werden die Korrosionsraten mit den ER Probes etwas unterschätzt. Im Bericht werden auch Vorschläge zur Optimierung der ER Probes gemacht. Insbesondere bei gleichmässiger und eher langsamer Korrosion sollte die Probenlänge vergrössert werden, um die Auflösung der Messungen zu verbessern.

4.2.8 Widerstandsmessungen (Dichtigkeit Hüllrohr)

Gemäss [17] ist bei den Schutzstufen 2a und 3a nach dem Einbau und Injizieren der Mikropfähle und ungespannten Anker die Dichtigkeit des Hüllrohrs (Wirksamkeit des Korrosionsschutzes) mit der elektrischen Widerstandsmessung I zu prüfen (Abb. 41). Es handelt sich dabei um die gleiche Prüfung wie bei den gespannten Ankern. Die Widerstandsmessung erfolgt mit einem Isolationsmessgerät und 500 V Gleichspannung zwischen Zugglied und einer geerdeten Struktur. Dafür kommen z.B. erdfähige Stahlbetonkonstruktionen wie Bohrpfähle oder grosse Fundamente, Bahnschienen oder metallische Leitungen ohne Beschichtung in Frage. Sind keine solchen Strukturen vorhanden, kann behelfsmässig auch eine ca. 30 bis 50 cm tief in den Boden gerammte Erdungselektrode (Hilfserder) verwendet werden. In der Praxis kann häufig beobachtet werden, dass anstelle eines Hilfserders lediglich der Bananenstecker vom Messkabel auf die Bodenoberfläche gedrückt wird. Dieses Vorgehen ist nicht korrekt und führt in der Regel zu falschen, d.h. zu hohen Messergebnissen. Als Grenzwert wurde ein Gleichstromwiderstand I von $\geq 0.1 \text{ M}\Omega$ (100 k Ω) festgelegt.

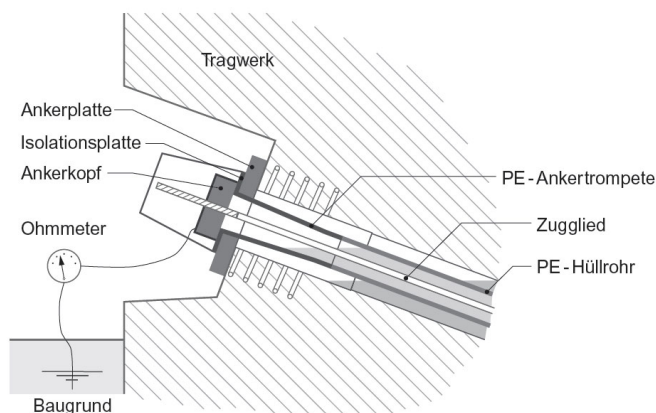


Abb. 41 Elektrische Widerstandsmessung I am gespannten Anker

Mit zunehmender Dichtigkeit des Kunststoffhüllrohrs steigen die Widerstände stark an. Bei nahezu perfekter Dichtigkeit liegen sie über 100 M Ω . Es stellt sich deshalb die Frage, welcher Fehlstellengrösse der Grenzwert von 100 k Ω entspricht.

Um dies abzuklären, wurden Widerstandsmessungen an einem isolierten Pfahlabschnitt mit variabler Fehlstellengrösse (Durchmesser 1.6 bis 6 mm) durchgeführt. Als Messgerät kam ein Metriso 500 VW zum Einsatz. Die Fehlstellen wurden mit Hilfe von Stahlbohrern mit variablem Durchmesser erzeugt. Nach jeder Messung wurde der Pfahl im Bereich der Fehlstelle ausgegraben und diese dicht verschlossen. Jede Fehlstelle wurde mit einer frischen Bohrung erstellt. Als Erdungsstruktur wurde die gesamte Kathode (Bewehrungsnetz) aus nichtrostendem Stahl verwendet.

Messresultate

In der Abb. 42 ist der Zusammenhang zwischen Fehlstellengrösse (Durchmesser) und gemessenem Isolationswiderstand im logarithmischen Massstab dargestellt. Es ist ersichtlich, dass sich der Widerstand der Fehlstelle bei einem Durchmesser von 1 bis 10 mm um mehrere Grössenordnungen ändert, was auf eine hohe Empfindlichkeit der Messung schliessen lässt. Der Grenzwert von 100 k Ω entspricht einem Loch von rund 2 mm Durchmesser, was einer Fläche der Fehlstelle von 3.1 mm² entspricht. Im Fall von zwei Löchern mit gleicher Fläche beträgt der Durchmesser 1.4 mm pro Loch. Solch kleine Fehlstellen können aus Sicht der Praxis akzeptiert werden, ohne die Nutzungsdauer des Pfahls ernsthaft zu gefährden. Bei einem 10-fach kleineren Widerstand ändert sich die Fehlstellengrösse geringfügig von rund 2 auf 3 mm. Ab etwa 4 mm flacht die Widerstandskennlinie sichtbar ab. Bei grösseren Fehlstellen von mehr als 10 mm Durchmesser liegen die Widerstände im Bereich von wenigen Ohm und ändern sich nicht mehr stark, was den Erfahrungen aus der Praxis entspricht. Bei solchen tiefen Widerständen ist eine korrekte Messung oft nicht mehr möglich und das Messgerät signalisiert akustisch einen Kurzschluss. Aufgrund dieser Resultate kann, zumindest für unproblematische Böden (Kies- oder Grobsand-Gemische), eine Absenkung des Grenzwerts von 100 auf 10 k Ω in Betracht gezogen werden, was eine einfachere Handhabung solcher Kontrollmessungen auf der Baustelle zur Folge haben kann. Bei Böden mit tiefen spezifischen Bodenwiderständen unter ca. 10 Ω m (Lehm, Silt, Pfähle im Grundwasser) kann zur Minimierung des Korrosionsrisikos ein Prüfwert über dem bestehenden Grenzwert von 100 k Ω gefordert werden.

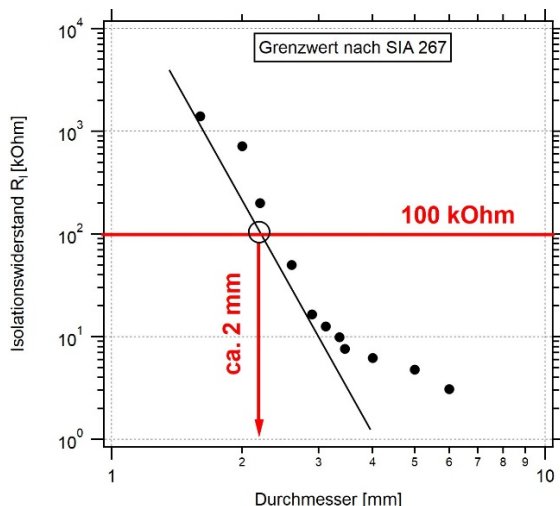


Abb. 42 Ergebnisse der elektrischen Widerstandsmessung I am Mikropfahl mit Schutzstufe 2a

4.2.9 Korrosionspotenzial, Eigenkorrosion und Makroelementkorrosion

Abb. 43 zeigt die gemessenen Korrosionspotenziale, gemessen gegen die Cu/CuSO₄ Elektrode im Oktober 2022. Um Polarisierungseffekte auszuschliessen, wurde die Kathode 24 Stunden vor der Potenzialmessung von den Pfählen getrennt.

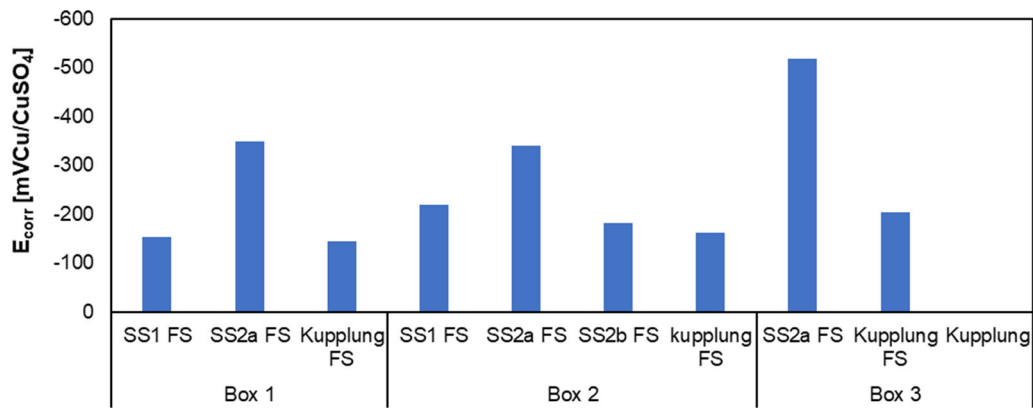


Abb. 43 Korrosionspotenziale der verschiedenen Mikropfähle

Anhand der Korrosionspotenziale sind nur bei den Pfählen mit Schutzstufe 2a deutliche Hinweise auf Korrosion vorhanden ($U < -300 \text{ mV}_{\text{CSE}}$). Das Korrosionspotenzial der Schutzstufe 2a liegt in Box 1 und Box 2 auf ähnlichem Niveau und ist in Box 3 signifikant tiefer, was auf die stärkere Korrosivität der Bodenlösung zurückzuführen ist. Die Korrosionspotenziale der Schutzstufe 1 sind leicht negativ, wobei das Korrosionspotenzial in Box 2 etwas negativer ist, als in Box 1. Gleiches gilt für die Kupplungen mit Fehlstelle (FS). Klare Potenzialtrichter über den Korrosionsstellen konnten bei den Messungen an der Bodenoberfläche nicht festgestellt werden. Der Grösse des Potenzialwerts war praktisch unabhängig vom Elektrodenstandort. Für eine klare Aussage zum Korrosionszustand von Mikropfählen ist die Potenzialmessung, im Gegensatz zu Stahlbetonbauten, nicht geeignet bzw. nicht ausreichend. Das Korrosionspotenzial wird durch die Umgebungsbedingungen (Wassergehalt des Bodens, Sauerstoffgehalt) massgebend beeinflusst, was zu falschen Interpretationen bezüglich des Korrosionszustands führen kann.

Eigenkorrosion / ER-Proben

Abb. 44 zeigt den Verlauf der Eigenkorrosion über die Auslagerungszeit anhand der ER-Proben. Bei der Box 2 und Box 3 konnten bereits vor Ablauf der Auslagerung (rund 1.5 Jahre) keine Werte mehr gemessen werden, was darauf schliessen lässt, dass das Probeblech abkorrodiert ist. Messtechnisch gesehen, werden die zunehmenden Blechwiderstände auf einen mittleren Stahlabtrag umgerechnet. Unter Annahme eines linearen Korrosionsverlaufs wurde durch Regression an den gemessenen Abtrag die Korrosionsrate in mm/Jahr ermittelt. Dabei ist die Korrosionsrate die angegebene Steigung der Regressionsgerade.

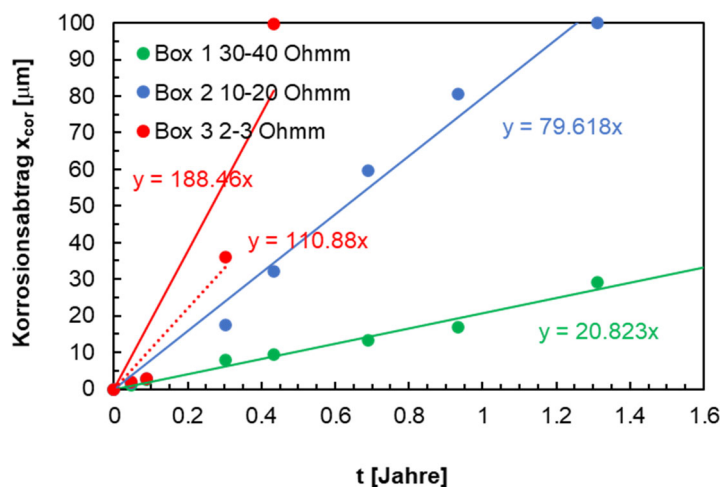


Abb. 44 Abtrag infolge Eigenkorrosion aus ER-Proben

Wie Abb. 45 zeigt, entspricht die Annahme eines gleichmässigen Abtrags nicht den effektiven Verhältnissen. Abb. 45 zeigt exemplarische Bilder der ER-Proben nach dem Ausbau aus (a) Box 2 und (b) Box 3. Die unteren Fotos zeigen die Proben im Zustand unmittelbar nach dem Ausbau und oben die effektiv abkorrodierte Fläche nach Reinigung der Proben. Es ist zu erkennen, dass das Stahlblech teilweise komplett wegkorrodiert ist, während es an anderen Stellen noch intakt ist. Diese lokalen Unterschiede sind auf sogenannte Belüftungselemente zurückzuführen. Ein Belüftungselement ist ein Korrosionselement, bei dem die Potenzialdifferenz von einem Unterschied der Sauerstoffkonzentration in der Nähe bzw. an der Oberfläche der Elektroden herrührt. Es ist deshalb zu vermuten, dass die Widerstandsänderung bei der Messung der Probe nicht nur vom Dickenabtrag bestimmt wird, sondern auch vom sich ändernden Querschnitt über die Länge der Probe (Strompfad). Es ist deshalb davon auszugehen, dass die Widerstandsmessung zwar einen mittleren Abtrag liefert, lokal jedoch höhere Korrosionsgeschwindigkeiten vorhanden sind und demzufolge der Abtrag in die Tiefe tendenziell unterschätzt wird. Eine Quantifizierung dieser maximalen Korrosionsgeschwindigkeit ist aufgrund der vorhandenen Daten nicht möglich.

Die ER-Probe der Box 3 zeigt nach dem Ausbau grössere Bereiche, wo der Stahl vollständig wegkorrodiert ist, als die ER-Probe der Box 2. Dies dürfte auf die höhere Korrosivität der Bodenlösung zurückzuführen sein.

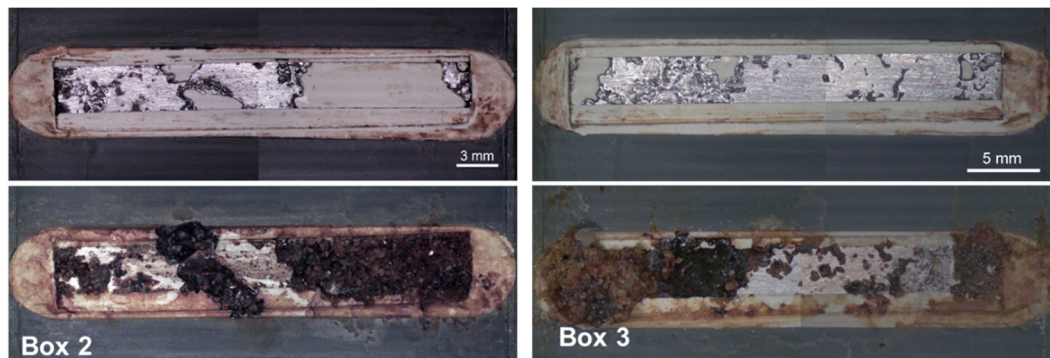


Abb. 45 ER-Proben nach Ausbau, links Box 2 und rechts Box 3.

Makroelementkorrosion und Korrosionsabtrag

Abb. 46 zeigt (a) die Makroelementströme (Stromfluss zwischen Mikropfahl und Kathodennetz) während der Auslagerung, wobei die Stromstärke unter Berücksichtigung der bekannten Fehlstellengrösse auf eine Korrosionsstromdichte umgerechnet wurde. Die Stromstärke kann mit Hilfe des Faraday'schen Gesetzes, Gl. (17) in einen Massverlust (m) umgerechnet werden. Beteiligt sind darin die molare Masse M , die Stromstärke I , die Zeit t , die Faraday Konstante F ($= 96'485 \text{ s} \cdot \text{A/mol}$) und die Wertigkeit z ($= 2$).

$$m = \frac{M \cdot I \cdot t}{z \cdot F} \quad \text{Gl. (17)}$$

und anschliessend mittels der Fehlstellengrösse und Gl. (18) in eine Abtragstiefe umgerechnet werden, welche in Abb. 46 (b) grafisch dargestellt ist. Hierin sind

$$x_{\text{corr}} = 11.6 \cdot \frac{I_{\text{corr}}}{A_a} \quad \text{Gl. (18)}$$

Hierin sind x_{corr} der Korrosionsabtrag, I_{corr} der Korrosionsstrom und A_a die Anodenfläche.

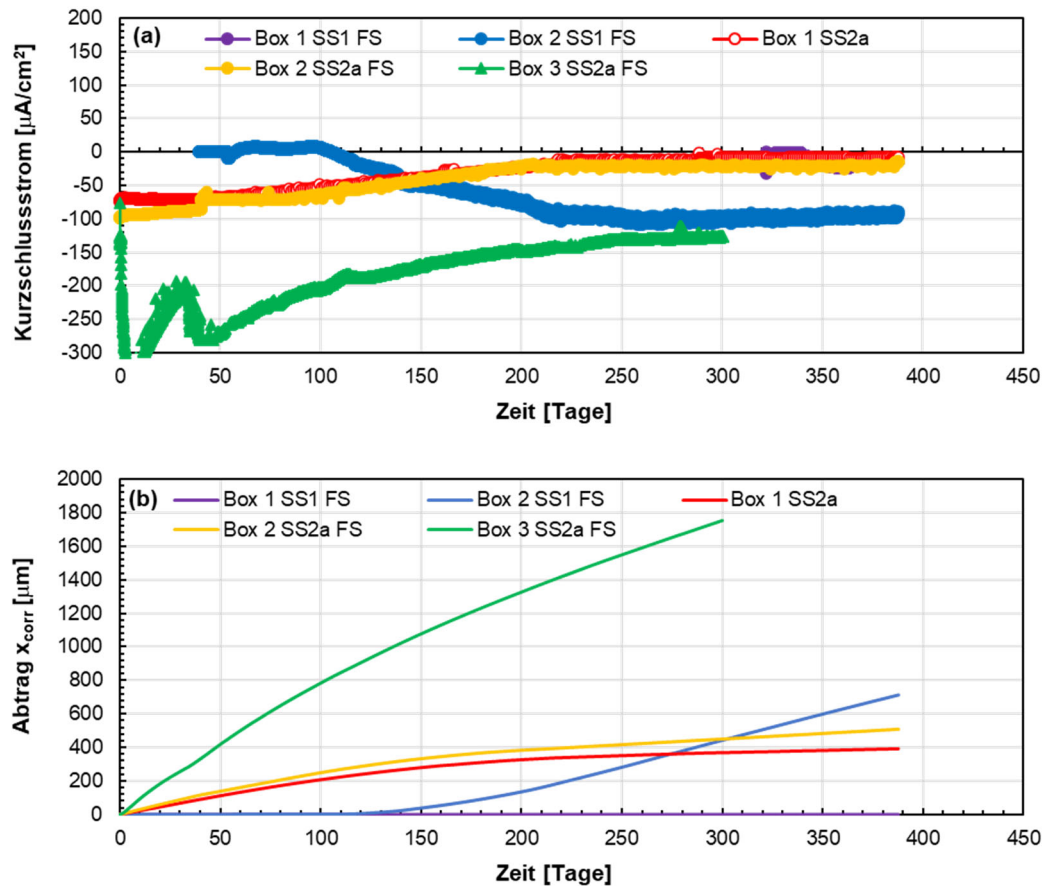


Abb. 46 Korrosionsmonitoring in den Auslagerungsversuchen (a) Korrosionsströme (Makroelementkorrosion Pfahl - Bewehrungsnetz) bezogen auf die Fehlstellengrösse 2 cm^2 und (b) der Korrosionsabtrag aus den kumulierten Strömen. SS = Schutzstufe, FS = Fehlstelle.

Die höchste Stromstärke bzw. den höchsten Abtrag weist der Mikropfahl Schutzstufe 2a mit Fehlstelle in Box 3 (korrosivste Umgebung) auf, gefolgt von derselben Pfahlart in Box 2 (mittel korrosive Bodenlösung mit erhöhtem Sättigungsgrad) und Box 1 (mittel korrosive Bodenlösung mit geringem Sättigungsgrad). Da sich die Umgebungsbedingungen zwischen Box 1 und Box 2 nur im Sättigungsgrad des Sands unterscheiden, sind die Unterschiede beim Korrosionsabtrag ebenfalls gering. Der Mikropfahl mit Schutzstufe 1 wurde sowohl in Box 1 als auch in Box 2 zu einem späteren Zeitpunkt mit der Bewehrung verbunden, um eine gegenseitige Beeinflussung der Korrosionsprozesse zu verhindern. Es ist erkennbar, dass der Abtrag in Box 2 ansteigt und sich anschliessend stabilisiert. In den drei Fällen mit Schutzstufe 2a und Fehlstelle ist im Laufe der Zeit eine langsame Abnahme des Makroelementstroms vorhanden. Dies kann möglicherweise auf eine gewisse Sauerstoffverarmung an der Kathode (Bewehrungsnetz) und/oder eine Widerstandserhöhung infolge der Bildung von festen Korrosionsprodukten an der Anode zurückzuführen sein. Gegen die Sauerstoffarmut spricht die deutliche Zunahme des Korrosionsfortschritts am Pfahl mit Schutzstufe 1 und Fehlstelle in Box 2.

4.2.10 Ausbau der Mikropfähle und Analyse der Korrosionsangriffe

Nach rund 1.5 Jahren wurden die Pfähle sorgfältig ausgebaut und der Korrosionszustand an den Fehlstellen und Kupplungen untersucht. Beim Ausbau wurde zuerst der Sand bis zur oberen Kathodenfläche (Bewehrungsmatte aus nichtrostendem Stahl) freigelegt und diese oben und seitlich entfernt. Danach erfolgte der Abtrag des Sandes schrittweise bis zum Mikropfahl, um die Ausbreitung etwaiger Korrosionsprodukte zu dokumentieren. Im Anschluss wurden die Pfähle entnommen, die Ummantelung entfernt und die Korrosionsstelle mikroskopisch untersucht.

Abb. 47 zeigt die stufenweise Abtragung des Sandes über den Mikropfählen in Box 1 und Box 2. Oberhalb der Fehlstelle vom Mikropfahl Schutzstufe 1 in der Box 1 sind keine Korrosionsprodukte auffindbar, während oberhalb des Mikropfahls in Box 2 ab 4 cm Abstand zur Fehlstelle deutliche Korrosionsspuren bzw. Rostablagerungen erkennbar sind. Die seitliche Ausbreitung der Rostbildungen liegt, vergleichbar mit der Ausbreitung Richtung Oberfläche, bei rund 3 cm um die Fehlstelle.

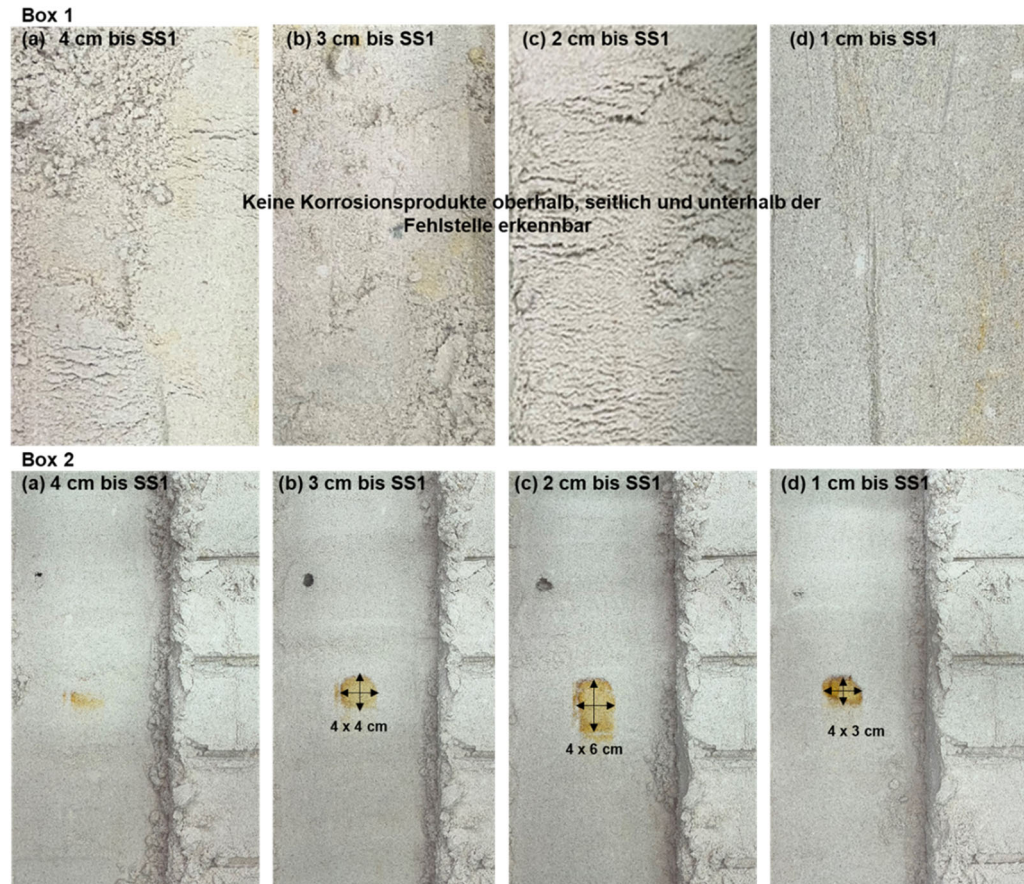


Abb. 47 Auftreten und Ausbreitung von Korrosionsprodukten im Abstand von 4 bis 1 cm oberhalb der Fehlstelle oben: Box 1, unten Box 2. SS = Schutzstufe.

Abb. 48 zeigt die ausgebauten Mikropfähle mit Schutzstufe 1 und die freigelegten Stahlstäbe. In den oberen Bildern ist der Pfahl aus Box 1 (Korrosivität des Bodens: mittel) und unten der Pfahl aus der Box 2 (Boden: mittel bis stark korrosiv) dargestellt. Die Fotos von links nach rechts (a) nach (d) zeigen die Pfähle in der Box bis hin zum freigelegten Bewehrungsstab. Am Zugglied aus der Box 1 ist lediglich eine oberflächliche Korrosion in der Fehlstelle erkennbar, was primär auf die kurze Korrosionsphase zurückzuführen ist. Hingegen ist am Tragglied aus Box 2 ein ausgeprägter Korrosionsangriff mit deutlichem Stahlabtrag vorhanden. Aufgrund der ovalen Form der Korrosionsstelle hat in Längsrichtung des Mikropfahls eine leichte Unterrostung von 2 mm Länge stattgefunden.

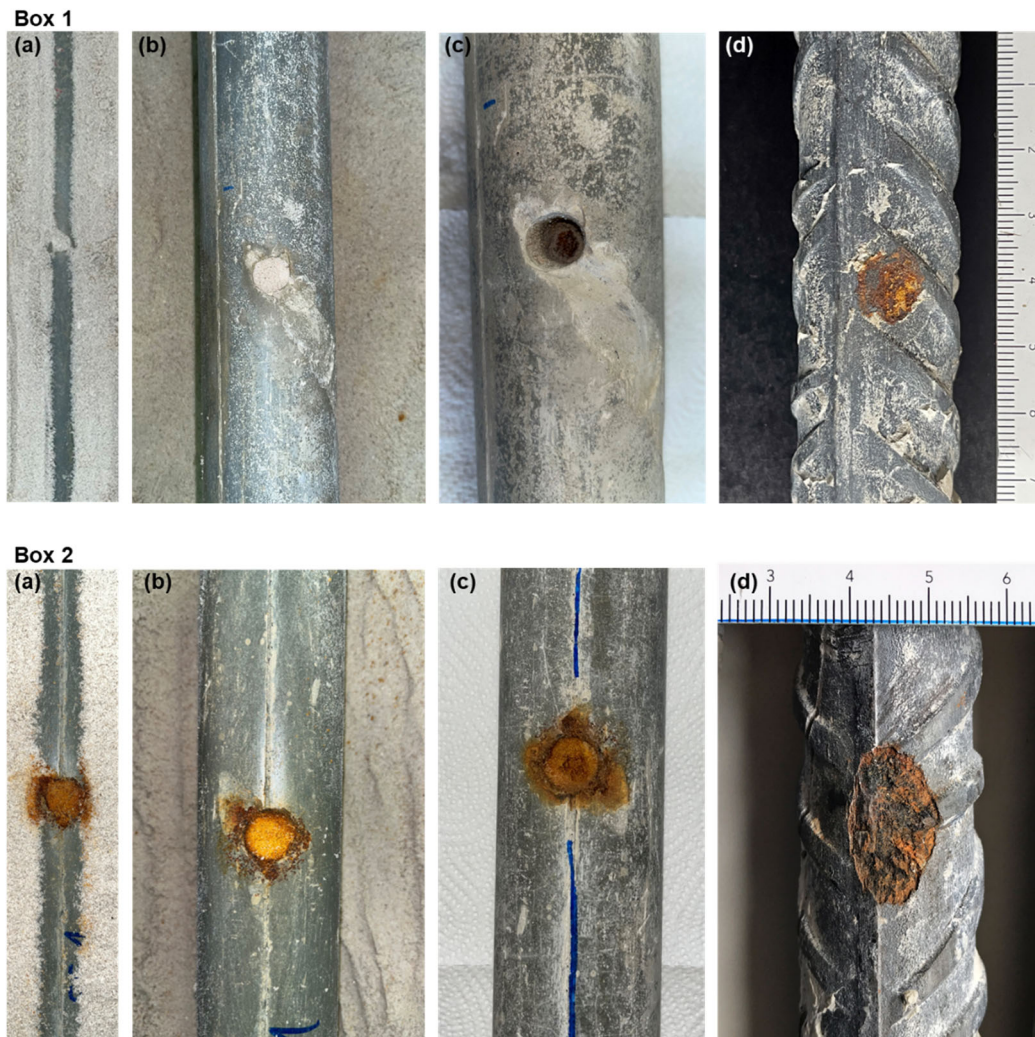


Abb. 48 Mikropfahl mit Schutzstufe 1 aus Box 1 und Box 2. (a) Situation auf Höhe Pfahl-oberfläche, (b) freigelegter Pfahl, (c) ausgebauter Pfahl, (d) freigelegte Pfahlbewehrung.

Die gleiche Vorgehensweise ist bei den Pfählen mit Schutzstufe 2a von Box 1, 2 und 3 in den Abb. 49 und Abb. 50 dokumentiert. Wie die einzelnen Bilder in Abb. 49 zeigen, sind in allen Boxen Korrosionsprodukte im Sand vorhanden, jedoch in unterschiedlichem Ausmass. Erste Rostablagerungen über der Fehlstelle sind in Box 1 rund 2 cm über der Fehlstelle sichtbar. Mit abnehmender Distanz zur Fehlstelle nimmt das Ausmass der Rostbildungen zu. Im Vergleich zu Box 1 verstärkt sich dies deutlich in Box 2 und 3. Demzufolge korreliert die Ausbreitung von Korrosionsprodukten deutlich mit dem elektrischen Bodenwiderstand. In Box 3 mit besonders korrosiven Verhältnissen breiten sich die Rostablagerungen auf Höhe der Fehlstelle bis auf eine Fläche von ca. 80 cm² aus, was auf die starke Wirkung des Makroelements zwischen Anode (Fehlstelle) und Bewehrungsnetz (Kathode) hinweist.

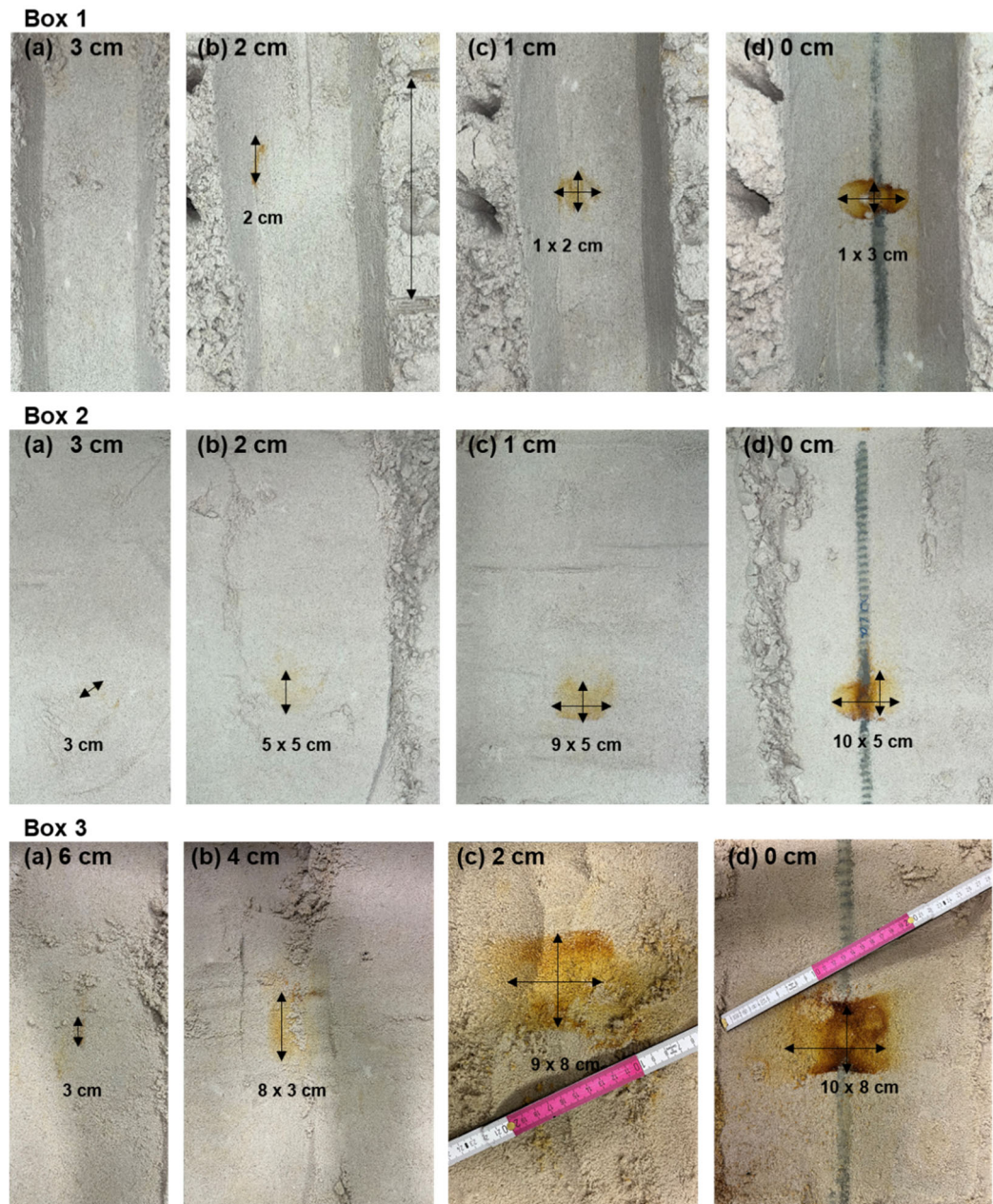


Abb. 49 Auftreten und Ausbreitung von Korrosionsprodukten in unterschiedlichem Abstand von der Fehlstelle für Mikropfähle der Schutzstufe 2a. Box 1 bis 3 von oben nach unten.

Abb. 50 zeigt den Ausbau der Mikropfähle der Schutzstufe 2a. Oben ist der Pfahl in Box 1, mittig der Pfahl der Box 2 und unten der Pfahl der Box 3 dargestellt. Die Fotos von links nach rechts (a) nach (d) zeigen die Pfähle in der Box bis hin zum freigelegten Bewehrungsstab. Aus Abb. 50 ist eine deutliche Zunahme der Korrosion von Box 1 nach Box 3 erkennbar. In allen drei Pfählen konzentriert sich die Korrosion auf die Fehlstelle. Eine signifikante Ausbreitung der Korrosion unterhalb des Hüllrohrs und der inneren Zementsteinumhüllung konnte nicht festgestellt werden.

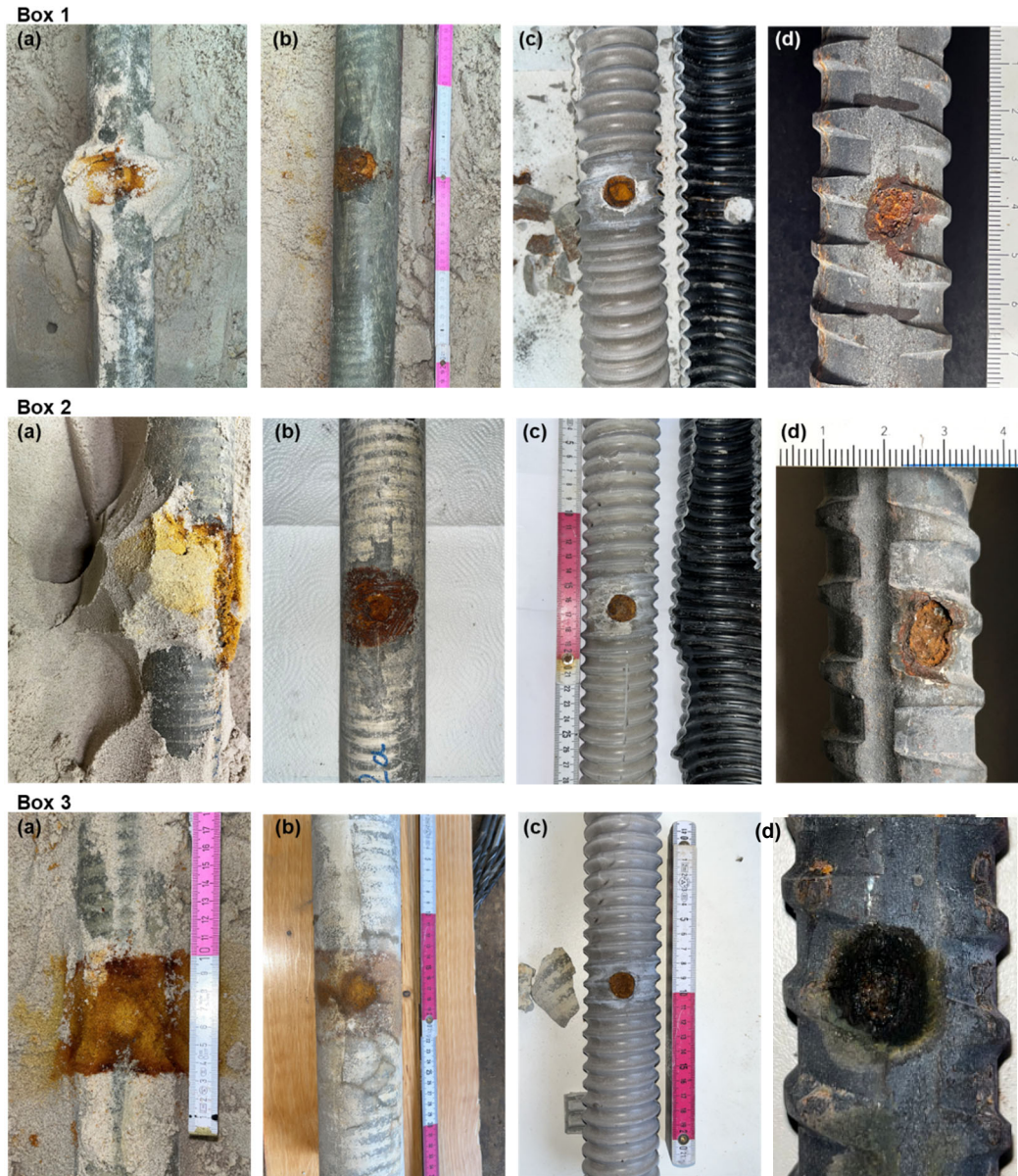


Abb. 50 Mikropfahl Schutzstufe 2a (a) auf Höhe Pfahloberfläche (b) freigelegter Pfahl (c) ausgebauter Pfahl (d) frei gelegte Pfahlbewehrung oben: aus Box 1 mittig: Box 2 und unten: aus Box 3.

Abb. 51 zeigt die Morphologie des Korrosionsangriffs an der Fehlstelle vom Mikropfahl mit Schutzstufe 2a aus Box 3. Die Angriffsform ist vergleichbar mit Lochkorrosion. Es ist zudem erkennbar, dass sich die Korrosionsstelle kavernenförmig bis in eine Tiefe von 8 bis 10 mm ausdehnt. Die Ansäuerung im Loch infolge der Korrosionsreaktion ist vermutlich ursächlich für diese Angriffsform. Bei den dunkelgrauen Zonen handelt es sich wahrscheinlich um Magnetit (Fe_3O_4), der sich auch bei chloridinduzierter Korrosion häufig bildet und auf Sauerstoffmangel in der Korrosionsstelle zurückzuführen ist.

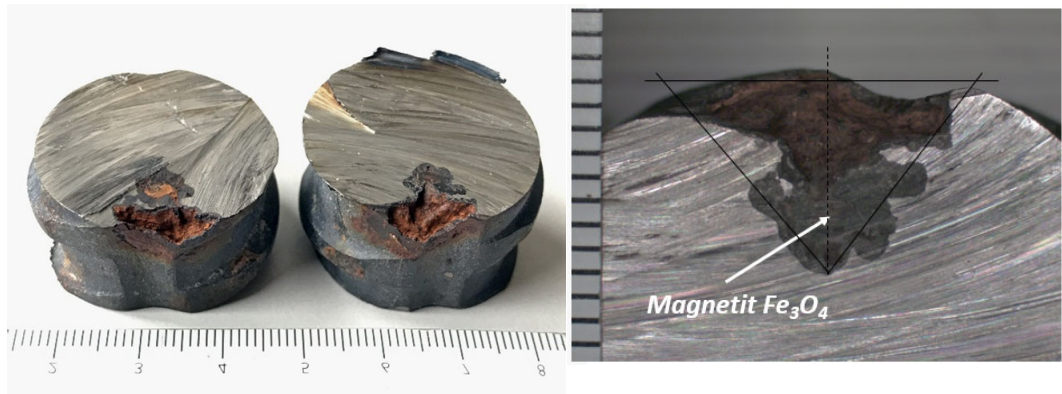


Abb. 51 Morphologie des Korrosionsangriffs in der Fehlstelle vom Mikropfahl mit Schutzstufe 2a in Box 3. Rechts: Schnitt durch die Korrosionsstelle, Skala entspricht mm-Teilung.

Abb. 52 zeigt den Ausbau des Mikropfahls der Schutzstufe 2b in Box 2. Die Fotos von links (a) nach rechts (d) zeigen den Pfahl in der Box bis hin zum freigelegten Zugglied. Wie die Bilder zeigen, sind keine Korrosionsangriffe am Mikropfahl der Schutzstufe 2b (Chromstahl Top12) erkennbar. Auch wurde kein Rost am Pfahl oder im den Mikropfahl umgebenden Sand beobachtet. Die Stahloberfläche war korrosionsfrei.

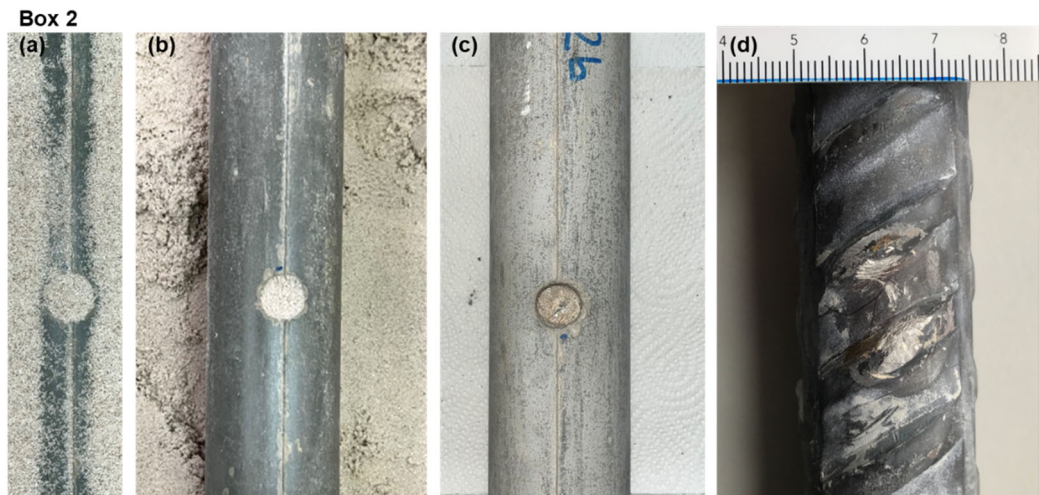


Abb. 52 Mikropfahl Schutzstufe 2b (a) auf Höhe Pfahloberfläche (b) freigelegter Pfahl (c) ausgebauter Pfahl (d) frei gelegte Pfahlbewehrung aus Box 2.

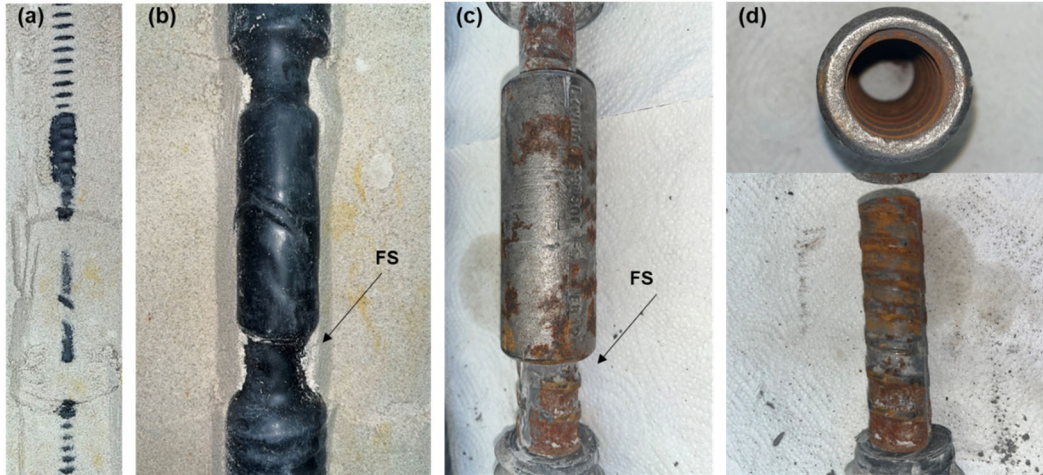
Abb. 53 zeigt den Ausbau der Kupplungen mit Defekt- bzw. Fehlstelle (FS). Oben ist der Pfahl in Box 1, mittig der Pfahl der Box 2 und unten der Pfahl der Box 3 dargestellt. Die Fotos von links (a) nach rechts (d) zeigen die Pfähle in der Box bis hin zum freigelegten Bewehrungsstab. Wie die Bilder zeigen, ist kein deutlicher Unterschied in der Stärke der Korrosion von Box 1 nach Box 3 erkennbar. In allen Fällen sind an den Stahltraggliedern und Muffen flächige Korrosionserscheinungen vorhanden. Es ist zu beachten, dass dies auch im Gewinde der Muffenelemente der Fall ist. In Box 1 und Box 2 wurden um die Fehlstelle der Kupplung keine Korrosionsprodukte gefunden. In Box 3 zeigten sich jedoch Korrosionsprodukte im Sand um die Defektstelle im Schrumpfschlauch, vgl. Abb. 53 (a) unten.

Die Situation in der Kupplungsstelle lässt darauf schließen, dass ein Schrumpfschlauch allein kein ausreichender Korrosionsschutz für die Kupplungsstelle darstellt. Offensichtlich dringt Feuchtigkeit über die Defektstelle (Riss in der Kunststoffumhüllung) in den Spalt zwischen Stahloberfläche und Schrumpfschlauch, was Rostbildungen an den Stahlbauteilen zur Folge hat, die sich mit einem atmosphärischen Korrosionsangriff charakterisieren lassen. Auch wenn im vorliegenden Fall kein messbarer Stahlabtrag beobachtet werden konnte, die Korrosion also nur langsam fortgeschritten ist, könnte sich die Situation für den

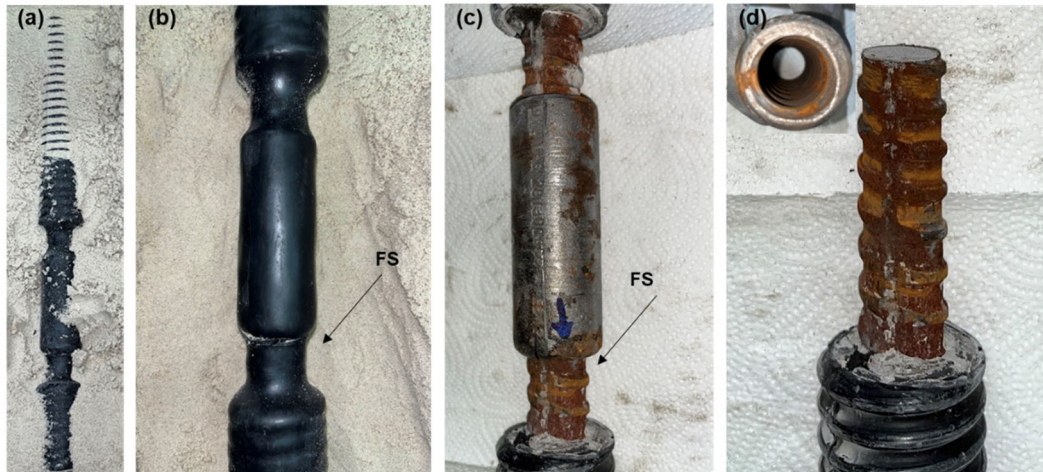
Fall, dass der Mikropfahl im Grundwasser oder in einem häufig gesättigten Boden liegt, deutlich verschärfen.

Die Kupplung ohne Fehlstelle zeigte keine Korrosionsspuren und wurde für weitere Messungen (Widerstandsmessung Dichtigkeit Hüllrohr) verwendet. Wenn der Schrumpfschlauch dicht ist, kann demzufolge keine Feuchtigkeit in die Kupplungsstelle eindringen.

Box 1



Box 2



Box 3



Abb. 53 Kupplung mit Fehlstelle (FS) (a) auf Höhe Pfahloberfläche (b) freigelegter Pfahl (c) ausgebaute Kupplung (d) ausgeschraubte Bewehrung oben: aus Box 1 mittig: Box 2 und unten: aus Box 3

Korrosionsabträge

Im Anschluss an den Ausbau der Mikropfähle wurde ein Schnitt durch die Korrosionsstellen gemacht, um anhand einer mikroskopischen Begutachtung den Stahlabtrag bezüglich Lochtiefe und -durchmesser genauer quantifizieren zu können. Abb. 54 zeigt im Vergleich die Schnittbilder aller untersuchten Korrosionsstellen.

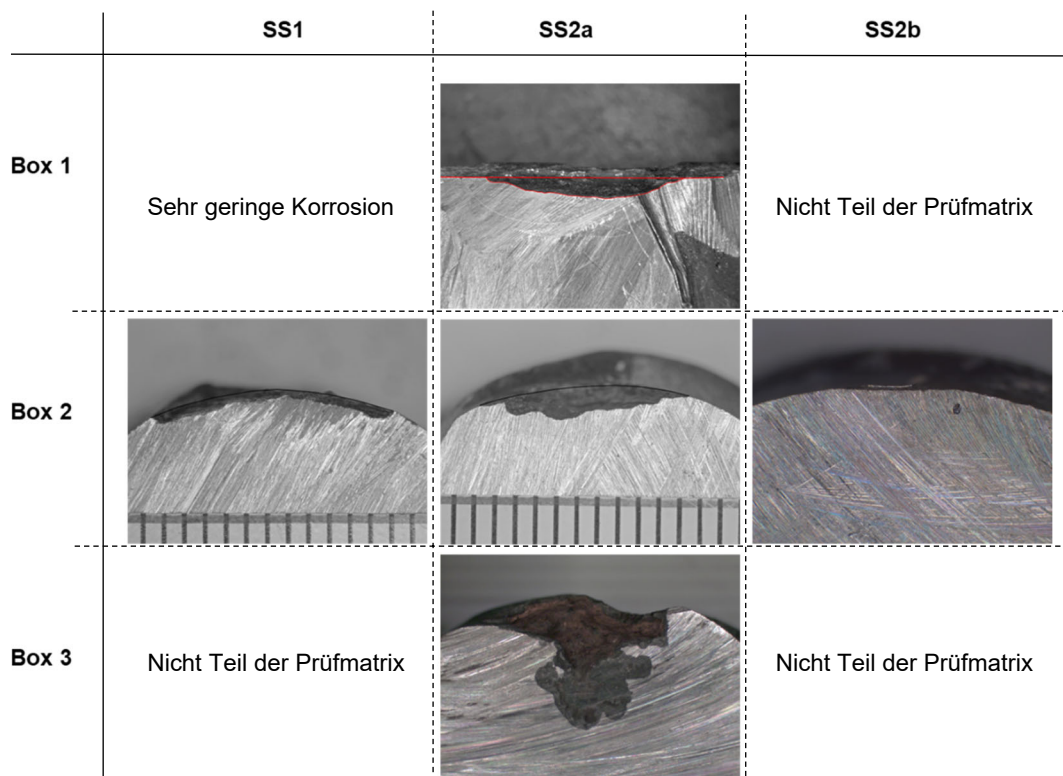


Abb. 54 Schliffbilder der Korrosionsstellen getrennt nach Schutzstufe und Auslagerungsbox (SS = Schutzstufe).

Deutlich erkennbar ist die Zunahme des Korrosionsabtrags von Box 1 über Box 2 nach Box 3 bei der Schutzstufe 2a. Auch bei Schutzstufe 1 ist eine Zunahme der Korrosionstiefe von Box 1 nach Box 2 vorhanden, was auch auf die verkürzte Korrosionsphase zurückzuführen ist. Vergleicht man die Korrosionsintensität nach Schutzstufe in Box 1 erkennt man, dass bei Schutzstufe 2b (nichtrostender Stahl) kein Abtrag vorhanden ist.

Die Fehlstellen wurden mithilfe des Mikroskops und Bildanalyse ausgemessen und daraus der Korrosionsabtrag zum Zeitpunkt des Ausbaus berechnet. Tab. 10 vergleicht die nach dem Ausbau gemessenen Abträge mit den berechneten Korrosionsabträgen aus Makroelementstrommessung und Messung der Eigenkorrosion mittels ER-Proben. An den Pfählen mit Schutzstufe 2b und dem komplett isolierten Pfahl mit Schutzstufe 2a ohne Fehlstelle in Box 3 konnten keine auswertbaren Ströme gemessen werden, d.h. es wurde entweder ein kathodischer Strom gemessen (SS2b) oder der Strom schwankte um 0 μA (SS1 ohne Fehlstelle im Hüllrohr). Allgemein nehmen die Korrosionsabträge und Korrosionsgeschwindigkeiten von Box 1 zu Box 3 zu, was auf die unterschiedlichen spezifischen Bodenwiderstände zurückzuführen ist. Dies trifft auch für die Eigenkorrosionsraten zu. Das Verhältnis der Korrosionsgeschwindigkeit aus Eigenkorrosion und Makroelement variiert zwischen 4 und 13%, was eher tief ist und mit der grossen Kathodenfläche erklärt werden kann (dürfte in der Praxis ebenfalls zutreffen). Je nach Korrosivität der Bodenlösung variieren die Korrosionsgeschwindigkeiten zwischen 0.2 mm/Jahr (Schutzstufe 1 in Box1, BL1) und 2.4 mm/Jahr (Schutzstufe 2a in Box3, BL2). Dies entspricht einem Gesamtabtrag von 10 bis (theoretisch) 120 mm in 50 Jahren, was für die Tragsicherheit relevant sein dürfte.

Tab. 10 Vergleich der Korrosionsabträge und Korrosionsgeschwindigkeiten verschiedener Mikropfähle und Schutzstufen (SS) in Box 1 bis 3.

Box Nr.	Box 1		Box 2		Box 3
Schutzstufe	SS1	SS2a	SS1	SS2a	SS2a
Expositionsdauer [Tage]	70	390	350	390	312
Gemessener Abtrag ¹ [g]	0.03	0.43	0.51	1.12	2.99
Mittlere Korrosionsgeschwindigkeit aus gemessenem Abtrag [mm/Jahr]	0.17	0.43	0.50	1.11	3.72
$V_{\text{kor}}(\text{Eigen})$ (ER-Probe) [mm/Jahr]	0.021		0.079		0.188
$V_{\text{kor}}(\text{Makro})$ (aus I_{Makro}) [mm/Jahr]	0.2	0.6	0.7	0.9	2.4

¹ aus dem Abtragsvolumen berechneter Masseverlust, vgl. Abb. 51 rechts.

4.3 Laboruntersuchungen in Lösung (Lollipop-Versuche)

4.3.1 Probenherstellung

Für die Untersuchung genereller Zusammenhänge wurden kleinmassstäbliche Korrosionsversuche gefahren. Die kleinmassstäblichen Untersuchungen erfolgten an Lollipop Proben, die in den gleichen Bodenlösungen wie bei den Auslagerungsversuchen gelagert wurden. Abb. 55 zeigt (a) die Geometrie der Lollipop Proben, (b) ein Foto der hergestellten Proben einer Füllgutmischung und (c) die drei Lollipop Konfigurationen.

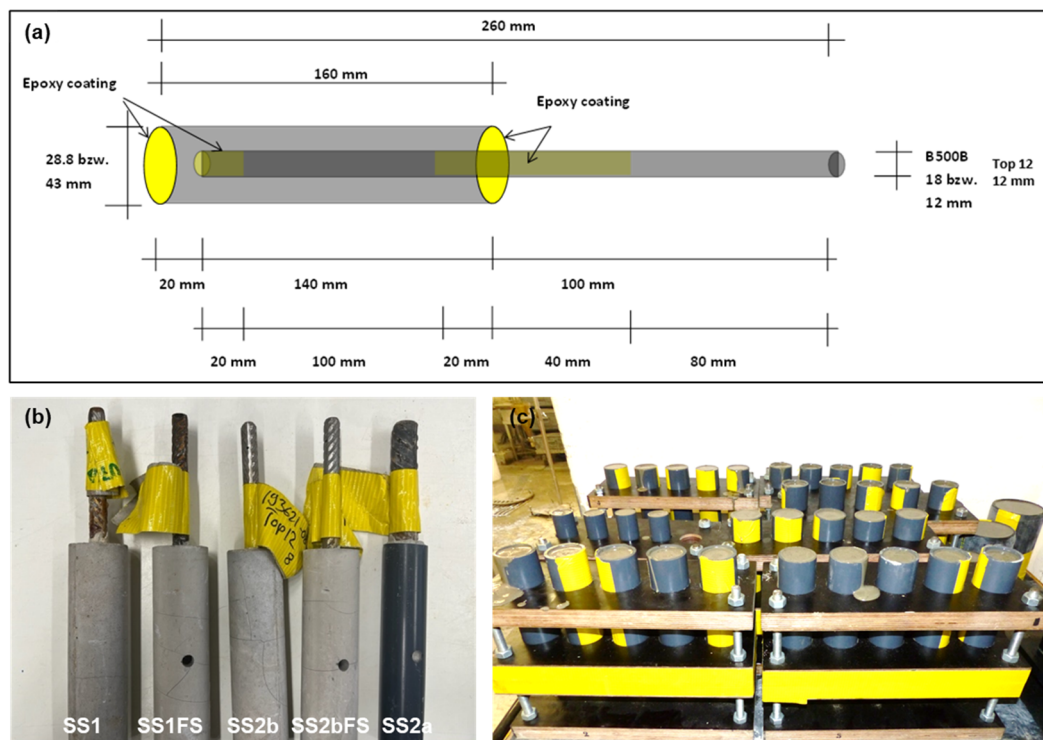


Abb. 55 Lollipop Proben (a) Geometrie, (b) alle Proben einer Füllgutmischung, z.T. mit Fehlstellen, (c) alle Probenkonfigurationen eines Füllguts (Schutzstufe 1 mit und ohne Fehlstelle, Schutzstufe 2a mit Kunststoffhüllrohr).

Neben den Lollipop-Proben wurden Zylinder für die Auslauguntersuchungen hergestellt. Abb. 56 zeigt (a) die Geometrie der Auslaugproben, (b) ein Foto der hergestellten Proben.

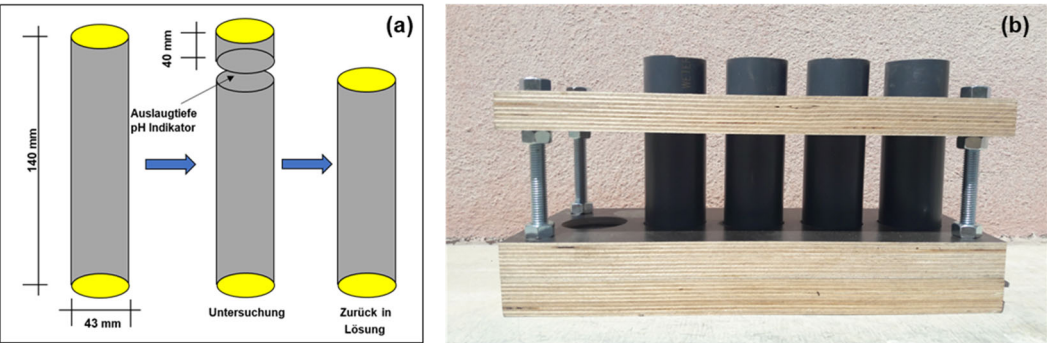


Abb. 56 Auslaugproben (a) Geometrie (b) Foto der Schalungen für die Herstellung

4.3.2 Untersuchungsmatrix

In den kleinformatigen Lösungsversuchen wurden, analog zu den Auslagerungsversuchen, die Mikropfähle mit Schutzstufe 1 (mit/ohne Fehlstelle), Schutzstufe 2a (mit/ohne Fehlstelle) und Schutzstufe 2b (mit/ohne Fehlstelle) simuliert. Gegenüber den Untersuchungen in den Sandboxen konnten alle Schutzstufen in beiden Bodenlösungen BL1 und BL2 untersucht werden. Ferner wurden drei verschiedene Sorten von Füllgut untersucht. Tab. 11 zeigt die Untersuchungsmatrix.

Tab. 11 Lollipop Untersuchungsmatrix						
Bodenlösung	BL1*			BL2*		
Schutzstufe	SS1	SS2b	SS2a	SS1	SS2b	SS2a
Füllgut	Mix 06	Mix 06	Mix 06	Mix 06	Mix 06	Mix 06
	Mix 07	Mix 07	Mix 07	Mix 07	Mix 07	Mix 07
	Mix 09	Mix 09	Mix 09	Mix 09	Mix 09	Mix 09
Bewehrung	B500B Ø 12 mm	NiRo 1.4003 Ø 12 mm	B500B Ø 18 mm	B500B Ø 12 mm	NiRo 1.4003 Ø 12 mm	B500B Ø 18 mm
Überdeckung	15 mm	15 mm	5 mm	15 mm	15 mm	5 mm
Fehlstellen-grösse cm²	0	1	0	1	0	1

* Zusammensetzung gemäss Tab. 7

Neben den Lollipop Proben wurden Auslaugproben hergestellt. Diese wurden parallel zu den Lollipop Proben in den Bodenlösungen und in Ammoniumnitrat gelagert. Tab. 12 zeigt die Untersuchungsmatrix der Auslaugproben.

Tab. 12 Untersuchungsmatrix Auslaugen									
Bodenlösung	BL1			BL2			6M NH ₄ NO ₃		
Füllgut	Mix06	Mix07	Mix09	Mix06	Mix07	Mix09	Mix06	Mix07	Mix09

4.3.3 Probenlagerung und Messkonfiguration

Die Proben wurden in zwei Wannen pro Bodenlösung gelagert. Jede Wanne war mit einer Kathode aus nichtrostendem Stahl der Werkstoffnummer 1.4404 ausgekleidet und die Lösung in jeder Wanne wurde über eine Pumpe langsam und kontinuierlich umgewälzt. Die Stahlauskleidung diente als gemeinsame Kathode für max. je 8 bewehrte Proben. Die Messung der Korrosionsströme (Makroelementströme) erfolgte mit dem DSLog 4.0, welcher für das Aufzeichnen von Strömen gegenüber einem Common Ground (COM) 8 Kanäle aufweist. Die Proben wurden gleichmässig auf zwei Wannen je Bodenlösung verteilt, so dass das Oberflächen zu Bodenlösungsvolumen Verhältnis (A:V) je Wanne 1300 cm² : 38 L = 33 cm²/L und das Anoden zu Kathodenverhältnis (A_a:A_k) je Wanne 116 cm² : 3640 cm² = 1 / 31.5 betrug.

Zusätzlich zu den bewehrten Proben wurden je Wanne 3 Auslaugproben ausgelagert. Die Auslaugproben waren Mörtel-Zylinder mit einem Durchmesser von 43 mm und einer Höhe von 140 mm. Für die Auslaug-Untersuchung in 6M NH_4NO_3 wurden Proben der Schutzstufe 1 und 2b ausschliesslich ohne Fehlstelle ausgelagert. In der Wanne befanden sich insgesamt 8 Proben für das Korrosionsmonitoring und 3 Auslaugzylinderproben zur Messung des Auslaugfortschritts.

Abb. 57 zeigt (a) ein Foto der vorbereiteten Wannen mit Datenlogger, Kathodenblech, Pumpe und Gitterrost, der als Abstandshalter für die Proben diente und (b) das Schema der Wannen mit Befüllung und Monitoring.

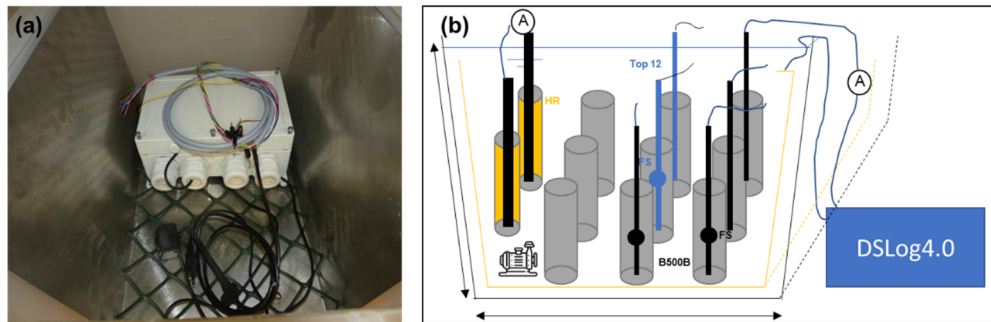


Abb. 57 Untersuchung in Lösung (a) Vorbereitung der Wanne mit Kathode, Gitter als Probenabstandshalter, Pumpe und DSLog4.0 und (b) Schema der befüllten Wanne

4.3.4 Korrosionspotenzial und Makroelementkorrosion

Die Proben wurden je Bodenlösung in zwei Wannen je Bodenlösung gelagert. Je Wanne wurden 8 bewehrte und 3 unbewehrte Proben für die Auslaugung gelagert. Nach 1.5 Jahren wurden die Proben von der Kathode getrennt. Nach 28 Tagen Depolarisation wurden die (freie) Korrosionspotenziale E_{corr} in der jeweiligen Bodenlösung gegenüber einer gesättigten $\text{Ag}/\text{AgCl}_{\text{ges}}$ -Referenzelektrode gemessen. Zusätzlich wurde der Kurzschlussstrom zwischen der Lollipop-Probe und der Kathode von Hand mittels Ampèremeter gemessen. Dabei wurde abgewartet, bis sich konstante Ströme eingestellt haben, was üblicherweise nach ein bis zwei Minuten der Fall war. Die Resultate sind in Abb. 58 angegeben.

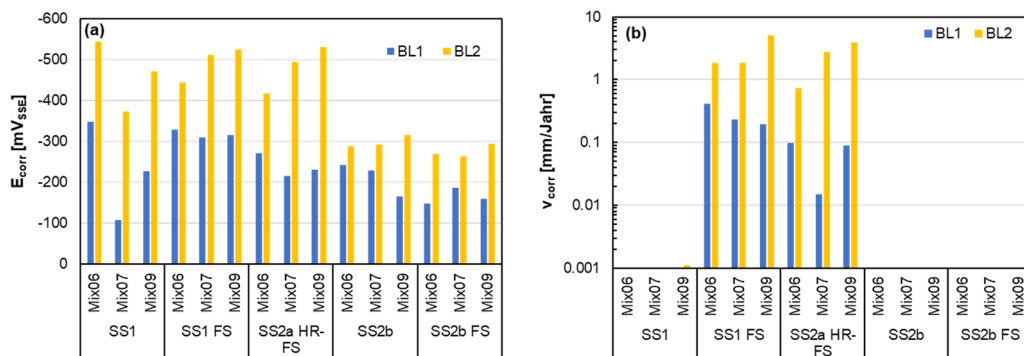


Abb. 58 Handmessungen (a) Elektrodenpotenzial gegenüber der $\text{Ag}/\text{AgCl}_{\text{ges}}$ Referenzelektrode (SSE) an depolarisierten Lollipop-Proben und (b) Kurzschlussstrom je einer Lollipop-Probe gegenüber der Kathodenauskleidung.

Die Korrosionspotenziale in Abb. 58 (a) sind in Bodenlösung BL2 deutlich negativer (tiefer) als die Korrosionspotenziale in Bodenlösung BL1. Die Korrosionspotenziale liegen bei normalem Betonstahl im aktiven Zustand bei -300 bis -550 mV_{SSE}, während die der nichtrostenden Stähle (Top12) über -250 mV_{SSE} liegen (passiver Zustand). Materialspezifische Unterschiede im Korrosionspotenzial sind kaum erkennbar, obwohl der Mix 07 Hüttensand enthält, jedoch in geringen Zementersatzraten (< 35%).

Abb. 59 zeigt das Korrosionsmonitoring der Lollipop Proben getrennt nach Bodenlösung der Schutzstufe 1 mit Fehlstelle. Aus Abb. 58 (b) ist erkennbar, dass die Korrosionsraten der Betonstähle B500B im Bereich der Fehlstelle in der Bodenlösung BL2 (Thermalwasser) um mindestens eine Potenz höher sind als in BL1. Vernachlässigbar gering sind die Korrosionsraten bei Schutzstufe 1 ohne Fehlstelle und bei den nichtrostenden Stählen (Schutzstufe 2b mit und ohne Fehlstelle). Bei den Probekörpern mit Fehlstellen sind keine eindeutigen Füllgut-spezifischen Unterschiede in der Korrosionsrate erkennbar. Dies bedeutet, dass der Korrosionsfortschritt im Makroelement primär durch die Leitfähigkeit der Bodenlösung bzw. deren Korrosivität (Art und Menge an Anionen wie Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^{2-}) und der Kathodenfläche dominiert wird.

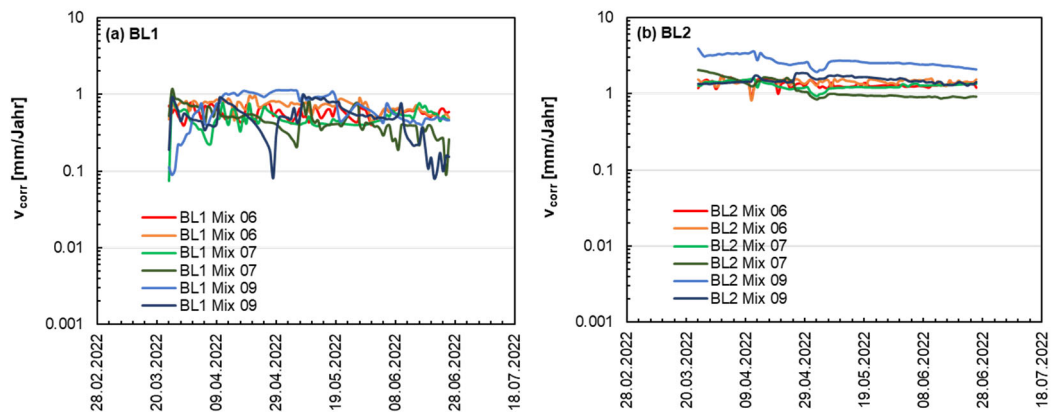


Abb. 59 Korrosionsmonitoring der Lollipop-Proben SS1 FS (a) in BL1 und (b) in BL2

Gemäss Abb. 59 liegen die Korrosionsraten auf hohem, aber ähnlichem Niveau, wie bei der Handmessung und in den Auslagerungsboxen. In der stark korrosiven Bodenlösung 2 sind die Korrosionsraten um ca. eine Potenz höher als in Bodenlösung 1 und vergleichbar mit der Korrosion der Mikropfähle in Box 3 mit dem stärksten Angriff durch das Medium.

4.3.5 Eigenkorrosionsrate

Die Eigenkorrosion wurde mit LPR-Verfahren (Linearer Polarisations-Widerstand) bestimmt. Dabei wird der Messprobe (Betonstahl im Lollipop-Prüfkörper) ein Gleichstrom aufgeprägt und aus der Potenzialänderung der sogenannte Polarisationswiderstand berechnet (Quotient E/i). Im geringen Spannungsbereich von max. 20 mV besteht ein linearer Zusammenhang zwischen E und i [26]. Abb. 60 zeigt die Polarisationswiderstände gegenüber dem Korrosionspotenzial (Ruhepotenzial) gemessen gegen die $Ag/AgCl_{ges}$ Elektrode.

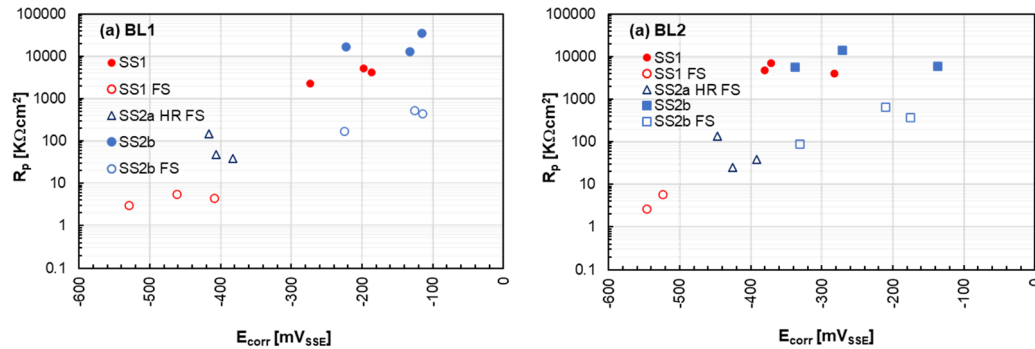


Abb. 60 Polarisationswiderstände (Eigenkorrosionsraten) bei unterschiedlichen Korrosionspotenzialen für (a) BL1 und (b) BL2.

Insgesamt sind die Potenziale in BL2 leicht negativer als die Korrosionspotenziale in BL1. Gleichzeitig liegen die Polarisationswiderstände in BL2 auf niedrigerem Niveau als in BL1. Mit Fehlstelle liegen die Polarisationswiderstände bei ähnlichem Potenzial bei der Schutzstufe SS2b auf niedrigerem Niveau. Sowohl in BL1 als auch in BL2 sind aufgrund der Polarisationswiderstände nur bei den Proben mit Fehlstelle mit Korrosionsraten deutlich über dem Niveau der Passivstromdichte zu rechnen ($R_p < 100 \text{ K}\Omega\text{cm}^2$).

Abb. 61 wiederholt (a) die freien Korrosionspotenziale und zeigt (b) die Mikrokorrosionsraten.

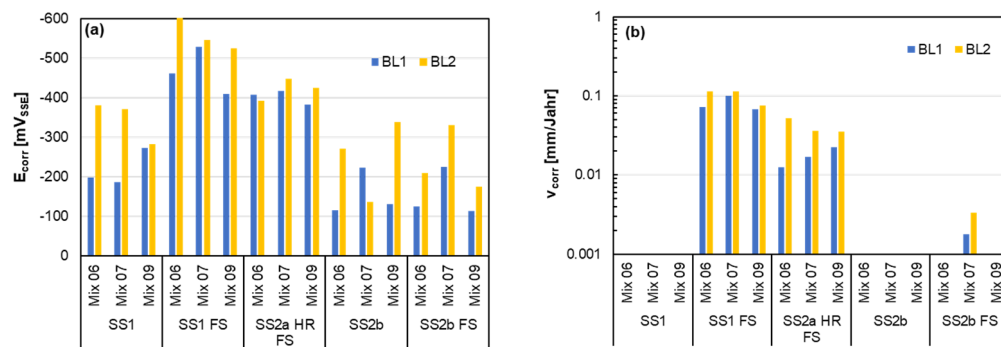


Abb. 61 Resultate BL1 und BL2 (a) freie Korrosionspotenziale gegen die $Ag/AgCl$ Elektrode und (b) Eigenkorrosionsrate

Wie bereits bei den Makroelementuntersuchungen sind die Korrosionspotenziale bei Schutzstufe 1 und 2a jeweils mit Fehlstelle am negativsten (a) und die höchsten Korrosionsraten um $0,1 \text{ mm/Jahr}$ bezogen auf eine effektive Fehlstellengröße von rund 3 cm^2 nach Ausbau. Die Eigenkorrosionsrate für die Schutzstufe 2b mit Fehlstelle bei Mix 07 liegt mit etwas mehr als $1 \mu\text{m/Jahr}$ oberhalb der üblichen Passivstromdichte. Da das Füllgut bzw. das Bindemittel von Mix 07 Anteile von Schlacken und damit auch Sulfide enthält, wird diese vermeintliche Korrosion wahrscheinlich durch das Redoxsystem S^{2-}/SO_4^{2-} verursacht [52, 25, 31].

Weiter ist erkennbar, dass die Eigenkorrosionsraten bei den Mikropfählen mit Schutzstufe 1 und Fehlstelle höher sind als bei den Pfählen mit Schutzstufe 2a und Fehlstelle. Dies bestätigt die Annahme von Kapitel 3.2.3, dass der unter dem Füllgut passivierte Stahl eine kathodische Wirkung hat und sich demzufolge ein Makroelement zwischen Fehlstelle (Anode) und passivem Stahl des Mikropfahls (Kathode) bildet, was den Korrosionsangriff in der Fehlstelle verstärkt.

5 Zusammenfassung der Ergebnisse und Folgerungen

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts konnten anhand von Laboruntersuchungen im Klein- und Grossmassstab verschiedene Erkenntnisse zum Korrosionsverhalten von Mikropfählen und permanenten ungespannten Ankern der Schutzstufen 1 und 2a/b gemäss [17] gewonnen werden. Konkret sollten diese Versuche zeigen, ob und unter welchen Bedingungen eine relevante Korrosionsgefährdung vorliegt und eine grobe Abschätzung der in ungünstigen Fällen möglichen maximalen Korrosionsraten erlauben (Worst-Case-Szenario).

5.1 Füllgut

Die Erfahrungen aus der Praxis und die vorliegende Forschungsarbeit zeigen, dass die Herstellung eines geeigneten Füllguts in manchen Fällen zu Schwierigkeiten führen kann, oder nicht beherrscht wird. Einer der Hauptgründe für diese Situation sind die ungenügenden und/oder unterschiedlichen Normvorgaben sowie teilweise das Fehlen von Richt- oder Grenzwerten. Da es für Füllgut im Bereich von ungespannten Verankerungen und Mikropfählen keine europäische Produktnorm oder Europäische Technische Zulassungen (ETA) gibt, können für solche Produkte keine einheitlichen Leistungserklärungen erstellt werden.

In [12] ist festgelegt, dass der Zement für Verpressmörtel (Füllgut) der SN EN 206, Anhang D «Zusätzliche Anforderungen an die Festlegung und Konformität von Beton für besondere geotechnische Arbeiten (Spezialtiefbau)» entsprechen muss [62]. In diesem Anhang sind verschiedene Zementarten nach SN EN 197-1 aufgeführt [63]. Lediglich für Anwendungen bei Spanngliedern wird ein Zement der Klasse CEM I gefordert. Die Zementindustrie steht seit einiger Zeit und auch in Zukunft vor der grossen Herausforderung, den CO₂-Ausstoss bei der Zementproduktion deutlich zu reduzieren. Nebst dem Einsatz alternativer Brennstoffe wird deshalb auch die Entwicklung nachhaltiger Zemente vorangetrieben. Da bei wird ein Teil des Portlandzementklinkers durch andere Stoffe wie z.B. Kalksteinmehl, Betongranulat, kalzinierten Ton oder Flugasche ersetzt. In der Schweiz wird bereits von einem Spanngliedhersteller ein Portlandkompositzement zur Herstellung von Füllgut verwendet und es ist davon auszugehen, dass auch andere Produzenten von Füllgut in naher Zukunft auf CEM I verzichten wollen.

Normen, die im Zusammenhang mit Füllgut häufig genannt werden, sind die Normen SN EN 14199 «Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau – Mikropfähle» [12], die SN EN 14490 «Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau – Bodenvernagelung» [11] und die Normen für Spannglieder, SN EN 445, 446 und 447 [8, 9, 10]. In der Schweizer Norm SIA 267 [17] findet man nur wenige Angaben zum Füllgut. Hingegen findet man in [2] relativ detaillierte Angaben zu Ankermörteln betreffend Eignungsprüfung und Konformitätsprüfung auf der Baustelle. Zudem gibt das BAFU regelmässig eine Typenliste von zugelassenen Ankermörteln heraus [3]. Die Liste unterscheidet Ankermörtel für Lawinenverbau und Steinschlagverbau sowie speziell für Permafrost freigegebene Mörtel. Die aktuelle Typenliste ist auf der BAFU-Webseite veröffentlicht und wird bei einer Neuzulassung rasch aktualisiert. Zuständig für die Freigabe ist die Expertenkommission Lawinen und Steinschlag (EKLS). Die meisten Unternehmungen im Spezialtiefbau arbeiten mit etablierten Fertigprodukten (Sack- oder Siloware) verschiedener Hersteller.

Bei grossen Projekten mit ungespannten Ankern oder Mikropfählen wird von der Bauherrschaft in vielen Fällen die Begleitung der Verpressarbeiten durch ein Prüflabor verlangt. Meist werden dabei Baustellenprüfungen gemäss [8] in Auftrag gegeben. In der Regel geht es um die Verfüllung einer verrohrten Bohrung für Schutzstufe 1 oder die Ausseninjektion bei der Schutzstufe 2a oder 2b. Die Injektion des Kunststoffhüllrohrs auf der Baustelle ist gemäss [17] zulässig, wird jedoch selten ausgeführt. Im nationalen Anhang NA der Norm EN 447 [10] ist erwähnt, dass diese Norm grundsätzlich auch für die Prüfung von zementösem Füllgut für die Injektion von Boden- und Felsankern gilt, wobei im nationalen Anhang der Norm gewisse Anforderungen angepasst wurden.

Wie die vorliegende Arbeit und Praxisfälle zeigen, sind nicht alle Prüfungen der SN EN 445 [8] zielführend bzw. sinnvoll, da sie primär für die Injektion von Spannkälen entwickelt wurden. Die Messung des Fliessvermögens mittels Trichterverfahren ist nur für dünnflüssige Füllgut-Suspensionen geeignet. Eine flüssige Konsistenz ist v.a. bei langen Spannmitgliedern notwendig, damit das Füllgut gleichmässig und bei nicht zu hohen Drücken injiziert werden kann und die engen Hohlräume im Spannkabel vollständig ausfüllt. Bei der Injektion von Bohrlöchern von Verankerungen ist häufig eine steifere Konsistenz oder thixotropes Verhalten notwendig, damit das Füllgut nicht in den Boden oder vorhandene Klüfte in felsigem Gestein abfliessen kann. Die Verarbeitbarkeit des Füllguts kann mit praktischen Pumpversuchen nachgewiesen werden. Dabei wird die pumpbare Konsistenz und die Zeitdauer der Verarbeitbarkeit überprüft. Gleichzeitig mit dem Befüllen des Trichters für die Prüfung des Fliessvermögens wird das Füllgut auf ein engmaschiges Sieb (Maschenweite ≤ 2 mm) gegossen. Dabei wird kontrolliert, ob Klumpen auf dem Sieb zurückbleiben, was nicht zulässig ist. Diese Prüfung ist für dickflüssigere Systeme nicht geeignet, da die engen Maschen in kurzer Zeit verstopft sind und kein Füllgut mehr durchlassen. Aufgrund von Praxiserfahrungen funktioniert die Prüfung z.B. für ein Füllgut mit CEM I und Fliessmittel sowie einem w/z-Wert im Bereich von 0.45.

Der Absetztest mit Vertikalrohr gemäss [8] erachtet die Forschungsstelle als baustellen-taugliche und sinnvolle Prüfung. Bei dieser Prüfung wird sowohl die Volumenänderung (Absetzen oder Quellen) als auch die Wasserabsonderung (Bluten) bestimmt. Durch die Verwendung von transparenten Standrohren können bei Farbänderungen des Füllguts (Schlieren) zudem Entmischungserscheinungen visuell erkannt werden. Falls sich am oberen Ende des Vertikalrohrs zu viel Blutwasser bildet, ist dies ein Hinweis auf eine instabile Mischung, die nicht verwendet werden sollte. Für eine gute Stabilität der Mischung können Stabilisierer eingesetzt werden. Diese Zusatzmittel verringern die Neigung des Füllguts zum Bluten und Entmischen. Ohne geeignete Zusatzmittel können die Prüfungen mit dem Vertikalrohr aus Erfahrung nicht erfüllt werden.

Die Bestimmung der Flüssigkörperdichte, die Herstellung von Prismen für Druckfestigkeitsprüfungen nach z.B. 2, 7, 14 und 28 Tagen, die Bestimmung des w/b-Wertes und bei Bedarf des Luftgehalts im Frischmörtel sind weitere Arbeiten, die auf der Baustelle durchgeführt werden sollten.

Ebenfalls problematisch ist der Einsatz ungeeigneter Mischanlagen. In gewissen Fertig-mischungen sind Zusatzmittel enthalten, die ihre Wirksamkeit ohne ausreichende Mischenergie nicht entfalten können, was in der Regel zu Konsistenzproblemen und/oder mangelnder Stabilität führt. Die Forschungsstelle empfiehlt die Verwendung von hochtourigen Kolloidal Mischern, die bei Bedarf bei Füllgutherstellern auch gemietet werden können.

Aus Sicht der Forschungsstelle wäre es zweckmässig, wenn die zuständige Normkommission ein Anforderungsprofil für Füllgut zur Injektion von ungespannten Ankern und Mikropfählen erstellen könnte. Zu den verschiedenen Kenngrössen sollten auch Richt- oder Grenzwerte definiert werden. Mischungen rein aus Zement und Wasser sind ungeeignet. Sie weisen zu grosse Wasserabsonderungen (bluten) und Volumenänderungen (Absetzen) auf. Der w/b-Wert sollte zwischen 0.4 und 0.5 liegen. Es wird insbesondere davon abgeraten, die Konsistenz des Füllguts über den Wassergehalt der Mischung, z.B. durch Wasserzugabe zu steuern. Bei w/b-Werten von 0.6 oder höher wird eine 28-Tage Druckfestigkeit von 25 MPa (häufig genannter Mindestwert) unterschritten oder nur leicht überschritten.

5.2 Festmörteleigenschaften und Dauerhaftigkeit

Wie die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit zeigen, wird die **Druckfestigkeit** nach 28 Tagen wesentlich durch den w/b-Wert bestimmt. Hohe w/b-Werte von 0.6 oder 0.65 führen in der Regel zu ungenügenden Druckfestigkeiten. Mischungen mit puzzolanisch sowie puzzolanisch und hydraulisch wirkenden Zusatzstoffen nehmen zwischen 7 und 28 Tagen noch deutlich an Festigkeit zu. Falls eine hohe Frühfestigkeit gefordert wird, müssen Bindemittel mit hoher Mahlfineinheit verwendet werden. Beispielsweise besteht Mix 07 aus ei-

nem Portlandkompositzement CEM II/B-M (S-T) 42,5 R HS-CH mit Hüttensand und gebranntem Schiefer. Mit der Klasse R gehört dieser Zement zu den Bindemitteln mit schneller Erhärtung [19].

Der **Chloridwiderstand** nach [20] ist eine Grösse, die bei Füllgut von Verankerungen eher selten von Bedeutung ist. Die in dieser Arbeit an den fünf Mischungen gemessenen Chloridwiderstände entsprechen den Erwartungen. Mit einer Ausnahme erfüllen alle Mischungen den Grenzwert von $10 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ gemäss Tabelle NA.14 der SN EN 206 [62]. Der Mix 08 mit dem Portlandkompositzement CEM II/B-LL mit weniger als 75% Klinker liegt deutlich über dem Grenzwert. Der Chloridwiderstand nimmt mit zunehmendem Anteil puzzolanisch bzw. hydraulischer Zusatzstoffe zu und mit zunehmendem w/b-Wert ab. Um einen hohen Chloridwiderstand zu erreichen, muss auf einen tiefen w/SiO₂-Gehalt im Zement und einen geringen w/b-Wert geachtet werden.

Auch der **Karbonatisierungswiderstand** ist für die Exposition von Füllgut kaum massgebend, kann aber Rückschlüsse auf den Auslaugwiderstand bzw. den Widerstand gegenüber chemischem Angriff liefern. Wie beim Chloridwiderstand liefert die Zusammensetzung des Bindemittels einen Kennwert, den w/CaO-Gehalt im Zement, aufgrund dessen der Widerstand gegenüber Karbonatisierung abgeschätzt werden kann.

Die **Frostbeständigkeit**, in Einzelfällen auch die Frost-Tausalzbeständigkeit, von Füllgut ist eine Eigenschaft, die bei gewissen Anwendungen oder in bestimmten Regionen von Bedeutung ist. In [2], wo es primär um den Lawinenschutz in alpinen Regionen geht, ist der Nachweis der Frostbeständigkeit ein Teil der Eignungsprüfungen (Prüfungen am erhärteten Mörtel). Allerdings wird dabei auf eine alte Methode in der zurückgezogenen SIA 162/1 zurückgegriffen, die in der Betonpraxis kaum mehr angewendet wird. Wie die Forschungsstelle in dieser Arbeit gezeigt hat, können z.B. mit dem wesentlich einfacheren Schnellverfahren TFB, das von verschiedenen Prüflaboren beherrscht wird, ebenfalls quantifizierbare Ergebnisse erzielt werden. Das BAFU sollte deshalb aus Sicht der Forschungsstelle ein Wechsel der Prüfung für den Frostbeständigkeitsnachweis in Betracht ziehen. Bei den geprüften Füllgutmischungen hat nur der Mix 07 einen hohen Frost-Tausalzwiderstand, was auf den sehr tiefen w/b-Wert von 0.39 und demzufolge auf die hohe Dichtigkeit der Füllgutmatrix zurückzuführen ist. Bei w/b-Werten von mehr als 0.5 ist die Porosität zu hoch.

Sulfatwiderstand: Wie die vorliegenden Laboruntersuchungen gezeigt haben, sollte bei einer Gefährdung durch sulfathaltige Böden auf ein sulfatbeständiges Bindemittel zurückgegriffen werden. In der Schweiz sind die dafür freigegebenen Zemente mit hohem Sulfatwiderstand im SIA Register «Register der frei gegebenen Zemente, Zusatzstoffe und Kombinationen von Zement und Zusatzstoffen», Teil C (Tabelle NA.11), aufgelistet (sogenannte SR oder HS-CH Zemente). Die in der [20] aufgeführte Dauerhaftigkeitsprüfung zur Bestimmung des Sulfatwiderstands wurde für Beton konzipiert und eignet sich für Füllgut nur bedingt oder, je nach Zusammensetzung, gar nicht. Aus diesem Grund sollte der Nachweis der Sulfatbeständigkeit von Füllgut über den Zement erfolgen und nicht durch das Erfüllen eines Grenzwerts einer Laborprüfung.

Widerstand gegen Auslaugen: Die Forschungsstelle schlägt vor, für die Kontrolle des Widerstands gegen **chemischen Angriff** mit der Expositionsklasse XA1c(CH) bis XA3c(CH) und Auslaugung (Expositionsklassen XC2(CH), XD2a(CH)) eine neue Dauerhaftigkeitsprüfung als Eignungsprüfung einzuführen. Es handelt sich dabei um die Schnellprüfung in Ammoniumnitrat, wie sie in den Kapiteln 3.1.4, 4.1.3 und 4.3.1 erläutert wurde. Mit einer solchen Prüfung, die mit der Schnellprüfung zur Bestimmung des Karbonatisierungswiderstands vergleichbar ist, kann v.a. die Eignung von Füllgut, aber auch Beton in der XC2-Exposition (nass oder dauerhaft hohe Luftfeuchte, selten trocken) gemäss [7] untersucht werden. Diese neue Dauerhaftigkeitsprüfung könnte in die [20] integriert werden, in der die weiteren schweizerischen Dauerhaftigkeitsprüfungen vorhanden sind. Grenzwerte sind im nationalen Anhang, Tabelle NA.14, der SN EN 206 [62] festzulegen.

Die Problematik des Auslaugens im Boden oder Wasser wird in Zukunft mehr Bedeutung erhalten. Grund ist der Klinkerersatz mit anderen, nicht oder schwach reaktiven Bestand-

teilen (Reduktion des CO₂-Fussabdrucks). Bei einem geringen natürlichen Auslaugkoeffizienten L_{NA} von beispielsweise 1.5 mm/Jahr^{0.5} (Mix 06) wird in 50 Jahren eine Auslaugtiefe von 11 mm, nach 100 Jahren eine Tiefe von 15 mm erreicht, was bei den heutigen Überdeckungen zu keinen Korrosionsproblemen führen dürfte. Erhöht sich der Auslaugwiderstand jedoch auf rund 2 mm/Jahr^{0.5}, wird nach 100 Jahren eine Auslaugtiefe von 20 mm erreicht, was gerade der heutigen, erforderlichen Pfahlüberdeckung für die Schutzstufe 1 und 2a/b entspricht. In diesem Fall sind jedoch keine Reserven für Ungenauigkeiten bei der Mörtelüberdeckung oder Abweichungen in der Füllgutqualität vorhanden.

5.3 Korrosion und Korrosionsschutz von Mikropfählen

5.3.1 Allgemeines

Mikropfähle mit Schutzstufe 2a weisen dank der hohen Alkalinität des Füllguts generell einen guten Korrosionsschutz auf, sofern am Kunststoffhüllrohr keine Defektstellen vorhanden sind. Ein dichtes Hüllrohr verhindert den Zutritt von Feuchtigkeit und Schadstoffen an die dünne Zementsteinumhüllung oder bei zusätzlich gerissenem, abgelöstem Füllgut an das Stahltragglied. Eine Auslaugung der Verpressmörtels in Kontakt mit dem Erdboden wird ebenfalls verhindert.

Mikropfähle mit Schutzstufe 2b (Tragglied aus nichtrostendem Chrom-Stahl) haben in dieser Forschungsarbeit auch unter korrosiven Bedingungen ein günstiges Korrosionsverhalten gezeigt. Der Einsatz dieser Werkstoffe hat den Vorteil, dass auch bei Imperfektionen während oder nach dem Einbau kaum mit Korrosionsangriffen gerechnet werden muss. Der Nachteil dieser Mikropfahl-Variante, die vom Prinzip her der Schutzstufe 1 entspricht, besteht darin, dass der Korrosionsschutz der Tragglieder zurzeit nicht oder nicht sicher überwacht werden kann.

Fälle mit reduzierter oder ungenügender Dauerhaftigkeit

Es gibt in der Praxis regelmässig Situationen, bei denen mit ungenügender Dauerhaftigkeit solcher Traggliedumhüllungen zu rechnen ist. Ein aus korrosionstechnischer Sicht ungünstiger Fall betrifft einen Pfahl mit Defektstellen am Hüllrohr und schadhafter Umhüllung des Tragglieds, welches exzentrisch im Bohrloch liegt und demzufolge direkt mit Wasser und Schadstoffen aus dem Boden in Kontakt kommt. Da der zementöse Schutz fehlt, wird bereits nach kurzer Zeit Korrosion am Stahl ausgelöst. Wenn das Tragglied zentrisch im Bohrloch liegt, kann Korrosion zu einem späteren Zeitpunkt auftreten, wenn das Füllgut zwischen Zugglied und Bohrlochwand seine alkalische Schutzwirkung verloren hat. Es ist dabei davon auszugehen, dass die pH-Wert Absenkung primär durch die Auslaugung des Portlandits und nicht infolge Karbonatisierung verursacht wird. Probleme mit Auslaugung werden in Zukunft vermutlich an Bedeutung gewinnen, da der Widerstand gegen Auslaugen bei Klinker reduzierten Bindemitteln sinkt und die Nutzungsdauer von Bauwerken generell steigt. Schadstoffe wie Sulfate oder Ammonium können die Zementsteinmatrix zusätzlich chemisch angreifen, so dass der Korrosionsschutz des Mikropfahls wegen der Zerstörung des Füllguts mit der Zeit ebenfalls verloren geht.

Kupplungsstellen bei langen Mikropfählen sind als Schwachstelle zu betrachten und müssen aus korrosionstechnischer Sicht speziell beachtet werden. Solche Stellen, wo die Stahltragglieder mit einer Muffe mit Innengewinde gekoppelt sind, werden mit Hilfe von Schrumpfschläuchen vor Korrosion geschützt. Der wichtige Schutz durch das alkalische Füllgut fehlt in diesen Bereichen, und es gibt zurzeit kein Verfahren, wie die bewerkstelligt werden könnte. Ausserdem tendieren die Schrumpfschläuche dazu, sich mit der Zeit abzulösen oder spröde bzw. rissig zu werden, was den Zugang von Feuchtigkeit und Schadstoffen in die Kupplung erlaubt.

Bei der Schutzstufe 1 ohne Kunststoffhüllrohr wird das Stahltragglied durch die 20 mm starke Füllgut-Ummantelung vor Korrosion geschützt. Bei Imperfektionen an dieser Umhüllung (direkter Kontakt des Tragglieds mit dem Boden), Auslaugung des Füllguts oder bei chemischem Angriff mit lokaler Zerstörung der Ummantelung werden, analog zu Schutzstufe 2a, ebenfalls Korrosionsangriffe an der Stahloberfläche ausgelöst. Normalerweise

läuft die anodische und kathodische Reaktion bei der Korrosion von Stahl im Erdboden gleichmässig verteilt auf der Stahloberfläche ab, d.h. eine räumliche Trennung der Prozesse ist nicht vorhanden. Bei Schutzstufe 1 mit korrodierender Fehlstelle wirkt jedoch der mit Füllgut umhüllte, passive Stahl als Kathode, was die Ausbildung eines Makroelementes zur Folge hat. Bei der Schutzstufe 2a ist diese Elementbildung auf dem Pfahl selbst nicht möglich, weil das isolierende Kunststoffhüllrohr den Stromfluss stark behindert.

Ein besonders grosses Korrosionsrisiko besteht immer dann, wenn ungenügend geschützte Mikropfähle mit der Bewehrung von Fundamenten, Bodenplatten, Stützmauern etc. elektrisch verbunden sind. Eine solche Verbindung kommt zustande, wenn sich diese beiden Strukturen (Tragglied, Bewehrung) an einem oder mehrerer Punkte berühren. In diesen Fällen entstehen grosse Potenzialunterschiede zwischen den Fehlstellen an Mikropfählen oder durchfeuchteten Kupplungen und der vor Korrosion geschützten, passiven Bewehrung, was eine Makroelementbildung und Korrosionsabträge bis 1 mm/Jahr oder sogar mehr zur Folge haben kann. Solche Korrosionsangriffe laufen lange Zeit unbemerkt ab, was in ungünstigen Fällen zur Beeinträchtigung der Gebrauchstauglichkeit und eventuell auch der Tragsicherheit führen kann.

Aufgrund dieser Überlegungen und den Ergebnissen dieser Forschungsarbeit kann man aus heutiger Sicht keinesfalls Entwarnung geben, die in der Schweiz vorgegebenen Schutzstufen seien zu «streng». Die Systeme sollten weiter verbessert und der Qualitätssicherung auf der Baustelle die notwendige Beachtung geschenkt werden. Einige Hinweise zur Verbesserung des Korrosionsschutzes von Mikropfählen sind in Kapitel 6 erläutert. Für die langfristige Überwachung von Mikropfählen und ungespannten Ankern müssen teilweise neue Methoden entwickelt werden, um den Korrosionszustand eingebauter Systeme präziser untersuchen zu können.

5.3.2 Laboruntersuchungen

Zur Charakterisierung und Quantifizierung der verschiedenen Korrosionsangriffe wurden Auslagerungsversuche in drei grossen Sandboxen und Lösungsversuche durchgeführt. Es wurden zwei Bodenlösungen mit unterschiedlicher Korrosivität/Leitfähigkeit ausgewählt, wobei in zwei Sandboxen die gleiche Lösung verwendet, jedoch ein unterschiedlicher Sättigungsgrad des Quarzsandes eingestellt wurde. Da die Eigenkorrosion in der Fehlstelle der Pfähle messtechnisch nicht zugänglich ist, wurde diese anhand von elektrischen Widerstand-Sonden (ER Probes - Electrical Resistance Probes) bestimmt. Die Lösungsversuche wurden an zylindrischen Füllgut-Probekörpern mit Bewehrung (Lollipop -Versuche) durchgeführt.

Die konkreten Ergebnisse und das Fazit der vorliegenden Auslagerungs- und Korrosionsversuche können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Eigenkorrosionsrate in Abhängigkeit der Expositionsklasse für chemischen Angriff lag zwischen rund 0.02 (XA1) und 0.2 mm/Jahr (XA2 bis XA3). Dies bei spezifischen Bodenwiderständen von 40 bis 2 Ω m (mittel bis stark korrosiver Boden);
- Wie der Ausbau der ER-Proben gezeigt hat, trifft die Vorstellung eines gleichmässigen Abtrags nicht zu. Vielmehr bilden sich kleine Belüftungselemente auf der Stahloberfläche, die einen inhomogenen Stahlabtrag zur Folge haben. Die Eigenkorrosion wird deshalb tendenziell etwas unterschätzt;
- Der Korrosionsabtrag wird bei Vorliegen eines Makroelementes zwischen Verankerung und passiver Bewehrung in einem Fundament oder einer Bodenplatte stark beschleunigt. Die Verstärkung gegenüber Eigenkorrosion beträgt rund ein Faktor 10;
- Nach der Auslagerung wurden die Stahlstäbe bzw. die Korrosionsstellen schichtweise freigelegt. Die Morphologie der Korrosion ist insbesondere bei der Schutzstufe 2a ein Lochfrass ähnlicher Angriff mit Übergang zu kavernenartiger Korrosion, vermutlich unter Magnetitbildung. Die Angriffstiefe lag nach ca. 300 Tagen Auslagerung bei 8 bis 10 mm;
- Aufgrund der gemessenen Stromstärke im Makroelement konnte der Masseverlust mit Hilfe der Faraday-Gleichung berechnet werden. Die Berechnung der mittleren Makroelement-Korrosionsgeschwindigkeit ergab rund 2.4 mm/Jahr. Aufgrund der Berechnung wird die effektive Angriffstiefe offensichtlich deutlich unterschätzt. Der Grund besteht

darin, dass der (Loch-)Korrosionsangriff rasch in grössere Tiefen fortschreitet (Säureangriff). Eine seitliche Ausdehnung zu muldenförmiger Korrosion kann wegen dem isolierenden Hüllrohr nicht stattfinden, so dass der Angriff verstärkt in die Tiefe fortschreitet, was v.a. bei Zuggliedern längerfristig zu Tragfähigkeitsproblemen führen kann;

- Die Korrosionsgeschwindigkeiten bei den weiteren Mikropfählen variierte zwischen 0.2 mm/Jahr (Schutzstufe 1) bis 0.6 mm/Jahr (Schutzstufe 2a) in Box 1 mit milder Bodenlösung (BL1), 0.7 mm/Jahr (Schutzstufe 1) bis 0.9 mm/Jahr (Schutzstufe 2a in Box 2 bei mittel bis korrosiver Bodenlösung (BL2, erhöhter Sättigungsgrad);
- Unter den defekten Schrumpfschläuchen (Riss von 3 cm Länge) im Bereich von Kupplungen konnte auf der gesamten Kupplungslänge und im Gewinde der Muffen ein vornehmlich flächiger Angriff beobachtet werden, wie dies bei atmosphärischer Korrosion typisch ist. Auch wenn die Querschnittsverluste kaum messbar waren, kann festgehalten werden, dass Kupplungsstellen, die nur mit einem Schrumpfschlauch von den Einwirkungen des Bodens geschützt sind, keine ausreichende Dauerhaftigkeit aufweisen, da selbst ein unter optimalen Bedingungen aufgetragener Schrumpfschlauch mit Feuchtigkeit und Schadstoffen unterwandert wird. Bei Anwesenheit von Grundwasser kann sich die Korrosion verstärken;
- Wie die Untersuchungen weiter gezeigt haben, konnten die Defektstellen im Schrumpfschlauch mit der elektrischen Widerstandsmessung wegen fehlendem elektrolytischen Kontakt der Stahlteile zum Boden nicht zuverlässig erkannt werden, was eine zu günstige Beurteilung des Korrosionsschutzes bei der Qualitätssicherung auf der Baustelle zur Folge hat;
- Die Schutzstufe 2b – es wurde der nichtrostende Bewehrungsstahl Top12 verwendet – wies bei allen durchgeführten Untersuchungen keine Korrosionsangriffe auf, was hinsichtlich seiner Anwendung in der Geotechnik eine grosse Flexibilität erlaubt.

Aufgrund der hohen Korrosionsgefährdung bei korrodierenden Verankerungen aus unlegiertem Stahl, die mit der Bewehrung elektrisch vermascht sind, ist die elektrische Trennung dieser Strukturen von entscheidender Bedeutung. Die Verbindung zwischen Stahltragglied und Bewehrung muss zwingend vermieden werden. Aus Sicht der Forschungsstelle muss dieser Punkt auf jeder Baustelle kontrolliert und dokumentiert werden. Die Trennung kann beispielsweise durch die Verwendung von Abstandhaltern aus Kunststoff zwischen Tragglied und Bewehrungsstäben gewährleistet werden. In der Norm SIA 267 [17] ist die Widerstandsmessung II für die Kontrolle des elektrischen Widerstands zwischen dem Ankerkopf und der Tragwerksbewehrung vorgesehen ist.

Die Ergebnisse der Lösungsversuche mit den Lollipop-Prüfkörpern konnten die Resultate von den Auslagerungsversuchen bestätigen. Mittels der elektrochemischen Polarisationswiderstandsmessungen konnte für die Schutzstufe 1 gezeigt werden, dass der Korrosionsfortschritt in der Fehlstelle infolge Eigenkorrosion durch das Makroelement auf dem Pfahl, welches bei den Grossversuchen messtechnisch nicht zugänglich war, erwartungsgemäss verstärkt wird. Bei grossen Fremdkathoden wie beispielsweise eine Bewehrung in einer Bodenplatte oder in einem Fundament ist dieser Effekt jedoch praktisch vernachlässigbar, weil das Anoden-/Kathodenverhältnis zwischen Fehlstelle und Bewehrungsfläche um ein Vielfaches grösser ist als dasjenige auf dem Pfahl selbst. Für die Pfähle in den Sandboxen lag die Kathodenfläche des umhüllten Stahltragglieds unter 5% der Kathodenfläche des Bewehrungsnetzes. Weiter haben die Lollipop-Versuche gezeigt, dass die Zusammensetzung und die Qualität des Füllguts praktisch keinen Einfluss auf den Schadenfortschritt haben.

Für kurzzeitige Messungen und Parameterstudien sind Lollipop-Versuche grundsätzlich geeignet. Für Langzeituntersuchungen trifft dies nicht zu. Der Aufwand, die Zusammensetzung der Lösungen konstant zu halten, Spaltkorrosionseffekte und Salzverschleppungen zu verhindern etc. ist enorm gross und dürfte sich in den wenigsten Fällen lohnen.

5.4 Korrosivität des Bodens

In der Tabelle 2 der SN EN 206 [62] sind die Grenzwerte für die Expositionsklassen bei chemischem Angriff durch natürliche Böden und Grundwasser zusammengestellt. Die Tabelle enthält auch die entsprechenden Referenz-Prüfverfahren. Diese Tabelle wurde auch

im neuen Eurocode 2 [7] übernommen. Nicht Bestandteil der Tabelle sind Angaben zum spezifischen elektrischen Bodenwiderstand, der Acidität (Säurekonstante, pK_s -Wert), Sulfidgehalt und weiteren Parametern, die für die Korrosionsbelastung aus Böden und Wässern wichtig sein können.

Eine ausführliche und genauere Beurteilung der Korrosionsbelastung von erdüberdeckten Stahlbauteilen findet sich in [4]. In diesem Regelwerk sind diverse Verfahren zur Ermittlung und Beurteilung von korrosiven Einwirkungen aufgeführt. Zudem enthält das Dokument auch Vorgehensweisen für die Arbeiten im Feld (z.B. geoelektrische Messungen und Bodenuntersuchungen). Ein gewisser Nachteil besteht darin, dass die Untersuchung von Bodenproben aufwendig und teilweise anspruchsvoll ist, so dass sie in der Schweiz aktuell nur von zwei Prüflaboren in Zusammenarbeit durchgeführt wird. Aus dieser Sicht sollte eine vereinfachte Vorgehensweise für die korrosionstechnische Charakterisierung von Böden geprüft werden.

6 Verbesserungen für die Praxis und Hinweise für die Normierung

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts konnten, wie in Kapitel 5 erläutert, mittels Laboruntersuchungen verschiedene Erkenntnisse zum Korrosionsverhalten von ungespannten Ankern und Mikropfählen gewonnen werden. Dies betrifft die Korrosionsgefährdung bei Imperfektionen der Umhüllung von Mikropfählen mit Schutzstufe 1 und 2a/b in unterschiedlichen Bodenzusammensetzungen sowie im Bereich von Kupplungen. Mit diesen Ergebnissen werden im Folgenden technische Verbesserungen an den bestehenden Systemen vorgeschlagen und Hinweise für eine Anpassungen bzw. Präzisierung der Normen gegeben. Dadurch kann das Vertrauen in solche Systeme generell verbessert werden. Nutzniesser dieser Massnahmen sind primär die Bauherren (z.B. ASTRA, SBB, Kantone, Private), die für ihre Bauwerke dauerhafte Pfahlsysteme mit langen Nutzungsdauern fordern. Aber auch die Planer und Unternehmungen, die solche ungespannten Anker und Mikropfähle projektieren und versetzen, können von den neuen Resultaten und Folgerungen profitieren.

Mit der Einführung der 2. Generation Eurocodes ab 2026 werden wichtige Bauwerksnormen wie die Norm SIA 262 [19] oder SIA 267 [17] ausser Kraft gesetzt. Jedoch können von den betroffenen Ländern präzisierende oder ergänzende nationale Elemente (NE) verfasst werden, was von den entsprechenden Normkommissionen umgesetzt wird. Es ist zu vermuten, dass das schweizerische Konzept der Schutzstufen aufgehoben wird, da es zu einschränkend ist (z.B. bezüglich Umgang mit Selbstbohrankern). In [23] ist ein erster Vorschlag für die Einteilung der Anker- und Pfahlsysteme bezüglich Korrosionsschutzgrad enthalten. Darin werden auch Selbstbohrpfähle und Korrosionszuschläge an Verankerungen aus rohem Stahl bewertet. Eine Verknüpfung möglicher Schutzgrade mit der geplanten Nutzungsdauer und Bewertung des Bodens hinsichtlich der zu erwartenden Korrosionsgefährdung sollte aus Sicht der Forschungsstelle aufrechterhalten werden [18].

6.1 Ausbildung des Pfahlkopfs

Im Jahr 2023 erschienenen ASTRA Fachhandbuch „Tunnel / Geotechnik“ [21] werden konkrete Vorgaben für die Ausbildung des Pfahlkopfs gemacht (Abb. 62). Für die Bestvariante A wird der Einbau von Pfahlkopfschutzrohren gefordert, die auch in [23] erwähnt sind. Bei Aushubarbeiten oder Freilegen des Pfahlkopfs besteht das Risiko, dass der werkseitige Korrosionsschutz (Hüllrohr und Inneninjektion) beschädigt wird. Solche Defektstellen, die später in eine Sauberkeitsschicht (Gesteinsfundation) oder in einen Magerbeton zu liegen kommen, werden dadurch nicht oder nur unzureichend vor Korrosion geschützt. Das Pfahlkopfschutzrohr kann diese Gefährdung deutlich verringern. Nicht zulässig ist die Variante C in Abb. 62, weil das Hüllrohr nicht bis in den Konstruktionsbeton geführt ist. Der minimale Überstand von 100 mm ist schon heute eine Anforderung in [17].

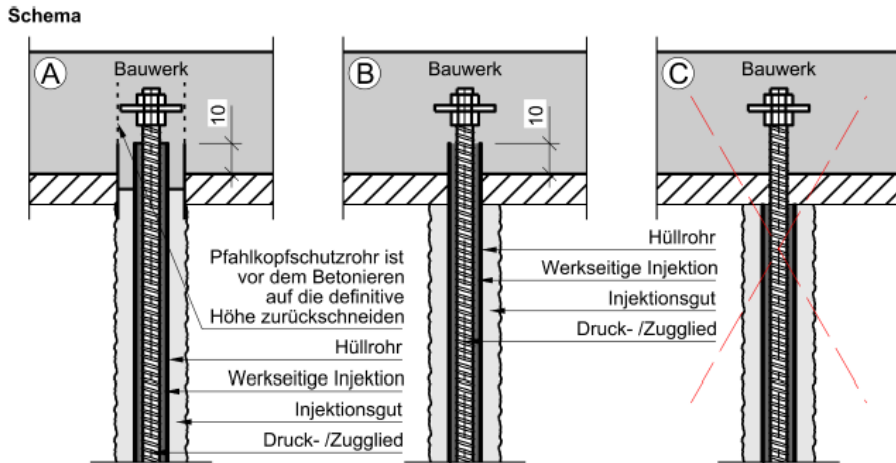


Abb. 62 Korrosionsschutz im Übergangsbereich Mikropfahl – Bauwerk [21].

(A) Bestvariante, welche a) auch bei unverrohrter Bohrung möglich ist und b) auch bei Pfahlerstellung nach Aushub bis über den Magerbeton injiziert werden kann.

(B) Gefahr der Beschädigung des werkseitigen Korrosionsschutzes bei Endaushub bzw. beim Einbringen des Magerbetons.

(C) Hinsichtlich Ausführung Korrosionsgefährdung nicht zulässig.

6.1.1 Ausführung und Prüfung Qualitätssicherung

Nebst den technischen Zeichnung ist Folgendes festgehalten:

- Während der Pfahlausführung hat der Unternehmer für jeden Mikropfahl ein detailliertes Pfahlprotokoll gemäss [16] «Allgemeine Bedingungen für geotechnische Arbeiten» zu erstellen;
- Die Unversehrtheit der Kunststoffhüllrohre (Schutzstufen 2a und 3a) im sichtbaren Kopfbereich ist vor dem Betonieren zu kontrollieren;
- Die elektrische Trennung der Mikropfähle von der Tragwerksbewehrung durch Versetzen von Distanzhaltern aus nichtleitendem Material ist vor dem Betonieren zu kontrollieren;
- Bei Mikropfählen mit Schutzstufe 2a oder 3a ist die Wirksamkeit des Korrosionsschutzes gemäss Richtlinie ASTRA 12005 [1] mit elektrischen Widerstandsmessungen zu überprüfen.

In [23, 37] wird auf eine weitere Schwachstelle am Pfahlkopf hingewiesen. Bei geneigten und vertikalen Mikropfählen kann sich infolge Bluten oder Absetzen des Füllguts hinter der Kopfplatte eine Hohlstelle ausbilden. In dieser Zone liegt das Zugglied partiell frei. Kann Wasser in diesen Bereich eindringen oder kommt es zu Kondenswasserbildungen, beginnt das Stahltragglied zu korrodieren. Demzufolge muss sichergestellt werden, dass sich hinter der Kopfplatte keine Hohlstelle bilden kann. Räume ohne Füllgut sind vor der Montage der Kopfplatte mit Mörtel zu verfüllen. In der Praxis kann die Gewährleistung mangelfreier Übergänge des Mikropfahls in den Untergrund mit Hilfskonstruktionen erreicht werden. Als Beispiel wird eine mögliche Lösung vom Tiefbauamt Graubünden angeführt. Dabei wird das Zugglied vom Planum bis zum Konstruktionsbeton mit einem Rohr umgeben, was eine Verlängerung der äusseren Injektion zum Ziel hat. Die Ausseninjektion kann so bis über die Aushubsohle und die Magerbetonschicht aufgefüllt werden (Abb. 63).



Abb. 63 Hilfskonstruktionen zur Gewährleistung mängelfreier Übergänge der Mikropfähle mit Schutzstufe 1 in den Untergrund. Links: Schutzrohr aus Kunststoff für einen sauberen Übergang zwischen Ausseninjektion und Konstruktionsbeton. Rechts: Hilfskonstruktion zur Vermeidung von Injektionsauffüllungen zwischen Entwässerungsfolie und Spritzbetonwand (Fotos René Krättli, Tiefbauamt Graubünden).

6.2 Zusätzliche konstruktive Verbesserungen

6.2.1 Korrosionsschutz von Muffenstössen (Kupplungsstellen)

Wie die Auslagerungsversuche gezeigt haben, ist Kupplungsstelle generell eine Schwachstelle, da kein zementöser Schutz und kein festes Hüllrohr vorhanden ist. Ausserdem können Defektstellen im Schrumpfschlauch mit der elektrischen Widerstandsmessung wegen fehlendem elektrolytischen Kontakt der Stahlteile zum Boden nicht zuverlässig erkannt werden. Kupplungsstellen, die nur mit einem Schrumpfschlauch von den Einwirkungen des Bodens geschützt sind, entsprechen nicht den Normvorgaben (es wird ein zementöser Schutz verlangt) und weisen keine ausreichende Dauerhaftigkeit auf, da durch allenfalls vorhandene Löcher oder Risse Feuchtigkeit an die Stahlteile gelangen und Korrosion auslösen kann, was sich bei Anwesenheit von Grundwasser noch deutlich verstärken dürfte. Aus diesem Grund fordert z.B. die deutsche Zulassung DIBt Z-32.1-2 (DYWIDAG) [5], dass der Hohlraum zwischen Mörtelsäule und Muffenstoss an beiden Seiten des Stosses vor dem Aufbringen des Schrumpfschlauchs mit einem Kunststoffdichtband (Petrolatumbänder) vollständig auszufüllen ist (Abb. 64). Es ist bekannt, dass dies in der Praxis, oft aus Unwissenheit, dass ein Kunststoffdichtband zum Schrumpfschlauch dazugehört, häufig nicht ausgeführt wird, obwohl diese Massnahme den Korrosionsschutz jedoch deutlich verbessern kann.

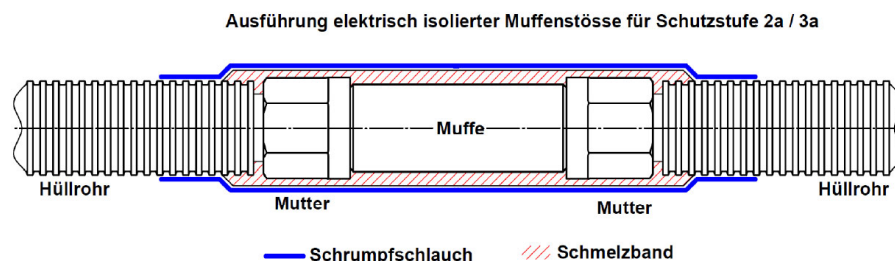


Abb. 64 Kombination von Schmelzband und Schrumpfschlauch zur Gewährleistung eines dichten Muffenstosses [55].

6.2.2 Überdeckungen des Tragglieds mit Füllgut

Aus Sicht der Forschungsstelle sollte geprüft werden, die Überdeckung vom Stahltragglied im Hüllrohr bei werkseitiger Injektion von 5 auf 10 mm zu erhöhen. Heute werden die 5 mm Abstand bzw. die Zentrierung des Stahlstabs mittels einer gewickelten PE-Schnur sichergestellt. An allen Stellen, wo die Schnur am Hüllrohr anliegt, fehlt der zementöse Korrosionsschutz. Bei 10 mm Überdeckung können andere Abstandhalter verwendet werden und die Injektion des Füllguts dürfte sich vereinfachen. Auch hat eine 10 mm Mörtelschicht einen grösseren Widerstand gegen mechanische Einwirkungen (z.B. Stösse/Schläge auf das Hüllrohr), insbesondere wenn das Hüllrohr bereits bis zur Zementsteinumhüllung verletzt ist. Nachteil ist das zusätzliche Gewicht, dass sich bei engen Platzverhältnissen und Handeinbau negativ auswirkt. In diesem Zusammenhang könnte auch eine Erhöhung der Wanddicke des HDPE-Hüllrohrs den mechanischen Schutz des vorgefertigten Pfahls verbessern, weil das Hüllrohr dadurch weniger anfällig für Defekte ist. Dies dürfte sich auch bei Einwirkung von gefrierenden Temperaturen positiv auswirken, da der Kunststoffe bei niedrigen Temperaturen zu Versprödung neigt.

Obwohl heute in den meisten Fällen für die Schutzstufe 2a vorgefertigte Pfähle eingesetzt werden, sollte in Zukunft auf die innere Injektion des Hüllrohrs auf der Baustelle verzichtet werden. Die werkseitige Injektion kann im Werk unter Ausschluss ungünstiger Wetterbedingungen ausgeführt und das Füllgut mittels Qualitätsprüfungen nach EN 446 und 447 kontrolliert werden. Auch die Dichtigkeit des Hüllrohrs kann im Wasserbad mit der Widerstandsmessung geprüft werden.

Um den Widerstand gegen chemischen Angriff und Auslaugen zu erhöhen, kann eine Erhöhung der Dicke des Füllmörtels zwischen Hüllrohr und Bohrlochwand in der Schutzstufe 2a von aktuell 20 auf 25 bis 30 mm in Betracht gezogen werden. Hauptgrund ist die vermehrte Verwendung von Kompositzementen oder Gemischen aus Zement und Zusatzstoffen, die im Vergleich zu Füllgut aus CEM I einen geringeren Widerstand gegen Auslaugen aufweisen. Betrachtet man als Beispiel ein Füllgut mit einem Auslaugkoeffizienten von 2 mm/Jahr^{0.5}, wird eine Mörtelüberdeckung von 20 mm spätestens nach 100 Jahren ausgelaugt sein (siehe auch Kapitel 5.2). Bei etwaigen Ungenauigkeiten der Überdeckung (z.B. Tragglied nicht vollständig zentriert) kann das Füllgut unter Umständen auch deutlich früher ausgelaugt sein. Mit einer Erhöhung der Überdeckung können mehr Reserven in das Tragsystem eingebaut werden.

6.3 Qualitätssicherung und Überwachung

Nebst den konstruktiven Details sind im Fachhandbuch des ASTRA weitere Angaben zu Ausführung und Qualitätssicherung sowie zur Überwachung der Mikropfähle enthalten. Wichtige Punkte sind die visuelle Kontrolle der Unversehrtheit der Kunststoffhüllrohre vor dem Einbringen des Konstruktionsbetons und die Kontrolle der elektrischen Trennung des Mikropfahls von der Bauwerksbewehrung. Diese Trennung soll durch das Verlegen von Kunststoff-Distanzhaltern sichergestellt werden. Weiter ist die Dichtigkeit der Hüllrohre bei der Schutzstufe 2a oder 3a mit elektrischen Widerstandsmessungen (Widerstandsmessung I) gemäss [17] zu überprüfen.

- Zur Gewährleistung ihrer dauerhaften Funktion sind Mikropfähle zu überwachen;
- Die Überwachung der Mikropfähle während der Nutzung erfolgt mit Kontrollmessungen von Setzungen und Verschiebungen, mit Beobachtung von Zustandsveränderungen wie Rissbildungen usw. sowie in Fällen hoher Korrosionsgefährdung mittels elektrischer Widerstandsmessung;
- Auch bei sorgfältiger Herstellung von Mikropfählen der Schutzstufen 2a oder 3a können Korrosionsangriffe nicht vollständig ausgeschlossen werden. In Fällen hoher Korrosionsgefährdung (hohe Exposition, geringer konstruktiver Schutz, Streustrom, etc.) und/oder erheblicher Konsequenzen beim Ausfall eines Mikropfahls, kann deshalb die Anordnung von elektrisch isolierten, mittels Widerstandsmessung überwachbaren Mikropfählen angebracht sein (vgl. Abb. 2 und Abb. 3). Der Krafteinleitung im Bereich des Pfahlkopfes ist besondere Beachtung zu schenken;
- Die erforderlichen Überwachungstätigkeiten während der Nutzung sind im Überwachungsplan festzuhalten.

Mit der elektrischen Widerstandsmessung kann, wie oben erwähnt, die Dichtigkeit des Hüllrohrs über die Nutzungsdauer überwacht werden. Es gibt in der Praxis auch Fälle, in den Mikropfähle mit ungenügenden Widerständen nachträglich mit Messleitungen ausgerüstet werden, damit zukünftig Aussagen zur Korrosionsgefährdung und Zustandsentwicklung gemacht werden können. Solche Fälle sind häufig Anlass von grösseren Diskussionen und hinterlassen meist eine gewisse Unsicherheit. Die Kontaktierung einzelner Mikropfähle mit dem Ziel einer korrosionstechnischen Überwachung ist aus heutiger Sicht noch nicht zufriedenstellend, weil die heutigen Messmethoden (Potenzial- oder Polarisationsmessungen) keine klaren und gesicherten Aussagen zur Zustandsentwicklung erlauben und ein späterer Ersatz geschwächter Mikropfahl kaum mehr möglich ist. Weitere messtechnische Überwachungen betreffen das Erfassen von Setzungen und Verschiebungen sowie das Beobachten von Rissbildungen. Alle erforderlichen Überwachungstätigkeiten während der Nutzung sind im Überwachungsplan festzuhalten.

6.4 Zukünftiger Forschungs- und Normierungsbedarf

Aufgrund der durchgeführten Laboruntersuchungen und den Ergebnissen dieser Arbeit ergeben sich verschiedene Fragestellungen, die im Rahmen zukünftiger Forschungstätigkeit genauer abgeklärt werden sollten. Nachfolgend sind mögliche Themen angeführt:

- Wie wirken sich Korrosionsstellen bei Druckbelastung auf die Tragfähigkeit und Stabilität eines Pfahls aus, insbesondere bei langen Pfählen. Auch die Auswirkung von Auslaugung auf das mechanische Verhalten sollte genauer geklärt werden;
- Mit welchen Zementsorten soll in Zukunft der Korrosionsschutz des Mikropfahls sichergestellt werden bzw. müssen gewisse Zementsorten ausgeschlossen werden? Diese Fragestellung ist insbesondere auch relevant für gespannte Systeme, für die aus Sicht der Normen fast ausschliesslich Füllgut aus CEM I vorgegeben ist;
- Im Zusammenhang mit der Einführung der Eurocodes 2. Generation stellt sich die Frage, wie die Anforderungen an den Korrosionsschutz von ungespannten Ankern und Mikropfählen, z.B. mit Hilfe nationaler Elemente (NE), zukünftig festgelegt werden sollen und wie die Verwendung von Selbstbohrpfählen oder neueren Systemen in die Normen aufgenommen werden sollen;
- Die Anforderungen an die Frischmörtelprüfungen auf der Baustelle und die vorhandenen normativen Vorgaben sind teilweise ungenügend bzw. bedingt geeignet. Aus diesem Grund sollten klare Anforderungsprofile und ein geeignetes Set von aussagekräftigen Prüfungen ausgearbeitet werden;
- Mit welchen Methoden sollen ungespannte Anker und Mikropfähle zukünftig überwacht werden, wenn ungenügende Widerstände bei der Isolationsprüfung vorhanden sind oder mit korrodierenden Stellen am Pfahl zu rechnen ist;
- Mit welchen Verfahren kann der Korrosionsschutz bei Kupplungsstellen verbessert werden? Schrumpfschläuche sind anfällig auf Verletzungen und verspröden im Laufe der Zeit. Ausserdem ist zwischen Schrumpfschlauch und Stahloberfläche des Tragglieds ein Spalt vorhanden, wo Feuchtigkeit und Schadstoffe eindringen können. Der Gebrauch von Schmelzbändern unter dem Schrumpfschlauch kann die Situation verbessern. Die langfristige Dauerhaftigkeit solcher Bänder ist jedoch fraglich und müsste genauer geprüft werden;
- Welche korrosionstechnischen Parameter sollen bei Bodenuntersuchungen erhoben werden;
- Selbstbohrpfähle waren nicht Teil dieser Arbeit. Solche Systeme sollten hinsichtlich ihrer Dauerhaftigkeit ebenfalls genauer untersucht werden, da sie in der Praxis regelmässig angewendet werden;
- Weitere Fragestellungen sind auch in [23] aufgeführt.

Glossar

Begriff	Bedeutung
AAR	Alkali-Aggregat-Reaktion
ASTRA	Bundesamt für Strassen
AGB	Arbeitsgruppe Brückenforschung
BAFU	Bundesamt für Umwelt
CEN	Europäisches Komitee für Normung
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. – Technisch-wissenschaftlicher Verein
EC	Eurocode, Europäisches Normenwerk
EN	Europäische Norm
GEWI	Gewindestahl
ISO	Internationale Organisation für Normung
KWK	Korrosionswiderstandsklasse gemäss SIA 2029
SIA	Schweizer Ingenieur- und Architektenverein
SN	Schweizer Norm
SNV	Schweizerische Normen-Vereinigung
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute

Literaturverzeichnis

Weisungen und Richtlinien

- [1] Bundesamt für Strassen ASTRA (1999), „**Richtlinie Projektierung und Ausführung von Kunstbauten der Nationalstrassen**“.
- [2] Bundesamt für Umwelt BAFU (2007), „**Lawinenverbau im Anbruchgebiet**“, *Technische Richtlinie als Vollzugshilfe*.
- [3] Bundesamt für Umwelt BAFU (2022), „**Typenliste Ankermörtel**“, *Vollzugshilfe, Aktualisierte Ausgabe Oktober 2022*.
- [4] DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. – Technisch-wissenschaftlicher Verein (2011), „**Beurteilung der Korrosionsbelastungen von erdüberdeckten Rohrleitungen und Behältern aus unlegierten und niedrig legierten Eisenwerkstoffen in Böden**“, DVGW GW 9 (A).
- [5] Deutsches Institut für Bautechnik DIBt (2021), Allgemein bauaufsichtliche Zulassung, „**DYWIDAG GEWIPfähle (Mikropfähle) mit Traggliedern aus Betonstabstahl mit Gewinderippen B500B, Ø 20 mm, Ø 25 mm, Ø 28 mm, Ø 32 mm, Ø 40 mm und Ø 50 mm**“, Z-32.1-2.

Normen

- [6] Deutsches Institut für Normung DIN (2018), „**Korrosion der Metalle – Korrosionswahrscheinlichkeit metallener Werkstoffe bei äußerer Korrosionsbelastung – Teil 3: Rohrleitungen und Bauteile in Böden und Wässern**“, *Norm DIN 50929:2018*
- [7] Eurocode 2 (2023) – „**Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1 1: Allgemeine Regeln und Regeln für Hochbauten, Brücken und Ingenieurbauwerke**“, *Norm EN 1992-1-1*.
- [8] Europäisches Komitee für Normung CEN (2007), „**Einpressmörtel für Spannglieder – Prüfverfahren**“, *Norm SN EN 445:2007*.
- [9] Europäisches Komitee für Normung CEN (2007), „**Einpressmörtel für Spannglieder – Einpressverfahren**“, *Norm SN EN 446:2007*.
- [10] Europäisches Komitee für Normung CEN (2007), „**Einpressmörtel für Spannglieder – Allgemeine Anforderungen**“, *Norm SN EN 447:2007*.
- [11] Europäisches Komitee für Normung CEN (2015), „**Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Bodenvernagelung**“, *Norm SN EN 14490:2010*.
- [12] Europäisches Komitee für Normung CEN (2015), „**Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau – Mikropfähle**“, *Norm SN EN 14199:2015*.
- [13] Europäisches Komitee für Normung CEN (2003), „**Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe – Korrosionswahrscheinlichkeit in Böden – Teil 2: Niedrig- und unlegierte Eisenwerkstoffe**“, *Norm SN EN 12501-2:2003*.
- [14] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2023), „**Register der frei gegebenen Zemente, Zusatzstoffe und Kombinationen von Zement und Zusatzstoffen**“, *Norm SN EN 206:2013+A2:2021*.
- [15] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2013), „**Nichtrostender Betonstahl**“, *Merkblatt SIA 2029*.
- [16] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2004), „**Allgemeine Bedingungen für geotechnische Arbeiten**“, *Norm SIA 118/267*.
- [17] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2013), „**Geotechnik**“, *Norm SIA 267*.
- [18] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2020), „**Einwirkungen auf Tragwerke**“, *Norm SIA 261*.
- [19] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2013), „**Betonbau**“, *Norm SIA 262*.
- [20] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2019), „**Betonbau – Ergänzende Festlegungen**“, *Norm SIA 262/1*.
- [62] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2021), „**Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität**“, *Norm SN EN 206:2013+A2:2021*.
- [63] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2011), „**Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement**“, *Norm SN EN 197-1:2011*

Fachhandbuch des ASTRA

- [21] Bundesamt für Strassen ASTRA (2023), „**Tunnel / Geotechnik (FHB T/G)**“, *Fachhandbuch ASTRA 24001, Ausgabe 2023, Januar*.

Dokumentation

-
- [22] Arnold, A., Angst, U., Brem, M., Montani, S. & Pedrozzi, G. (2024). „**Zustandserfassung von bestehenden Mikropfählen und permanenten ungespannten Ankern**“, Forschungsprojekt AGB 2019/004.
-
- [23] Brem, M. & Ryser, M. (2023). „**Sachstandsbericht zur Dauerhaftigkeit von Mikropfählen und ungespannten Ankern**“, VSS Bericht Nr. 717.
-
- [24] Carde, C., Francois, R. & Torrenti, J.M. (1996). „**Leaching of both calcium hydrates and C-S-H from paste: modeling the mechanical behavior**“, *Cement and Concrete Research*, 26:1257-1268.
-
- [25] Criado, M., Bernal, S.A., Garcia-Triñanes, P. & Provis, J.L. (2018). „**Influence of slag composition on the stability of steel in alkali-activated cementitious materials**“, *Journal of Materials Science*, Vol. 53, Issue 7, 5016-5035.
-
- [26] Elsener, B., Flückiger, D., Wojtas, H. & Böhni, H. (1996). „**Methoden zur Erfassung der Korrosion von Stahl in Beton**“, VSS Bericht Nr. 521.
-
- [27] Electronic Research Inc. ERI (2011). „**Tower Site Grounding, Guy Anchor Rods, and Galvanic Corrosion**“, *New York Ennes Workshop*.
-
- [28] Escalante, E. (1989). „**Concepts of Underground Corrosion**“, *Effects of Soil Characteristics on Corrosion*, ASTM STP 1013, V. Chaker and J.D. Palmer, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
-
- [29] Amziane, S., Khayat, K. Sonebi, M. & Perrot, A. (2023). „**RILEM TC 266-MRP: round-robin rheological tests on high performance mortar and concrete with adapted rheology-rheometers, mixtures and procedures**“, *Materials and Structures*, 56:90.
-
- [30] Fédération internationale du béton (fib) (2010). „**Model Code 2010**“, *First complete draft, Volume 1*.
-
- [31] Garcia, V., Francois, R., Carcasse, M. & Gegout, P. (2014). „**Potential measurement to determine the chloride threshold concentration that initiates corrosion of reinforcing steel bar in slag concretes**“, *Materials & Structures*, Volume 47, Issue 9, 1483-1499.
-
- [32] Georget, F., et al. (2018). „**Reactive transport modelling of cement paste leaching in brines**“. *Cement and Concrete Research*, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.015>.
-
- [33] von Greve-Dierfeld, S., Trtik, P., Grolimund, D. & Hunkeler, F. (2018). „**Investigation of Ca-Leaching by combining neutron imaging and mikro XRF/XRD chemical imaging**“, *RILEM WEEK 2018 Delft, Netherlands*.
-
- [34] von Greve-Dierfeld, S. (2022). „**Korrosionsrisiko in der XC2-Exposition**“, *cemsuisse-Projekt 201903, Forschungsbericht*.
-
- [35] Hassell, R.C. (2008). „**Corrosion of Rock Reinforcement in Underground Excavations**“, *Dissertation von der Western Australian School of Mines*.
-
- [36] Hunkeler, F. (1994). „**Grundlagen der Korrosion und der Potentialmessung bei Stahlbetonbauten**“, VSS Bericht Nr. 510.
-
- [37] Hunkeler, F., Matt, P., von Matt, U. & Werner, R. (2005). „**Spannglieder, Schrägseile und Anker – Beschreibung der Systeme und Erkenntnisse aus Korrosionsschäden**“, VSS Bericht Nr. 588.
-
- [38] Heukamp, F.H., Ulm, F.-J. & Germaine, J.T. (2001). „**Mechanical properties of calcium-leached cement pastes – Triaxial stress states and the influence of the pore pressures**“, *Cement and Concrete Research*, 31: 767-774.
-
- [39] Kamali, S., Gérard, B. & Moranville, M. (2003). „**Modelling the leaching kinetics of cementbased materials – influence of materials and environment**“, *Cement and Concrete Composites* 25:451-458.
-
- [40] Kuranchie, F.A., Shukla, S.K., Habibi, D., Zhao, X. & Kazi, M. (2014). „**Studies on electrical resistivity of Perth sand**“, *International Journal of Geotechnical Engineering*.
-
- [41] Küchler Technik AG (2020). „**KÜPS® Permanent System**“, *Produkte-Information*.
-
- [42] Leemann, A. & Moro, F. (2016). „**Carbonation of concrete: the role of CO₂ concentration, relative humidity, and CO₂ buffer capacity**“, *Materials and Structures* 50(1):30.
-
- [43] Loser, R., Lothenbach, B., Leemann, A. & Tuchschnid M. (2010). „**Chloride resistance of concrete and its binding capacity – Comparison between experimental results and thermodynamic modelling**“, *Cement & Concrete Composites*, 32, 34-42.
-
- [44] Martinelli-Orlando, F. & Angst, U. (2022). „**Monitoring corrosion rates with ER-probes – a critical assessment based on experiments and numerical modelling**“, *Corrosion Engineering, Science and technology*, Vol. 57, No. 3, 254-268.
-

-
- [45] Mohammadi, S.D. (2016). „**Use of a perth sand penetrometer (PSP) device to determine the engineering parameters of sands**“, *Acta Geotechnica Slovenica*.
-
- [46] King, F. (2008). „**Corrosion of carbon steel under anaerobic conditions in a repository for SF and HLW in Opalinus Clay**“, *Technical Report 08-12*.
-
- [47] Nürnberger, U. (1995). „**Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen**“, *Band 1, Bauverlag*.
-
- [48] Nürnberger, U. (2012). „**Long-time behavior of non-galvanized and galvanized steels for geotechnical stabilization applications**“, *Materials and Corrosion*, 63, No. 12.
-
- [49] Pandey, L. M. (2015). „**Electrical resistivity of sandy soil with water, leachates and seawater**“. *Edith Cowan University*. <https://ro.ecu.edu.au/theses/1724>.
-
- [50] Parrott, L.J. (1990). „**Damage caused by carbonation of reinforced concrete**“, *Materials and Structures/Matériaux et Contructions*, Vol. 23, 230-234.
-
- [51] Romanoff, M. (1957). „**Underground Corrosion**“, *NBS Circular 579, U.S. Dept. of Commerce*.
-
- [52] Schiegg, Y. & Minic, A. (2018). „**Bewehrungskorrosion infolge Auslaugens des Betons**“, *Zertifikatsarbeit, FHNW CAS «Betontechnologie»*.
-
- [53] Schiegg, Y. (2014). „**Feldversuch Mikropfähle Gemeinde Emmen**“, *TFB Bericht Nr. 103603-01*.
-
- [54] Schiegg, Y. & von Greve-Dierfeld, S. (2019). „**Investigations of corrosion due to calcium leaching**“, *Eurocorr 2019, Sevilla (Spain)*.
-
- [55] Stahlton AG (2021). „**Stabsysteme in der Geotechnik**“, *Firmenbrochure, www.stahlton-bautechnik.ch*.
-
- [56] Torrenti, J.M., Mainguy, M., Adenot, F. & Tognazzi, C. (1998). „**Modelling of leaching in concrete**“, in de Borst, R., Bicanic, N., Mang, H., Meschke, G. (Eds.), *Proceeding of Euro-C 98, Computational Modelling of Concrete Structure, Balkema, Rotterdam, The Netherland*, pp. 531–538.
-
- [57] Ulm, F.-J., Heukamp, F.H. & Germaine, J.T. (2001). „**Durability Mechanics of Calcium Leaching of Concrete and Beyond**“, *Fracture Mechanics of Concrete Structures, de Borst et al (eds)© 2001 Swets & Zeitlinger, Lisse*.
-
- [58] Werner, R., Hunkeler, F. & Mühlethaler, U. (2016). „**Evaluation des Frosttaumittelwiderstands von Beton – Vergleich von vier Prüfverfahren**“, *VSS Bericht Nr. 1554*.
-
- [59] Electronic Research Inc (2011). Tower Site Grounding, „**Guy Anchor Rods and Galvanic Corrosion**“, New York Ennes Workshop.
-
- [60] Henning, O & Knöfel, D. (2002). „**Baustoffchemie**“, 6. Auflage, Verlag Bauwesen, Berlin.
-
- [61] Knoblauch, H. & Schneider, U. (2001). „**Bauchemie**“, 4. Auflage, Werner-Verlag, Düsseldorf.
-

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 01.05.2024

Grunddaten

Projekt-Nr.: AGB 2019/002

Projekttitel: Laborversuche zur Korrosionsbeständigkeit von Mikropfählen und permanenten ungespannten Ankern (Bodennägel)

Enddatum: 31.05.2024

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts konnten anhand von Laboruntersuchungen im Klein- und Grossmassstab verschiedene Erkenntnisse zum Korrosionsverhalten von Mikropfählen und ungespannten Ankern der Schutzstufen 1, 2a und 2b gewonnen werden. Vor den korrosionstechnischen Versuchen wurden Untersuchungen an gängigen Füllgutvarianten durchgeführt. Dabei hat sich gezeigt, dass Mischungen rein aus Zement und Wasser ungeeignet sind, da sie zu Blutwasserbildungen und Entmischung neigen. Bei w/b-Werten über 0.6 können u.a. Probleme mit der Festigkeit entstehen. Bei der Verwendung von Zusatzmitteln (z.B. Verflüssiger) ist auf die Verwendung geeigneter Mischer zu achten. Die Baustellenprüfungen am Füllgut gemäss SN EN 445 werden in der Praxis häufig verlangt. Es ist zu berücksichtigen, dass die Messung des Fließvermögens nur für dünnflüssige Füllgut-Suspensionen geeignet ist. Bis heute wenig beachtet ist der Widerstand gegen Auslaugen (Expositionsklassen XAc, XC2 und XD2a) bei ständigem Kontakt von Zementstein mit dem Boden oder Grundwasser. Mit einer neuen, beschleunigten Auslaugprüfung, wie in diesem Bericht gezeigt, könnte diesem Aspekt in Zukunft vermehrt Rechnung getragen werden. Die verschiedenen korrosionstechnischen Versuche in Lösung und Sandböden haben ergeben, dass Mikropfähle mit Schutzstufe 2a grundsätzlich gut vor Korrosion geschützt sind, solange das Kunststoffhüllrohr intakt ist. Mikropfähle mit Schutzstufe 2b (Tragglied aus nichtrostendem Chrom-Stahl) haben auch unter korrosiven Bedingungen ein günstiges Korrosionsverhalten gezeigt. Mit ungenügender Dauerhaftigkeit ist zu rechnen, wenn Defektstellen am Hüllrohr und eine fehlende oder schadhafte/ausgelaugte Umhüllung des Tragglieds vorhanden sind. Je nach Zusammensetzung und Feuchtigkeit des Bodens muss in diesem Fall (Eigenkorrosion) mit Korrosionsraten zwischen 0.02 und 0.2 mm/Jahr gerechnet werden. Ein besonders grosses Korrosionsrisiko besteht dann, wenn ungenügend geschützte Mikropfähle mit der Bewehrung von Fundamenten, Bodenplatten, Stützmauern etc. elektrisch verbunden sind. Durch diese sogenannte Makroelementbildung wird der Stahlabtrag im Vergleich zur Eigenkorrosion stark beschleunigt (um ca. einen Faktor 10). Im Extremfall wurde bei Traggliedern mit Schutzstufe 2a ein Korrosionsfortschritt von mehr 2 mm/Jahr gemessen. Dabei hat sich gezeigt, dass sich der Korrosionsangriff wegen dem isolierenden Hüllrohr seitlich nicht ausbreiten kann und demzufolge verstärkt in die Tiefe fortschreitet. Kupplungen, die mit Schrumpfschläuchen geschützt werden, bilden eine Schwachstelle. Schon bei kleinen Defekten (Perforierungen, Risse) dringt Feuchtigkeit in die Kupplung ein, was flächige Korrosionsangriffe am Tragglied und an der Muffe auslöst. Aufgrund der Ergebnisse dieser Arbeit wurden konkrete Vorschläge zur Verbesserung des Korrosionsschutzes gemacht und Auswirkungen auf die Normierung diskutiert.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Die Frage, ob es bei ungespannten Ankern und Mikropfählen ein relevantes Korrosionsproblem gibt und unter welchen Bedingungen mit einem erhöhten Korrosionsrisiko gerechnet werden muss, konnte im Rahmen dieser Forschungsarbeit zufriedenstellend beantwortet werden. Anhand von Lösungs- und Auslagerungsversuchen im Labor konnten unterschiedliche Anker-/Pfahlkonfigurationen (Schutzstufe 1, 2a und 2b) korrosionstechnisch untersucht werden. Der Fokus lag dabei auf typischen und aus heutiger Sicht als kritisch erachteten, konstruktiven Details solcher Systeme. Konkret erlaubten diese Versuche eine Abschätzung der in ungünstigen Fällen (Worst-Case-Szenario) möglichen maximalen Korrosionsraten.

Folgerungen und Empfehlungen:

Erhärtetes Füllgut ist der primäre Korrosionsschutz von Mikropfählen und Bodennägeln. Die Zusammensetzung (Bindemittel, Zusatzmittel), die Wahl geeigneter Mischer und ein w/b-Wert unter 0.5 sind die Hauptfaktoren für stabiles und dauerhaftes Füllgut. Die Problematik des Auslaugens zementöser Systeme in Böden und Grundwasser wird zukünftig an Bedeutung gewinnen. Mikropfähle und Bodennägel mit Schutzstufe 1 und 2a werden im Fall eines unzureichenden oder geschädigten Korrosionsschutzes und feuchter Umgebung durch Korrosion angegriffen. Dies gilt insbesondere auch für Kupplungen, sobald der Schrumpfschlauch Defektstellen wie Risse oder Ablösungen aufweist. Besonders hohe Korrosionsgeschwindigkeiten sind zu erwarten, wenn die angegriffenen Tragglieder mit der passiven Bewehrung eines Fundaments oder einer Bodenplatte etc. elektrisch verbunden sind. Mit konstruktiven Verbesserungen wie z.B. der Ausbildung des Pfahlkopfs, der Verwendung von Schmelzbändern bei Kupplungsstellen und geringen Anpassungen bei den Umhüllungsstärken sowie konsequenter Umsetzung von Qualitätsprüfungen auf der Baustelle kann der Korrosionsschutz von ungespannten Verankerungen weiter verbessert werden. Es wird empfohlen, diese Erkenntnisse bei den nationalen Elementen zum Eurocode 2. Generation zu berücksichtigen.

Publikationen:

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Schlegg

Vorname: Yves

Amt, Firma, Institut: TFB AG

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:

Schlegg



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Mit dieser Arbeit konnte die Forschungsstelle zeigen, dass der Korrosionsschutz von Mikropfählen und Bodennägeln auch in Zukunft keineswegs vernachlässigt werden darf, sondern weiter verbessert werden sollte. Die Ergebnisse der Laborversuche geben ein umfassendes Bild des Systemverhaltens von Füllgut und Tragglied, den äusseren Einwirkungen sowie konstruktiven Randbedingungen, was in ungünstigen Fällen zu ernststen Korrosionsproblemen führen kann. Die Morphologie des Korrosionsangriffs in der Fehlstelle eines Pfahlschnitts mit Schutzstufe 2a zeigt eindrücklich die Auswirkung eines Makroelements, wenn das korrodierende Stahltragglied mit der passiven Bewehrung elektrisch verbunden ist. Das Thema Auslaugen zementöser Baustoffe behandelt einen noch wenig bekannten Aspekt der Dauerhaftigkeit. Dieser sollte nicht nur im Zusammenhang mit ungespannten Ankern sondern allgemein für Betonbauteile, die permanent im Boden bzw. wasserberührt sind, betrachtet werden (z.B. Fundamente von Kunstbauten). Selbstbohrpfähle waren nicht Teil dieser Untersuchungen. Über die Dauerhaftigkeit solcher Systeme ist noch wenig bekannt. Diese könnten Anlass für ergänzende Forschungsarbeiten sein. Wichtige Ergebnisse dieser Arbeiten sollten in der Normierung, insbesondere bei den nationalen Elementen des Eurocodes 2. Generation, berücksichtigt werden.

Umsetzung:

Die Laborversuche wurden von der Forschungsstelle zweckmässig aufgebaut. An verschiedenen Füllgut-Varianten wurden sowohl standardisierte Prüfungen durchgeführt, mit der Bestimmung des Auslaugwiderstands aber auch neue Methoden angewendet. Die praxisnahen Auslagerungsversuche von Mikropfählen mit unterschiedlichen Schutzstufen, Muffenstössen und simulierten Fehlstellen in sandigen Böden variabler Feuchtigkeit und Korrosivität haben einige interessante Resultate und Erkenntnisse erbracht. Durch die messtechnische Erfassung der Korrosionsprozesse, kombiniert mit schichtweisem Freilegen der Tragglieder, konnten die Folgen von Schwachstellen im Korrosionsschutz der Pfähle klar und nachvollziehbar aufgezeigt werden. Die Lösungsversuche haben die Ergebnisse der Auslagerungsversuche bestätigt. Zudem hat sich gezeigt, dass die Zusammensetzung und die Qualität des Füllguts keinen wesentlichen Einfluss auf den Schadenfortschritt haben, wenn Korrosion am Tragglied eingesetzt hat.

weitergehender Forschungsbedarf:

Es sollte geklärt werden, wie sich Korrosionsstellen und Auslaugung von Füllgut auf die Tragfähigkeit und Stabilität eines Mikropfahls auswirken. Die Methoden für die Zustandserfassung und Überwachung von Bodennägeln und Mikropfählen müssen verbessert werden. Für die Eigenschaften von Verpressmörteln und die Prüfmethode auf der Baustelle sollten klarere Vorgaben gemacht werden.

Einfluss auf Normenwerk:

Mit der Einführung der EC2G wird die Schweizer Norm SIA 267 zurückgezogen. Bei der Erarbeitung der nationalen Elemente (NE) ist es wichtig, dass die Anforderungen an die Dauerhaftigkeit von ungespannten Ankern und Mikropfählen aufrechterhalten werden. Dazu gehören auch die qualitätsfördernden Massnahmen auf der Baustelle. Die Einführung einer Auslaugprüfung ist zu diskutieren.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Käser

Vorname: Martin

Amt, Firma, Institut: Bundesamt für Strassen ASTRA

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission: