



Sachstandsbericht zur Dauerhaftigkeit von Mikropfählen und permanenten ungespannten Ankern

Rapport d'avancement sur la durabilité des systèmes de micropieux et de tirants passives permanents

Progress report on the durability of micropiles and permanent non tensioned anchors

**SGK Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz
Dr. Martin Brem**

**Dr. Vollenweider AG
Matthias Ryser**

**Forschungsprojekt AGB 2018/004 auf Antrag der Arbeitsgruppe
Brückenforschung (AGB)**

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

Sachstandsbericht zur Dauerhaftigkeit von Mikropfählen und permanenten ungespannten Ankern

Rapport d'avancement sur la durabilité des systèmes de micropieux et de tirants passives permanents

Progress report on the durability of micropiles and permanent non tensioned anchors

**SGK Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz
Dr. Martin Brem**

**Dr. Vollenweider AG
Matthias Ryser**

**Forschungsprojekt AGB 2018/ auf Antrag der Arbeitsgruppe
Brückenforschung (AGB)**

Juli 2023

717

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Dr. Martin Brem

Mitglieder

Matthias Ryser

Begleitkommission

Präsident

Dr. Martin Käser

Mitglieder

Prof. Dr. Ueli Angst

Prof Dr. Walter Kaufmann

Prof Dr. Albin Kenel

Dr. Kristian Schellenberg

Duncan Moore

René Krättli

Antragsteller

Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB)

Bezugsquelle

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

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Zusammenfassung	7
Résumé	11
Summary	15
1 Einführung	19
1.1 Hintergrund.....	19
1.2 Aufgabenstellung und Vorgehen.....	19
1.3 Abgrenzung.....	20
2 Korrosion von Mikropfählen und ungespannten Ankern	21
2.1 Hintergrund und Begriffe	21
2.1.1 Korrosionserscheinungen auf homogenen Elektroden	21
2.1.2 Galvanische Korrosion	27
2.1.3 Lochkorrosion.....	31
2.1.4 Spannungsrisskorrosion.....	33
2.2 Korrosions-Mechanismus von Stahl im Boden	34
2.3 Exposition und Korrosionsgefährdung	36
2.3.1 Einleitung.....	36
2.3.2 Heterogenität des Untergrunds	37
2.3.3 Chlorideintrag	37
2.3.4 Sulfateintrag	37
2.3.5 Organische Säuren	37
2.3.6 Wasserdurchlässigkeit	37
2.3.7 Mechanische Beanspruchung.....	37
2.3.8 Streustrombeeinflussung	38
2.4 Anforderungen an den Korrosionsschutz von Mikropfählen	38
3 Korrosionsschutz Systeme	39
3.1 Einleitung.....	39
3.2 Zementumhüllung (GCP)	39
3.3 Verzinkung (ZCP).....	39
3.4 Organische Beschichtungen (CCP)	40
3.5 Korrosionszuschlag (STA)	40
3.6 Hüllrohre (DCP).....	40
3.7 Nichtrostende Stähle (MCP)	41
3.8 Schutz gegen galvanische Korrosion.....	41
3.9 Schutz gegen Streuströme.....	42
3.10 Schutz des Mikropfahlkopfes	42
3.11 Weitere Schutzsysteme	43
4 Korrosionsschutz von Mikropfählen in Normen und Richtlinien	45
4.1 Übersicht Normierung	45
4.1.1 Geotechnik in der Normierung	45
4.1.2 Dauerhaftigkeit und Korrosionsschutz in der Normierung	46
4.1.3 Normen zur Bewertung der Bodenaggressivität	46
4.2 Allgemeine Grundsätze für die Projektierung	46
4.2.1 Gewährleistung der Dauerhaftigkeit.....	47
4.2.2 Nutzungsdauer.....	47
4.2.3 Schadenausmass und Relevanz des Bauteils/Bauwerks	48
4.2.4 Bewertung der Korrosivität des Baugrunds	50
4.3 Konstruktive und materialtechnische Vorgaben.....	54
4.3.1 Konstruktive Aspekte, Hüllrohr	55

4.3.2	Beton, Mörtel, Verpressmörtel	55
4.3.3	Überdeckung.....	56
4.3.4	Prüfung des Korrosionsschutzes und Qualitätssicherung	57
4.3.5	Weitere internationale Dokumente	57
4.4	Fazit	58
5	Beschreibung der Mikropfahl- und Ankersysteme	59
5.1	Übersicht, Abgrenzung und Begriffe	59
5.1.1	Pfahlsysteme	59
5.1.2	Ankersysteme	60
5.1.3	Gesamtübersicht Anker- und Pfahlsysteme	63
5.1.4	Begriffe	64
5.1.5	Unterscheidung von Zugpfählen und ungespannten Ankern	66
5.2	Anwendung und Verbreitung	66
5.2.1	Historische Entwicklung	66
5.2.2	Datenerhebung bei Unternehmern und Lieferanten	68
5.2.3	Anwendungsgebiete und Häufigkeit	69
5.3	Beschreibung der Einbauverfahren und Werkstoffe	72
5.3.1	Einbauverfahren.....	72
5.3.2	Tragglieder	76
5.3.3	Zementmörtel	80
5.4	Beschreibung der Korrosionsschutz-Systeme.....	80
5.4.1	Übersicht.....	80
5.4.2	Zementumhüllung (GCP)	84
5.4.3	Verzinkung (ZCP)	85
5.4.4	Organische Beschichtungen und Duplex-Beschichtung (CCP+ZCP)	85
5.4.5	Kunststoff-Hüllrohre (DCP)	86
5.4.6	Hüllrohre aus Stahl (DCP)	86
5.4.7	Nichtrostender Stahl (MCP)	86
5.4.8	Korrosionszuschlag (STA)	87
5.5	Bewertung des Korrosionsschutzes der Mikropfahlsysteme	88
6	Qualitätssicherung und Überwachung	91
6.1	Fehlerquellen und Ausführungsmängel	91
6.1.1	Zementumhüllung	91
6.1.2	Verzinkung und Beschichtungen	93
6.1.3	Kunststoff-Hüllrohre	93
6.2	Schadensbild und Schadenshäufigkeit.....	93
6.3	Massnahmen zur Qualitätssicherung	94
6.3.1	Qualitätssicherung durch den Hersteller.....	94
6.3.2	Qualitätssicherung auf der Baustelle	94
6.3.3	SIA-Register.....	96
6.4	Möglichkeiten zur Überwachung.....	96
7	Diskussion	97
7.1	Gefährdungen und Risiken bei Mikropfählen und ungespannten Ankern	97
7.2	Empfehlungen für Anpassungen und Ergänzungen der Normvorschriften	98
7.3	Offene Fragen und Forschungsbedarf.....	100
	Anhänge.....	101
	Glossar.....	109
	Literaturverzeichnis.....	111
	Projektabschluss	115

Zusammenfassung

Aufgabenstellung

Das Forschungsprojekt AGB 2018/004 ist Bestandteil des von der Arbeitsgruppe Brücken, Geotechnik und Tunnel im Jahr 2018 mit der Einladung zur Einreichung von Forschungsgesuchen initiierten Forschungsschwerpunkts zur Korrosionsbeständigkeit von Mikropfählen und permanenten ungespannten Ankern. Im Rahmen dieses Themas sind zwei weitere Forschungsprojekte in Bearbeitung (AGB 2019/004, "Zustandserfassung von bestehenden Mikropfählen und permanenten ungespannten Ankern" und AGB 2019/002, "Laborversuche zur Korrosionsbeständigkeit von Mikropfählen und permanenten ungespannten Ankern"). Die drei Forschungsprojekte haben zum Ziel, das Korrosionsrisiko von Mikropfählen und ungespannten Ankern besser abschätzen zu können.

Ziel des vorliegenden Projektes ist es, einen Sachstandsbericht zur Dauerhaftigkeit von Mikropfahl-Systemen zu erarbeiten, welcher die aktuelle Problematik in der Umsetzung des Korrosionsschutzes beschreibt, analysiert, bewertet und Empfehlungen für Normen und Anwendungen erarbeitet sowie die offenen Fragen und den Forschungsbedarf formuliert

Vorgehen

Das gewählte Vorgehen gliedert sich in folgende Schritte:

- Mit einer Literaturstudie werden die Grundlagen des Korrosionsschutzes von Mikropfählen und permanenten ungespannten Ankern beschrieben und die Probleme in Bezug auf die Dauerhaftigkeit bei der praktischen Ausführung und der verfügbaren Verfahren zur Sicherstellung der Qualität analysiert.
- Eine Übersicht über die nationalen und internationalen Normvorschriften zu Mikropfählen und permanenten ungespannten Ankern (Systemanforderungen, Korrosionsschutz, Ausführungsbestimmungen, Widersprüche, Mängel) wird erarbeitet.
- Eine Analyse der am Markt erhältlichen und dem Stand der Technik entsprechenden Systeme für Mikropfähle und permanente ungespannte Anker wird durchgeführt. Mittels einer Umfrage bei Unternehmern und Lieferanten werden Daten zu Anwendungsgebiet und Häufigkeit ermittelt.
- Die erhaltenen Resultate werden diskutiert und es werden Empfehlungen abgegeben

Resultate

Im vorliegenden Forschungsprojekt wurde ein Sachstandsbericht über den Stand der Technik bei Mikropfählen und permanenten ungespannten Anker erarbeitet. Die folgenden Themengebiete sind Bestandteil des Berichts:

- Grundlagen der Korrosionsprozesse von Mikropfählen und permanenten ungespannten Ankern im Boden
- Übersicht über die verschiedenen, bei Mikropfählen und permanenten ungespannten Ankern eingesetzten Korrosionsschutzsysteme
- Übersicht über die nationalen und internationalen Normvorschriften zu Mikropfählen und permanenten ungespannten Ankern
- Beschreibung der verschiedenen, am Markt erhältlichen und dem Stand der Technik entsprechenden Systeme für Mikropfähle und permanente ungespannte Anker
- Beschreibung der praktischen Ausführung (Einbau) der verschiedenen Systeme
- Beschreibung und Beurteilung möglicher Fehlerquellen, Ausführungsmängel, Ausführungskontrollen und Massnahmen zur Qualitätssicherung
- Empfehlungen für Anpassungen und Ergänzungen der Normvorschriften
- Offene Fragen und Empfehlungen für zukünftige Forschungsarbeiten

Empfehlungen für die Anpassung von Normvorschriften

In Hinblick auf die Neuregelung der Anforderungen an den Korrosionsschutz im Rahmen der Einführung des Eurocodes können die folgenden Empfehlungen formuliert werden:

- Klärung der Begriffe und Definitionen
- Konsistente Regelung für alle Systeme (gebohrte Mikropfähle, gerammte Pfähle, ungespannte Anker)
- Erarbeitung einer einfachen, praxistauglichen Wegleitung für die Klassierung des Baugrunds (Korrosivität)
- Erarbeitung von einfachen, praxistauglichen Vorgaben für eine risikobasierte Wahl des erforderlichen Schutzgrades, abhängig von:
 - Korrosivität des Baugrunds
 - Art der Einwirkungen (ständig oder aussergewöhnlich)
 - Art des Tragwerks (Redundanz und Bruchverhalten)
 - Nutzungsdauer
 - Schadensfolgen
- Beschreibung und Klassierung der am häufigsten angewendeten Systeme für Mikropfähle und ungespannte Anker bezüglich ihres Korrosionsschutzgrads (Berücksichtigung der Selbstbohrsysteme), unter Berücksichtigung der Abhängigkeit der Schutzwirkung von der Ausführungsqualität
- Genauere Definition der geforderten bzw. zugelassenen Stahlqualitäten, Hinterfragung der anzuwendenden Kriterien (sind allenfalls gewisse Kriterien nur für Betonstahl relevant, für Tragglieder von Mikropfählen und ungespannten Ankern aber nicht?)
- Genauere Definition der Anforderungen an das verwendete Injektionsgut (Zementmörtel)
- Hinterfragen der unterschiedlichen Anforderungen für Druck- und Zugpfähle

Forschungsbedarf

Im Rahmen der Erarbeitung des Sachstandsberichts hat sich bei verschiedenen Fragestellungen gezeigt, dass für die Festlegung der Anforderungen an die Anker- und Pfahlsysteme die notwendigen Grundlagen fehlen oder nur teilweise vorhanden sind. Es besteht der folgende Forschungsbedarf:

- Anforderungen an den Korrosionsschutz:
Die Grundlagen für die Festlegung der Anforderungen an den Korrosionsschutz von Anker- und Pfahlsystemen sind nur teilweise vorhanden. Insbesondere im Bereich der Zementumhüllung stellt sich die Frage, welche minimalen Zementumhüllung aus Sicht des Korrosionsschutzes tatsächlich notwendig ist, und mit welchen Sollwerten diese in der Praxis mit den verschiedenen Einbaumethoden erreicht werden kann.
- Korrosionsschutz in der Praxis:
Eine lückenlose Zementumhüllung des Stahles ist entscheidend für den Korrosionsschutz. In der Praxis werden jedoch Injektionsschläuche in diesem Bereich verlegt und es werden bei einigen Systemen Nachinjektionen durchgeführt. Ebenfalls ist davon auszugehen, dass sich durch Zug- und Biegebeanspruchungen Risse in der Zementumhüllung bilden. Aus Sicht der Dauerhaftigkeit stellt sich die Frage, wie diese Abweichungen vom theoretischen Korrosionsschutz einzuordnen sind und welche Anforderungen gegebenenfalls definiert werden müssen, um den benötigten Korrosionsschutz in der praktischen Anwendung sicherzustellen.
- Nachhaltigkeit:
Wie verhalten sich neue auf Nachhaltigkeit optimierte Zementsorten im Boden bezüglich der Dauerhaftigkeit und dem Korrosionsschutz von Mikropfählen und permanenten ungespannten Ankern? Wie müssen die Anforderungen angepasst werden, um einen gleichwertigen Korrosionsschutz zu erhalten?

- Qualitätssicherung:
Wie können die Daten von den Sensoren, welche in modernen Maschinen eingebaut sind, genutzt werden, um eine Verbesserung der Qualitätsüberwachung auf der Baustelle zu erreichen? Es werden messtechnische Methoden zur Überwachung der Qualität der Zementinjektion und Mörtel benötigt, welche auf der Baustelle ohne grossen Aufwand und besondere Fachkenntnisse durchgeführt werden können. Welche Parameter sind relevant und müssen tatsächlich gemessen werden, um die gewünschte Qualität nach dem Einbau auf der Baustelle sicherzustellen?

Résumé

Définition des tâches

Le projet de recherche AGB 2018/004 fait partie de l'axe de recherche sur la résistance à la corrosion des micropieux et des ancrages permanents non tendus initié par le groupe de travail Ponts, géotechnique et tunnels en 2018 avec l'invitation à soumettre des demandes de recherche. Dans le cadre de ce thème, deux autres projets de recherche sont en cours (AGB 2019/004, "Relevé d'état de micropieux et d'ancrages permanents non tendus existants" et AGB 2019/002, "Essais en laboratoire sur la résistance à la corrosion de micropieux et d'ancrages permanents non tendus"). Les trois projets de recherche ont pour objectif de mieux évaluer le risque de corrosion des micropieux et des ancrages non tendus.

L'objectif du présent projet est d'élaborer un rapport sur la durabilité des systèmes de micropieux, qui décrit, analyse et évalue la problématique actuelle de la mise en œuvre de la protection contre la corrosion et élabore des recommandations pour les normes et les applications, tout en formulant les questions ouvertes et les besoins en matière de recherche.

Procédure

La procédure choisie s'articule autour des étapes suivantes :

- Une étude bibliographique permet de décrire les principes de base de la protection contre la corrosion des micropieux et des ancrages permanents et d'analyser les problèmes de durabilité liés à la mise en œuvre pratique et aux méthodes disponibles pour garantir la qualité.
- Une vue d'ensemble des prescriptions normatives nationales et internationales relatives aux micropieux et aux ancrages permanents non tendus (exigences du système, protection contre la corrosion, dispositions d'exécution, contradictions, défauts) est élaborée.
- Une analyse des systèmes de micropieux et d'ancrages permanents non tendus disponibles sur le marché et correspondant à l'état de l'art sera effectuée. Une enquête auprès des entrepreneurs et des fournisseurs permettra d'obtenir des données sur le domaine d'application et la fréquence.
- Les résultats obtenus sont discutés et des recommandations sont émises

Résultats

Dans le cadre de ce projet de recherche, un rapport a été rédigé sur l'état de l'art des micropieux et des ancrages permanents non tendus. Les thèmes suivants font partie intégrante du rapport :

- Principes de base des processus de corrosion des micropieux et des ancrages permanents non tendus dans le sol
- Aperçu des différents systèmes de protection contre la corrosion utilisée pour les micropieux et les ancrages permanents non tendus
- Aperçu des dispositions normatives nationales et internationales relatives aux micropieux et aux ancrages permanents
- Description des différents systèmes de micropieux et d'ancrages permanents non tendus disponibles sur le marché et correspondant à l'état de l'art.
- Description de la réalisation pratique (installation) des différents systèmes
- Description et évaluation des sources d'erreurs possibles, des défauts d'exécution, des contrôles d'exécution et des mesures d'assurance qualité

- Recommandations pour des adaptations et des compléments aux prescriptions de la norme
- Questions en suspens et recommandations pour les recherches futures

Recommandations pour l'adaptation des dispositions normatives

En vue de la nouvelle réglementation des exigences en matière de protection contre la corrosion dans le cadre de l'introduction des Eurocodes, les recommandations suivantes peuvent être formulées :

- Clarification des termes et des définitions
- Régulation cohérente pour tous les systèmes (micropieux forés, pieux battus, ancrages non tendus)
- Elaboration d'un guide simple et pratique pour la classification du sol de fondation (corrosivité)
- Elaboration de directives simples et pratiques pour un choix du degré de protection requis en fonction des risques, en fonction de :
 - Corrosivité du sol de fondation
 - Type d'impact (permanent ou exceptionnel)
 - Type de structure porteuse (redondance et comportement à la rupture)
 - Durée d'utilisation
 - Conséquences du dommage
- Description et classification des systèmes les plus utilisés pour les micropieux et les tirants d'ancrage non tendus en fonction de leur degré de protection contre la corrosion (prise en compte des systèmes auto-forants), en tenant compte de la dépendance de l'effet de protection à la qualité de l'exécution
- Définition plus précise des qualités d'acier exigées ou autorisées, remise en question des critères à appliquer (éventuellement, certains critères ne sont-ils pertinents que pour l'acier à béton, mais pas pour les éléments porteurs des micropieux et des ancrages non tendus).
- Définition plus précise des exigences relatives au produit d'injection utilisé (mortier de ciment)
- Remettre en question les différentes exigences pour les pieux de compression et de traction

Besoin de recherche

Dans le cadre de l'élaboration du rapport d'état des lieux, il est apparu, pour différentes questions, que les bases nécessaires à la définition des exigences relatives aux systèmes d'ancrage et de pieux faisaient défaut ou n'étaient que partiellement disponibles. Les besoins de recherche suivants existent :

- Exigences en matière de protection contre la corrosion :
Les bases pour la définition des exigences en matière de protection anticorrosion des systèmes d'ancrage et de pieux ne sont que partiellement disponibles. En particulier dans le domaine de l'enrobage de ciment, la question se pose de savoir quel enrobage minimal de ciment est réellement nécessaire du point de vue de la protection contre la corrosion, et avec quelles valeurs de consigne celui-ci peut être atteint dans la pratique avec les différentes méthodes de pose.
- Protection contre la corrosion dans la pratique :
Un enrobage de ciment sans faille de l'acier est décisif pour la protection contre la corrosion. Cependant, dans la pratique, des tuyaux d'injection sont posés dans cette zone et des injections ultérieures sont effectuées dans certains systèmes. De même, il faut partir du principe que des fissures se forment dans l'enrobage de ciment sous l'effet des contraintes de traction et de flexion. Du point de vue de la durabilité, la question se

pose de savoir comment classer ces écarts par rapport à la protection théorique contre la corrosion et quelles exigences doivent être définies, le cas échéant, pour garantir la protection contre la corrosion nécessaire dans l'application pratique.

- Durabilité :

Comment se comportent les nouveaux types de ciment dans le sol en ce qui concerne la durabilité et la protection contre la corrosion des micropieux et des ancrages permanents non tendus ? Comment les exigences doivent-elles être adaptées pour obtenir une protection équivalente contre la corrosion ?

- L'assurance qualité :

Comment les données des capteurs installés dans les machines modernes peuvent-elles être utilisées pour améliorer la surveillance de la qualité sur le chantier ? Des méthodes de mesure sont nécessaires pour surveiller la qualité de l'injection de ciment et du mortier, qui peuvent être réalisées sur le chantier sans grand effort ni connaissances techniques particulières. Quels sont les paramètres pertinents et qui doivent effectivement être mesurés pour garantir la qualité souhaitée après la mise en place sur le chantier ?

Summary

Task

The research project AGB 2018/004 is part of the research focus on the corrosion resistance of micropiles and permanent non tensioned anchors initiated by the Bridges, Geotechnics and Tunnels Working Group in 2018 with the invitation to submit research proposals. Within the scope of this topic, two further research projects are in progress (GC 2019/004, "Condition assessment of existing micropiles and permanent non tensioned anchors" and GC 2019/002, "Laboratory tests on the corrosion resistance of micropiles and permanent non tensioned anchors"). The three research projects aim to better assess the corrosion risk of micropiles and non tensioned anchors.

The aim of this project is to develop a status report on the durability of micropile systems, which describes, analyses and evaluates the current problems in the implementation of corrosion protection and develops recommendations for standards and applications, as well as formulating the open questions and the need for research.

Procedure

The chosen procedure is divided into the following steps:

- With a literature study, the basics of corrosion protection of micropiles and permanent anchors are described, and the problems related to durability in practical execution and available procedures to ensure quality are analyzed.
- An overview of the national and international standard regulations on micropiles and permanent non tensioned anchors (system requirements, corrosion protection, implementation provisions, contradictions, deficiencies) is being compiled.
- An analysis of the state-of-the-art micropile and permanent non-tensioned anchor systems available on the market will be carried out. By means of a survey among contractors and suppliers, data on the field of application and frequency will be determined.
- The results obtained are discussed and recommendations are made.

Results

In this research project, a state-of-the-art report on micropiles and permanent non-tensioned anchors was prepared. The following topics are part of the report:

- Fundamentals of corrosion processes of micropiles and permanent non tensioned anchors in soil
- Overview of the different corrosion protection systems used for micropiles and permanent non tensioned anchors.
- Overview of national and international standard regulations on micropiles and permanent anchors
- Description of the different state-of-the-art micropile and permanent non-tensioned anchor systems available on the market.
- Description of the practical execution (installation) of the different systems
- Description and assessment of possible sources of error, execution deficiencies, execution controls and quality assurance measures
- Recommendations for adaptations and additions to the standard regulations
- Open questions and recommendations for future research

Recommendations for the adaptation of standard provisions

Regarding the new regulation of the requirements for corrosion protection within the framework of the introduction of the Eurocode, the following recommendations can be formulated:

- Clarification of terms and definitions
- Consistent control for all systems (drilled micropiles, driven piles, non-tensioned anchors)
- Development of a simple, practical guideline for the classification of the subsoil (corrosivity)
- Development of simple, practical guidelines for a risk-based selection of the required level of protection, depending on:
 - Corrosiveness of the subsoil
 - Type of impact (permanent or exceptional)
 - Type of structure (redundancy and fracture behavior)
 - Useful life
 - Consequences of damage
- Description and classification of the most frequently used systems for micropiles and non tensioned anchors with regard to their degree of corrosion protection (consideration of self-drilling systems), taking into account the dependence of the protection effect on the quality of workmanship.
- More precise definition of the required or approved steel qualities, questioning of the criteria to be applied (are certain criteria only relevant for reinforcing steel, but not for load-bearing elements of micropiles and non tensioned anchors?)
- More precise definition of the requirements for the injection material used (cement mortar)
- Questioning the different requirements for compression and tension piles

Research needs

During the preparation of the status report, it became apparent for various questions that the necessary bases for determining the requirements for anchor and pile systems are lacking or only partially available. There is a need for the following research:

- Requirements for corrosion protection:
The basics for determining the requirements for corrosion protection of anchor and pile systems are only partially available. Particularly in the area of cement cover, the question arises as to what minimum cement cover is actually necessary from the point of view of corrosion protection, and with what target values this can be achieved in practice with the various installation methods.
- Corrosion protection in practice:
A crack-free cement cover of the steel is crucial for corrosion protection. In practice, however, injection hoses are laid in this area and post-injections are carried out in some systems. It can also be assumed that cracks form in the cement cover due to tensile and bending stresses. From the point of view of durability, the question arises as to how these deviations from the theoretical corrosion protection are to be classified and which requirements may have to be defined in order to ensure the required corrosion protection in practical application.
- Sustainability:
How do new types of cement behave in soil with regard to the durability and corrosion protection of micropiles and permanent non tensioned anchors? How do the requirements have to be adjusted to obtain equivalent corrosion protection?
- Quality assurance:
How can the data from the sensors installed in modern machines be used to improve quality monitoring on the construction site? Technical measurement methods are

needed to monitor the quality of cement injection and mortar, which can be carried out on the construction site without much effort and special expertise. Which parameters are relevant and actually need to be measured to ensure the desired quality after installation on the construction site?

1 Einführung

1.1 Hintergrund

Mikropfähle und ungespannte Anker werden in der Geotechnik in vielen Situationen als permanenter Bestandteil von Foundationen oder zur Sicherung von Geländesprüngen eingesetzt. Insbesondere bei engen Platzverhältnissen, an Orten, wo der Einsatz von schweren Maschinen nicht möglich ist, oder für nachträgliche Verstärkungen sind Mikropfähle und ungespannte Anker eine wirtschaftliche Lösung.

Der Korrosionsschutz von Mikropfählen und ungespannten Ankern ist in den SIA-Normen und in den EN-Normen geregelt. Aus historischen Gründen bestehen dabei für Mikropfähle und für ungespannte Anker teilweise unterschiedliche Regeln, obwohl es sich dabei oft um konstruktiv identische Bauteile handelt. Bei der Umsetzung dieser Regeln in der Praxis bestehen zurzeit Unsicherheiten, welche dazu geführt haben, dass die Regeln zum Korrosionsschutz sehr unterschiedlich ausgelegt werden. Weiter wurden viele neue Systeme und Einbaumethoden entwickelt, welche vor allem wirtschaftliche Vorteile aufweisen, bezüglich dem Korrosionsschutz aber nicht in jedem Fall einen Fortschritt bringen und bei welchen oft nicht ganz klar ist, wie die Normbestimmungen anzuwenden sind.

Die Gründe für die Unsicherheit in der Umsetzung der Regeln zum Korrosionsschutz von Mikropfählen und ungespannten Ankern sind vielfältig: Neben unklaren Bestimmungen in den Normen, mangelnder Beachtung in der Projektierung und in der Ausführung, fehlender Sachkenntnis usw. spielt auch die Tatsache eine Rolle, dass die Dauerhaftigkeit von Bauwerken einen langen Zeithorizont hat und in Konkurrenz zu wirtschaftlichen Interessen steht, welche sich kurzfristig auswirken.

1.2 Aufgabenstellung und Vorgehen

Ziel des vorliegenden Projektes war es, einen Sachstandsbericht zur Dauerhaftigkeit von Mikropfahl-Systemen und von Systemen für ungespannte Anker zu erarbeiten, welcher die aktuelle Problematik in der Umsetzung des Korrosionsschutzes beschreibt, analysiert, bewertet und Empfehlungen für Normen und Anwendungen erarbeitet sowie die offenen Fragen und den Forschungsbedarf formuliert. Konkret sollen dabei die folgenden Aspekte behandelt werden:

- Es wird eine Übersicht über die verschiedenen, in Europa am Markt erhältlichen und dem Stand der Technik entsprechenden Systeme für Mikropfähle und ungespannte Anker erstellt.
- Es wird eine Übersicht über die verschiedenen, bei Mikropfählen und ungespannten Ankern eingesetzten Korrosionsschutzsysteme verfasst. Erkannte Schwachstellen und Schädigungspotentiale der Systeme werden dokumentiert.
- Massnahmen zur Qualitätssicherung bei Verwendung von Mikropfählen und ungespannten Ankern werden beschrieben.
- Die praktische Ausführung (Einbau) der verschiedenen Systeme einschliesslich möglicher Fehlerquellen, Ausführungsmängel, Ausführungskontrollen und Massnahmen zur Qualitätssicherung wird dargestellt.
- Die Risiken und Gefährdungen bei Mikropfählen und permanenten ungespannten Ankern werden dargelegt.
- Es wird eine Übersicht über die nationalen und internationalen Normvorschriften zu Mikropfählen und permanenten ungespannten Ankern erstellt (Systemanforderungen, Korrosionsschutz, Ausführungsbestimmungen, Widersprüche, Mängel).
- Es werden Empfehlungen für Anpassungen und Ergänzungen der Normvorschriften erarbeitet.
- Offene Fragen und Empfehlungen für zukünftige Forschungsarbeiten werden dargelegt.

Auf Basis dieser Daten wird der aktuelle Sachstand in Bezug auf die Anwendung von Mikropfahlsystemen und ungespannten Ankern dargelegt. Damit können die bestehenden Unsicherheiten ausgeräumt und offene Fragen identifiziert werden.

1.3 Abgrenzung

Der vorliegende Sachstandsbericht behandelt die Dauerhaftigkeit von Mikropfählen bis zu einem Durchmesser von 300 mm und von ungespannten Ankern. Dabei beschränkt sich der Sachstandsbericht auf Mikropfähle und ungespannte Anker mit Zug- bzw. Druckgliedern aus Stahl (Stab, Hohlstab, Rohr, Profilstahl oder Stahlseil), welche über die ganze Pfahl- bzw. Ankerlänge einen Verbund mit dem Baugrund aufweisen, sei es durch direkte Reibung zwischen Stahl und Baugrund oder über eine Mantelinjektion mit Zementmörtel.

Vorgefertigte Verdrängungspfähle (Ramm- bzw. Vibropfähle) aus Beton und Holz weisen bezüglich Dauerhaftigkeit andere Fragestellungen auf und werden deshalb im vorliegenden Bericht nicht behandelt, auch wenn diese teilweise Durchmesser von weniger als 300 mm aufweisen.

Konventionelle Bohrpfähle aus Ortsbeton mit einem Durchmesser von weniger als 300 mm gelten nach Norm SN EN 14199 [1] bzw. SN EN 1536 [2] zwar ebenfalls als Mikropfähle, werden jedoch in der Schweiz praktisch nicht verwendet und deshalb im vorliegenden Bericht nicht behandelt.

Ebenfalls nicht behandelt werden ungespannte Anker mit einer punktuellen mechanischen Verankerung am erdseitigen Ende des Ankers, wie sie häufig als temporäre Felsanker im Tunnelbau (sog. Keilanker) und teilweise auch als temporäre Lockergesteinsanker (sog. Telleranker) eingesetzt werden.

Vorgespannte Anker sind nicht Bestandteil der Forschungsarbeit, und zwar unabhängig davon, ob das Zugglied aus hochfestem Spannstahl oder Betonstahl besteht, da bei diesen wegen der Ausbildung einer freien Ankerlänge bezüglich Dauerhaftigkeit bzw. Korrosion eine ganze Reihe zusätzlicher Aspekte zu betrachten wäre.

Verdrängungspfähle aus Stahlrohren oder Stahlprofilen mit Durchmessern von mehr als 300 mm werden im vorliegenden Bericht nicht direkt behandelt. Eine sinngemässe Übertragung der Erkenntnisse aus dem Forschungsbericht auf diese Pfahltypen ist jedoch möglich.

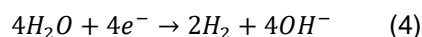
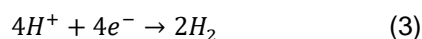
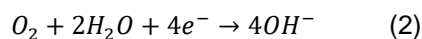
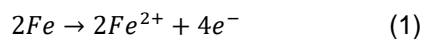
2 Korrosion von Mikropfählen und ungespannten Ankern

2.1 Hintergrund und Begriffe

2.1.1 Korrosionserscheinungen auf homogenen Elektroden

Korrosion wird generell als messbare Veränderung eines Werkstoffs durch Reaktion mit seiner Umgebung bezeichnet. Die Umgebung besteht dabei aus einem Elektrolyten, das heisst einem wässrigen Medium mit gelösten Ionen. Dieser Elektrolyt besteht in der Bautechnik üblicherweise aus Boden, Beton oder Wasser. Die durch die Wechselwirkung zwischen dem Metall und dem Elektrolyten verursachte Veränderung führt dabei zu einer Beeinträchtigung der Funktion des betroffenen Bauteils.

Bei den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Mikropfählen und ungespannten Ankern handelt es sich um stabförmige Druck- und/oder Zugglieder aus Stahl im Erdboden. Im Zusammenhang mit diesen Strukturen bezieht sich die Definition der Korrosion primär auf die elektrochemische Oxidation des Stahls in einer wässrigen oder feuchten Umgebung mit den Oxidationsmitteln Sauerstoff (O_2) oder Wasserstoffionen (H^+). Diese für Korrosion relevanten elektrochemischen Reaktionen (1), (2), (3) und (4) werden kurz erläutert: Die Korrosion (Oxidation) von metallischem Eisen gemäss Reaktion (1) führt zur Freisetzung von Elektronen. Die Oxidation von Eisen wird auch als anodische Reaktion bezeichnet. Dies bedeutet, dass der Korrosionsprozess nur ablaufen kann, wenn diese Elektronen in einer zeitgleich ablaufenden kathodischen Reduktionsreaktion verbraucht werden. Dafür kommt primär die Reduktion von im Wasser gelöstem Sauerstoff gemäss Reaktion (2) in Frage. Stahl wird aber auch zusätzlich unter Wasserstoffentwicklung gemäss Reaktion (3) oder (4) korrodieren. Alle diese kathodischen Reduktionsreaktionen (2)-(4) führen zur Aufnahme von Elektronen und ermöglichen somit den Korrosionsprozess von Eisen gemäss Reaktion (1).



Aus diesen Ausführungen folgt sofort, dass die in Reaktion (1) durch Oxidation (Korrosion) freigesetzten Elektronen zeitgleich für die Reduktionsreaktionen (2)-(3) verbraucht werden müssen. Die genauere Betrachtung der Reaktionen (2), (3) und (4) macht deutlich, dass diese entweder Hydroxidionen (OH^-) erzeugen oder Wasserstoffionen (H^+) verbrauchen. Dies bedeutet, dass alle relevanten Reduktionsreaktionen den pH-Wert des Elektrolyten an der Stahloberfläche erhöhen. Allerdings werden die in Reaktion (1) gebildeten Eisenionen zur Bildung von Rost führen (z.B. $Fe(OH)_2$), was den pH-Wert des Elektrolyten durch den Verbrauch von Hydroxidionen verringert. Dies bedeutet, dass die beim Korrosionsprozess ablaufende Oxidation von Eisen den pH-Wert absenkt und die zugehörigen Reduktionsreaktionen den pH-Wert erhöhen.

Die Korrosion wird üblicherweise als homogener Prozess basierend auf einer Mischelektrode beschrieben. Dabei laufen die kathodischen Reaktionen (2), (3) und (4) sowie die Eisenoxidation (1) gleichmässig verteilt homogen auf der Stahloberfläche ab. Dieser Fall ist schematisch in *Abb. 1a*) gezeigt, wobei die kathodischen Reduktionsreaktionen mit blauen, und die anodischen Oxidationsreaktionen mit roten Pfeilen dargestellt sind. Aufgrund der Homogenität der Elektrode kommt es nicht zu einer räumlichen Auftrennung der Reaktionen und es erfolgt kein Elektronenfluss im Metall sowie kein Ionenfluss im Elektrolyten. Dies hat wichtige Konsequenzen für den

Korrosionsprozess. Die durch Reduktion gebildeten Hydroxydionen werden von den durch die Oxidation gebildeten sauren Eisenkorrosionsprodukten neutralisiert. Da die Ströme für die Oxidation und die Reduktion identisch sein müssen, verschiebt sich der pH-Wert bei homogener Flächenkorrosion daher nur geringfügig.

Unter gewissen Bedingungen kann sich als Folge der auf der Metalloberfläche ablaufenden Reaktionen eine schützende Oxidschicht bilden (*Abb. 1b*). Dieser sogenannte Passivfilm hat bei Stahl eine Dicke von bis zu 3 nm, was ca. zehn Atomlagen Eisenoxid entspricht. Trotz seiner geringen Dicke behindert der Passivfilm den Übertritt der in Reaktion (1) gebildeten Eisenionen in den Elektrolyten. Dadurch verringert sich der Korrosionsprozess auf vernachlässigbare Geschwindigkeiten.

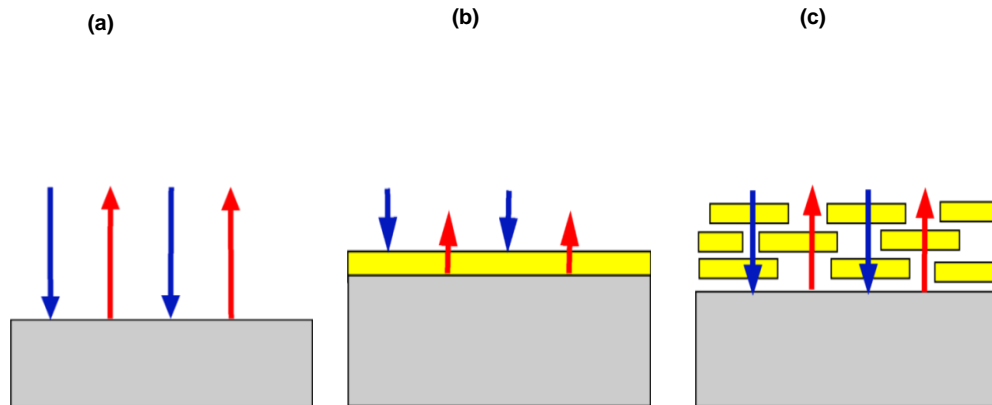


Abb. 1 Schematisch auf der homogenen Mischelektrode ablaufenden elektrochemischen Reaktionen, wobei rot für die Oxidation für Eisen und blau für die Reduktionsreaktionen steht. a) Flächenkorrosion von Eisen; b) Passivität von Eisen; c) Korrosion unter einer Rostschicht

Durch Passivität können folglich Strukturen mit hervorragender Dauerhaftigkeit erstellt werden. Dieser Effekt wird beim Stahl in Beton genutzt, da im hohen pH-Wert der Betonporenlösung Eisenoxide thermodynamisch stabil sind. In der Folge ist Stahl in Beton bei erhöhten pH-Werten spontan passiv. Bei nichtrostenden Stählen führt das Legierungselement Chrom zu thermodynamisch stabilen Eisen/Chromoxiden in neutralen und sauren Elektrolyten. Der nichtrostende Stahl ist in der Folge nicht auf einen erhöhten pH-Wert für die spontane Bildung eines Passivfilms angewiesen.

Diese Ausführungen machen deutlich, dass für die Bewertung des Korrosionsverhaltens zwei Fragen relevant sind:

1. Wird das Metall unter den vorliegenden Bedingungen korrodieren?
2. Wie schnell läuft diese Korrosion ab?

Die Frage 1 kann mit Hilfe der Thermodynamik beantwortet werden. Diese beschreibt die möglichen stabilen Zustände Metall/Elektrolyt und ermöglicht Aussagen in Bezug auf den erwarteten Zustand, welcher sich als Folge von Potenzial des Stahls und des pH-Wert des Elektrolyten ergibt. Das Potenzial ergibt sich aus mindestens zwei gleichzeitig auf der Stahloberfläche ablaufenden elektrochemischen Reaktionen (z.B. Oxidationsreaktion (1) und Reduktionsreaktion (2)). Das Potenzial wird mit einem Spannungsmessgerät zwischen dem Stahl und einer Bezugselektrode (z.B. gesättigte Kupfer-Kupfersulfatelektrode CSE) gemessen. Die Bereiche für Korrosion und Passivität sind für Stahl in Abhängigkeit des pH-Werts und des Potenzials in *Abb. 2* dargestellt. Dieses sogenannte Pourbaix Diagramm ermöglicht sofort Aussagen zum thermodynamisch stabilen Zustand von Stahl in einem Elektrolyten von pH 7 zu treffen. Es wird deutlich, dass in nahezu neutralen Wässern und Böden der Stahl im Korrosionsbereich liegt, wie aus dem mit dem roten Punkt markierten Korrosionspotenzial folgt. Aus dem Pourbaix Diagramm in *Abb. 2* folgt auch sofort der positive Effekt des alkalischen Betons: Bei pH-Werten grösser als 9 liegt Stahl über den gesamten Stabilitätsbereich von Wasser zwischen den Gleichgewichtslinien für

Wasserstoff- und Sauerstoffentwicklung im passiven Zustand vor. Der typische Zustand von Stahl in Beton ist mit dem orangen Punkt dargestellt. Diese Ausführungen zeigen die Möglichkeiten zur Beantwortung der Frage 1 basierend auf den wichtigen Einflussfaktoren Potenzial und pH-Wert.

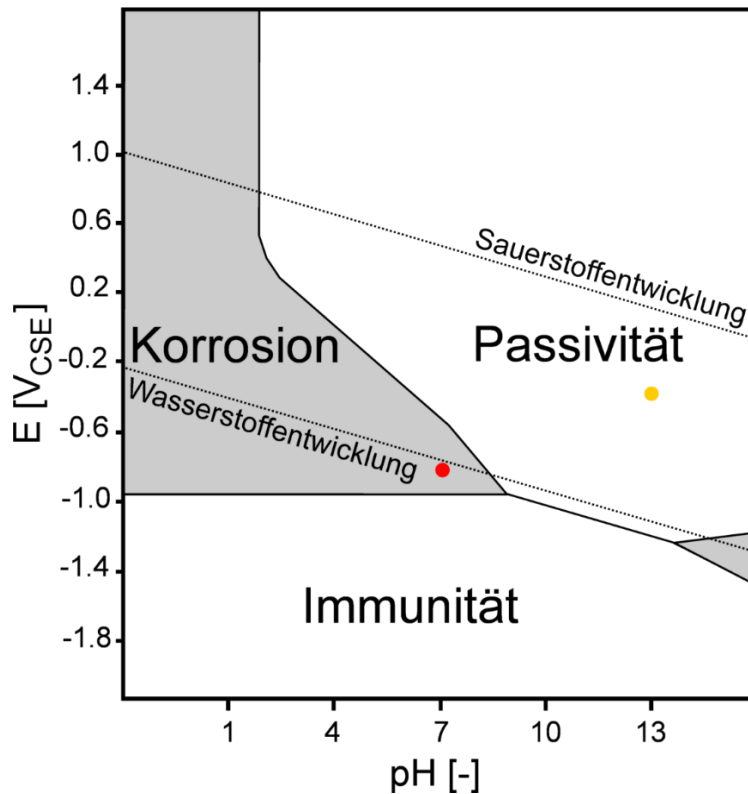


Abb. 2 Pourbaix Diagramm für Eisen für eine Fe^{2+} Konzentration von 10^{-6} M. Der rote Punkt zeigt die Position von Stahl in Boden und der orange Punkt die Position von Stahl in Beton.

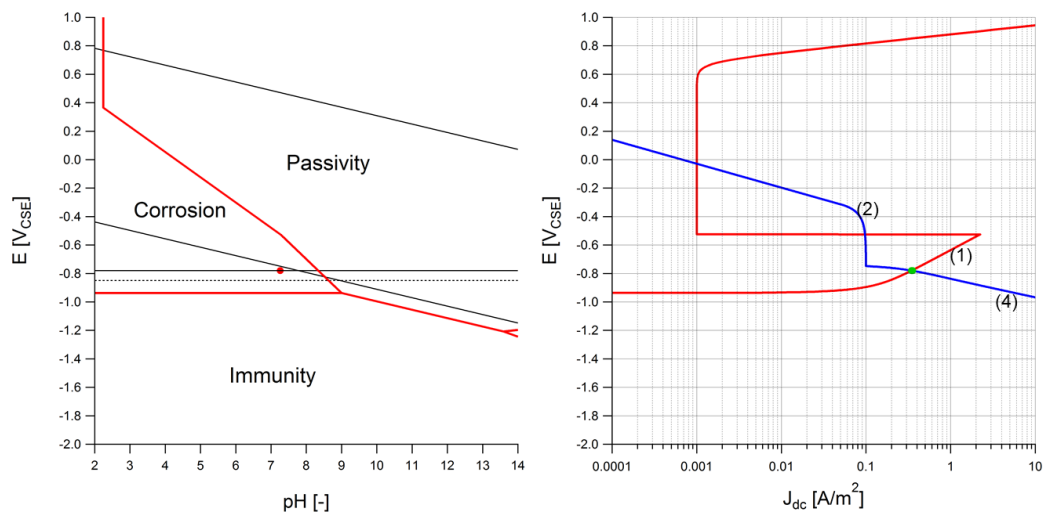


Abb. 3 Korrosionspotential und pH-Wert berechnet für einen Elektrolytwiderstand von $60 \Omega m$ bei einem pH-Wert von 7. Links: Pourbaixdiagramm mit den berechneten Werten dargestellt als roter Punkt. Die gestrichelte Linie stellt das Schutzkriterium für kathodischen Schutz von $-0,85 V_{CSE}$ und die durchgezogene Linie das Korrosionspotential von $-0,78 V_{CSE}$ dar. Die Berechnung erfolgte mit einer Fe^{2+} Konzentration von 10^{-6} M. Rechts: Evansdiagramm der anodischen Reaktionen (rot) für Reaktion (1) und kathodischen Reaktionen (blau) für Reaktionen (2) und (4) auf Stahl beim entsprechenden pH-Wert 7.

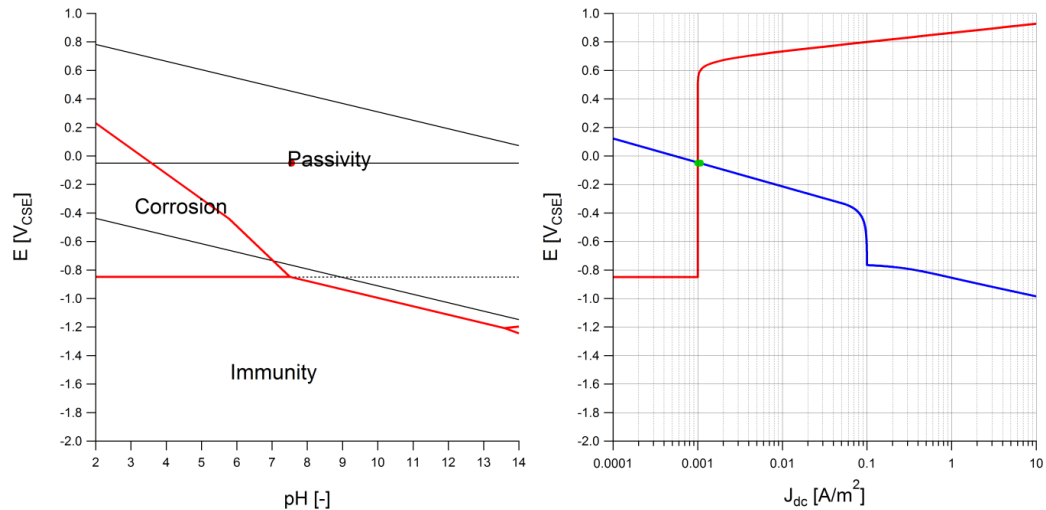


Abb. 4 Korrosionspotential und pH-Wert berechnet für einen Elektrolytwiderstand von $60 \Omega\text{m}$ bei einem pH-Wert von 7.5. Links: Pourbaixdiagramm mit den berechneten Werten dargestellt als roter Punkt. Die gestrichelte Linie stellt das Schutzkriterium für kathodischen Schutz von $-0.85 V_{CSE}$ und die durchgezogene Linie das Korrosionspotenzial von $-0.05 V_{CSE}$ dar. Die Berechnung erfolgte mit einer Fe^{2+} Konzentration von 10^{-3} M . Rechts: Evansdiagramm der anodischen (rot) und kathodischen Reaktionen (blau).

Während die thermodynamische Betrachtung in Abb. 2 eine Aussage über den erwarteten Korrosionszustand von Stahl ermöglicht, sind keine Rückschlüsse in Bezug zur tatsächlich auftretenden Korrosionsgeschwindigkeit möglich. Die Frage 2 kann daher nur unter Einbezug der Kinetik beantwortet werden. Die Kinetik erfordert die Kenntnis der Potenzialabhängigkeit der Stromdichten der Reaktionen (1) bis (4). Diese Abhängigkeiten sind im sogenannten Evansdiagramm im rechten Bild in Abb. 3 dargestellt. In Rot ist die Eisenoxidation gemäss Reaktion (1) und in blau sind die Sauerstoffreduktion und die Wasserstoffentwicklung gemäss den Reaktionen (2) und (4) dargestellt.

Aus Abb. 1 folgt, dass die Stromdichte für die Oxidations- und Reduktionsreaktionen (rote und blaue Pfeile) gleich gross sein müssen. Dies gilt nur unter der in diesem Kapitel behandelten homogenen Elektroden. Im Evansdiagramm (Abb. 3 rechts) ist zu erkennen, dass gleiche Stromdichten bei den Schnittpunkten von blauer und roter Kurve vorliegen. Im betrachteten Beispiel liegen drei Schnittpunkte vor. Thermodynamisch ist aber lediglich das Korrosionspotenzial beim negativsten Schnittpunkt stabil. Aus dieser kinetischen Betrachtung errechnet sich somit sofort das Korrosionspotenzial. Zusätzlich kann aus den Stromdichten mit Hilfe des Faraday'schen Gesetzes die zugehörige Korrosionsgeschwindigkeit berechnet werden, wobei eine anodische Stromdichte von 1 A/m^2 einer Korrosionsgeschwindigkeit von ca. 1 mm/Jahr entspricht. Aus dem Evansdiagramm ergibt sich somit beim Korrosionspotenzial eine Stromdichte von ca. 0.3 A/m^2 was einer Korrosionsgeschwindigkeit von 0.3 mm/Jahr entspricht.

Durch Kombination von Thermodynamik und Kinetik ist es folglich möglich, den Korrosionszustand und die Korrosionsgeschwindigkeit von Stahl in einem Boden mit einem bestimmten pH-Wert und einer gegebenen Belüftung zu ermitteln. Diese Betrachtung beschreibt den Zustand einer frischen Stahloberfläche im Kontakt mit dem Erdboden. Im Verlaufe der Zeit wird es aber zu Veränderungen im Boden in unmittelbarer Nähe der Stahloberfläche kommen, da durch die fortschreitende Korrosion die Fe^{2+} Ionen an der Stahloberfläche angereichert werden. Beim Überschreiten der Löslichkeitsgrenze kommt es in der Folge zur Bildung von Rost, wie dies schematisch in Bild Abb. 1c) dargestellt ist. Diese Rostbildung hat nun zwei relevante Konsequenzen:

1. Die Rostschicht ist gesättigt an Fe^{2+} Ionen
2. Die Sauerstoffdiffusion ist behindert

Die behinderte Sauerstoffdiffusion verringert die kathodische Stromdichte und damit die Korrosionsgeschwindigkeit. Im Gegensatz dazu beeinflusst die erhöhte Konzentration an Fe^{2+} die Thermodynamik. Die Erhöhung der Fe^{2+} Konzentration verschiebt den pH-Wert für Passivierung zu tieferen Werten. In der Folge bewirkt der Korrosionsprozess von Stahl eine Verringerung der Korrosionsgeschwindigkeit durch Anreicherung an Fe^{2+} und Bildung einer Rostschicht. Im Idealfall kann die Anreicherung von Korrosionsprodukten die Passivierung begünstigen. Diese Situation ist für den Fall der Anreicherung der Fe^{2+} Konzentration an der Stahloberfläche auf 10^{-3} M in *Abb. 4* dargestellt. Im Evansdiagramm liegt lediglich ein Schnittpunkt zwischen den anodischen und kathodischen Stromdichten vor. In der Folge kommt es zur spontanen Passivierung des Stahls mit einem Korrosionspotenzial von $-0.05 V_{\text{CSE}}$ und Korrosionsgeschwindigkeiten von 0.001 mm/Jahr. Diese Werte sind typisch für passiven Stahl. Diese Schlussfolgerung ist in Einklang mit dem Review von Stefanoni et al. [3]. In dieser Arbeit wird gefunden, dass in karbonatisiertem Beton bei stark verringertem pH-Wert im nah neutralen Bereich die Korrosionsgeschwindigkeit typischerweise kleiner als 0.01 mm/Jahr ist. Diese überaus geringen Korrosionsgeschwindigkeiten sind charakteristisch für passiven Stahl im Beton. Vergleichbar geringe Korrosionsgeschwindigkeiten wurden im Rahmen einer 3-jährigen Auslagerung von Stahlproben in schwedischen Böden [4] beobachtet (*Abb. 5*). In Böden mit nahezu neutralen pH-Wert (pH 5-8) wurden durchwegs Korrosionsgeschwindigkeiten in der Größenordnung von 0.01 mm/Jahr gefunden. Dies zeigt deutlich, dass die thermodynamisch und kinetisch (*Abb. 3*) erwarteten hohen Korrosionsgeschwindigkeiten im Bereich von 0.3 mm/Jahr üblicherweise nicht auftreten. Die Untersuchung von Stahlproben in amerikanischen Böden bestätigt die oft sehr geringen Korrosionsgeschwindigkeiten von einigen 0.01 mm/Jahr [5]. Diese Untersuchungen zeigen aber auch das Auftreten von Korrosionsgeschwindigkeiten von bis zu 0.4 mm/Jahr. Daraus folgt, dass oft die Veränderungen im Erdboden im Verlaufe der Zeit zu einer relevanten Verringerung der Korrosionsgeschwindigkeit führen, wie dies in *Abb. 4* dargestellt ist. Aus diesen theoretischen Betrachtungen und den empirischen Befunden kann geschlossen werden, dass die Anreicherung von Fe^{2+} eine positive Auswirkung auf die Korrosionsbeständigkeit von Stahl hat.

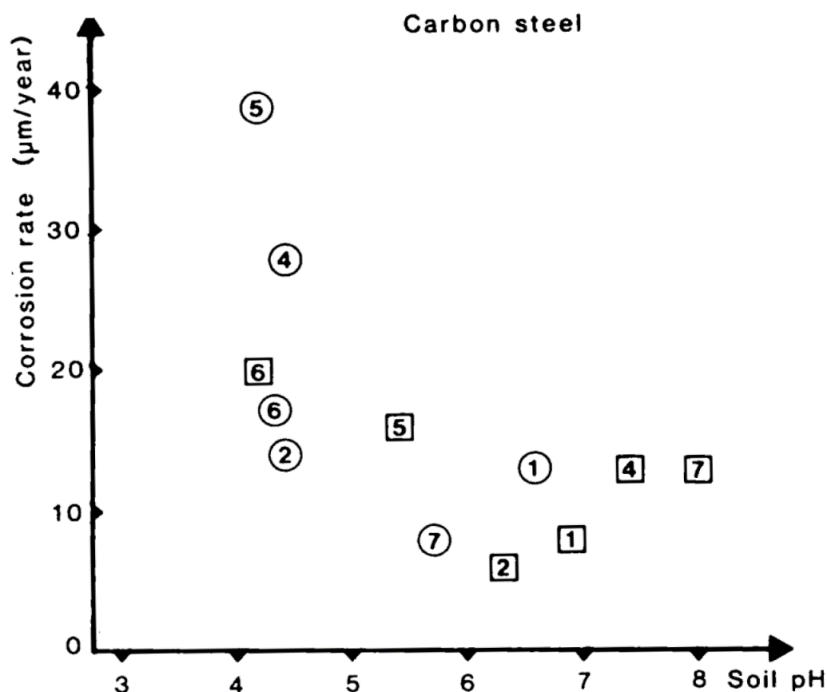


Abb. 5 Korrosionsgeschwindigkeit von Stahl in schwedischen Böden nach drei Jahre Auslagerung [4]. Kreise: über dem Grundwasserspiegel; Quadrate: unter dem Grundwasserspiegel

Basierend auf diesen Betrachtungen folgt im Umkehrschluss eine erhöhte erwartete Korrosionsgefährdung in Elektrolyten, welche die Anreicherung von Fe^{2+} behindern, wie die stark erhöhten Korrosionsgeschwindigkeiten von bis zu 0.4 mm/Jahr zeigen, welche bei gewissen Stahlproben in Böden beobachtet wurden [5]. Tatsächlich gibt es Fälle, in denen die Anreicherung an Fe^{2+} nicht möglich ist, obwohl der Korrosionsprozess an der Stahloberfläche abläuft und kontinuierlich Fe^{2+} freigesetzt wird. Dies ist dann der Fall, wenn die Fe^{2+} Konzentration durch die Komplexbildung oder Fällung begrenzt wird. Schwenk hat erkannt [6], dass diese Situation in Karbonat/Bikarbonatlösungen gegeben ist. Trotz eines pH-Wertes von ca. 10 beobachtete er Korrosionsgeschwindigkeiten in der Grössenordnung von ca. 0.1 mm/Jahr. Die Daten von Schwenk wurden durch Martinelli et al. [7] reproduziert, wobei ebenfalls Korrosionsgeschwindigkeiten in der Grössenordnung von 0.2 mm/Jahr berichtet wurden. Die ungünstige Wirkung von Karbonaten auf die Dauerhaftigkeit von Gusseisen im Boden wurde auch durch Kajiyama [8] bestätigt. Dies bedeutet, dass die Reaktion des Karbonats mit dem gebildeten Fe^{2+} zu schwerlöslichem FeCO_3 (Siderit) jeglichen Konzentrationsanstieg an Fe^{2+} begrenzt, wie in [9] dargelegt wird. In Bezug auf CO_2 und H_2S haltige Medien folgert Schwenk daher, dass in diesen Fällen eine erhöhte Korrosionsgefährdung gegeben ist [10]. In Analogie folgt sofort, dass auch organische Säuren und insbesondere Huminsäuren eine negative Auswirkung auf das Korrosionsverhalten haben: Während Sulfide und Karbonate den Anstieg der Fe^{2+} Konzentration durch Fällung der schwerlöslichen Eisensalze begrenzen, bewirken organische Säuren eine Komplexbildung des Fe^{2+} und bewirken ebenfalls eine Verschiebung des pH-Wertes für Passivierung zu höheren Werten.

Die vorliegende Diskussion ermöglicht die Identifikation und die Erklärung von korrosionsrelevanten Bodenparametern. Diese Diskussion zeigt aber einen weiteren wichtigen Aspekt auf: Die Anreicherung an Fe^{2+} ist relevant für das Korrosionsverhalten. Anreicherung von Fe^{2+} ist nur dann möglich, wenn die gelösten Ionen nicht durch strömendes Wasser weggespült werden. Dies bedeutet, dass die Bettungsbedingungen (Umgebungsbedingungen des Metalls) einen relevanten Einfluss haben müssen, wie im Detail durch Angst et al. beschrieben wurde [11].

Daraus folgt sofort, dass der Einbau von Mikropfählen in lockerem steinigem und kiesigem Boden mit strömendem Wasser die Korrosionsbeständigkeit ungünstig beeinflussen muss. Es liegen keine allgemein akzeptierten Angaben zu Absolutwerten der Strömungsgeschwindigkeit vor. Generell werden aber Strömungsgeschwindigkeiten von weniger als 0.1 m/Tag als unkritisch eingestuft [12]. Dies bedeutet umgekehrt, dass eine Grundwasserströmung je nach vorhandenem Gradienten bereits in sandigen Böden mit Durchlässigkeitsbeiwerten um $k = 10^{-4}$ m/s einen ungünstigen Einfluss auf die Korrosionsbeständigkeit haben kann.

Diese Ausführungen sind in Einklang mit den Beobachtungen von Romanoff [13], dass die Korrosionsgeschwindigkeit von Spundwänden in gewachsenem Boden meist vernachlässigbar klein ist. Ebenso finden Grobe et al. [14] vernachlässigbare Korrosionsgeschwindigkeiten auf Stahl in anaeroben Bedingungen in Gegenwart von Sulfat reduzierenden Bakterien und erhöhten Sulfidgehalten. Dieser Effekt wurde mit der guten Bettung und der begrenzten Diffusion der Sulfide an die Stahloberfläche erklärt [9]. In der Folge war die Anreicherung an Fe^{2+} und die Passivierung möglich, was zur Passivierung und daraus resultierenden Korrosionsgeschwindigkeit in der Grössenordnung von 0.01 mm/Jahr führte.

Die vorliegende Diskussion zeigt deutlich die komplexen Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Prozessen und den wesentlichen Beitrag der Stofftransportbedingungen an der Stahloberfläche. Die Bettung im Boden sowie die Bildung von Rostschichten wirken sich basierend auf den diskutierten Effekten hemmend auf das Korrosionsverhalten aus, indem Bedingungen geschaffen werden, welche für die Passivierung der Stahloberfläche günstig sind. Der Stofftransport hat aber auch eine grosse Bedeutung auf den Sauerstofftransport und beeinflusst somit das Korrosionsverhalten. Die Wirkung des Sauerstoffs auf den Korrosionsprozess ist vielschichtig und erfordert eine differenziertere Betrachtung, welche wie folgt zusammengefasst werden kann:

1. Sauerstoff ist gemäss Reaktion (2) ein wichtiges Oxidationsmittel und beschleunigt Korrosion
2. Das Oxidationsmittel Sauerstoff wirkt als Passivator und begünstigt die Passivierung
3. Sauerstoff bewirkt Korrosionspotenziale von ca. 0 V_{CSE} auf passiven Oberflächen und verursacht galvanische Korrosion.

Die korrosionsbeschleunigende Wirkung des Sauerstoffs lässt sich mit Hilfe von *Abb. 3* quantifizieren. Basierend auf dem Evansdiagramm beträgt die Korrosionsstromdichte 0.3 A/m² (0.3 mm/Jahr) am Korrosionspotenzial. Die Sauerstoffgrenzstromdichte beträgt im gerechneten Beispiel aber lediglich 0.1 A/m². Dies bedeutet, dass 0.2 A/m² des Korrosionsstroms durch Wasserreduktion gemäss Gleichung (4) verursacht wird. Dieser Befund ist in guter Übereinstimmung mit der von Martinelli et al. [7] berichteten Korrosionsgeschwindigkeit von 0.2 mm/Jahr in sauerstofffreien Karbonatlösungen. Diese Betrachtung zeigt deutlich, dass Sauerstoffausschluss nicht zu vernachlässigbaren Korrosionsgeschwindigkeiten führen muss. Im Gegenteil kann das Oxidationsmittel Sauerstoff bereits in nah neutralen Böden die Passivierung des Stahls begünstigen und damit einen wirksamen Korrosionsschutz bewirken. Diese Beobachtung ist in guter Übereinstimmung mit dem überaus guten Korrosionsverhalten von Stahl in sandigen und gut belüfteten Böden. Diese Diskussion relativiert die schädigende Wirkung des Oxidationsmittels Sauerstoff auf den Korrosionsprozess. Tatsächlich ist seine Wirkung bei den in diesem Kapitel diskutierten homogenen Elektroden durchaus positiv.

2.1.2 Galvanische Korrosion

Volta entwickelte die erste Batterie, welche basierend auf dem Prinzip der galvanischen Korrosion zur Erzeugung von elektrischen Spannungen und Strom genutzt werden konnte. Dieses galvanische Element ist in *Abb. 6* dargestellt. Es besteht aus einer Zink- sowie einer Kupferelektrode, welche beide in einen Elektrolyten (wässrige Lösung mit Kupfersulfat) eintauchen. Wenn die beiden Elektroden elektronenleitend verbunden werden (zum Beispiel über eine Glühbirne), kommt es zum Stromfluss zwischen den beiden Elektroden. Die Ursache für den Stromfluss sind die unterschiedlichen Korrosionspotenziale von Kupfer ($E_{\text{corr}} = -0.2 \text{ V}_{\text{CSE}}$) und Zink ($E_{\text{corr}} = -1 \text{ V}_{\text{CSE}}$). Der resultierende Strom führt zum Stromaustritt aus der Zinkelektrode und zu Zinkkorrosion entsprechend der anodischen Reaktion (5). Zeitgleich führt der Stromeintritt auf der Kupferelektrode zur Abscheidung von metallischem Kupfer entsprechend der kathodischen Reaktion (6).

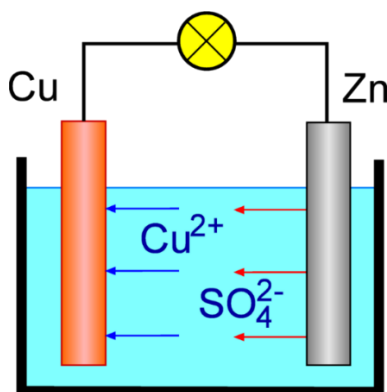
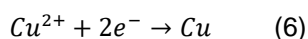
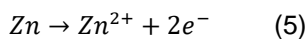


Abb. 6 Galvanisches Element bestehend aus einer Zink- und einer Kupferelektrode.

Aus dieser Diskussion folgt sofort, dass ein Stromfluss und damit eine beschleunigte Korrosion von Zink nur dann möglich ist, wenn die folgenden Bedingungen erfüllt sind:

- Die beiden Elektroden müssen unterschiedliche Korrosionspotenziale aufweisen
- Die Elektroden müssen Ionenleitend über einen Elektrolyten miteinander verbunden sein
- Die Elektroden müssen zusätzlich elektronenleitend über einen metallischen Leiter verbunden sein

Die Grundvoraussetzung für galvanische Korrosion ist das Vorliegen von unterschiedlichen Korrosionspotenzialen. Typische Korrosionspotenziale von technisch relevanten Metallen sind in *Tab. 1* aufgeführt. Es wird deutlich, dass galvanische Korrosion in Einklang mit *Abb. 6* bei ionenleitender (elektrolytisch) und elektronenleitender (metallisch) Verbindung zu einem galvanischen Element führen. Dabei ist relevant, dass nebst diesen Verbindungen unterschiedliche Korrosionspotenziale vorliegen müssen. Dazu sind nicht notwendigerweise unterschiedliche Metalle erforderlich. Auch das gleiche Metall in unterschiedlichen Elektrolyten kann zu unterschiedlichen Korrosionspotentialen führen. So führt beispielsweise die Verbindung von Stahl in Beton mit Stahl im Boden zu unterschiedlichen Korrosionspotenzialen und in der Folge zu galvanischer Korrosion.

Tab. 1 Korrosionspotenziale von Metallen in verschiedenen Elektrolyten

Metall	E_{corr} [V _{CSE}]
Kupfer in Wasser, Beton oder Boden	-0.10
Nichtrostender Stahl in Wasser, Beton oder Boden	-0.10
Stahl in Beton	-0.10
Stahl in belüftetem Wasser oder Boden	-0.55
Stahl in stagnierendem Wasser oder schlecht belüfteten Boden	-0.75
Verzinkter Stahl in Wasser oder im Boden	-1.0

In *Tab. 1* zeigt sich auch deutlich die Auswirkung der Belüftung auf das Korrosionspotenzial. So weist Stahl in gut belüftetem Boden ein deutlich positiveres Korrosionspotenzial auf als Stahl in schlecht belüftetem Boden. Daraus folgt, dass es zwischen unterschiedlich belüfteten Abschnitten einer erdverlegten Struktur zu galvanischer Korrosion kommt.

Im Zusammenhang mit galvanischer Korrosion ist ein weiterer Aspekt für die Dauerhaftigkeit der Struktur von zentraler Bedeutung: Die Anoden und Kathoden sind räumlich getrennt. Evans hat 1923 den Fall der galvanischen Korrosion von Stahl bei heterogener Belüftung im Detail beschrieben [15]. Die zugehörigen Effekte werden im Folgenden mit Hilfe seines Tropfentests kurz besprochen: Auf einem Stück Stahl, auf welchem ein Wassertropfen liegt, wird ein lokaler Korrosionsprozess basierend auf der Reduktion von Sauerstoff gemäss Reaktion (2) und der Oxidation von Eisen gemäss Reaktion (1) erfolgen (*Abb. 7*).

Die heterogene Belüftung aufgrund der unterschiedlichen Diffusionsstrecken für Sauerstoff zwischen Tropfenrand und Tropfenmitte führt zu einer Erhöhung des pH-Werts im Randbereich des Tropfens, während in der Mitte eine erhöhte Korrosion und das Absinken des pH-Werts auftreten wird. Dieser ursprünglich von Evans beschriebene Effekt wurde von Pourbaix [16] wie folgt zusammengefasst: "Wenn ein Stück Eisen in eine praktisch neutrale ungepufferte Lösung eingetaucht wird, welche in einem Bereich belüftet (Tropfenrand) und in einem anderen Bereich nicht belüftet (Tropfenmitte) ist, wird eine Abnahme der Korrosionsgeschwindigkeit in dem belüfteten Bereich festgestellt, wobei ein Stromfluss zwischen diesen Bereichen auftritt. Aufgrund des durch die Sauerstoffreduktion erhöhten pH-Werts, werden die belüfteten Bereiche passiviert und die nicht belüfteten Bereiche werden nicht passiviert."

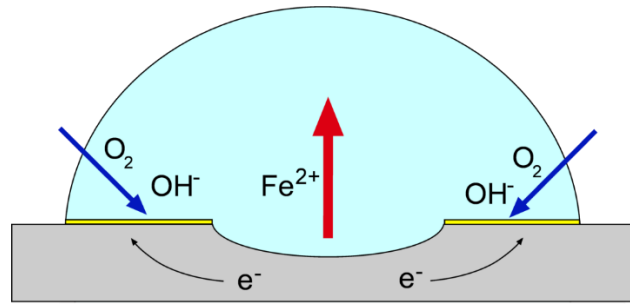


Abb. 7 Schematische Darstellung des Tropfentests von Evans, welcher aufgrund der heterogenen Belüftung zu einem lokal erhöhten pH-Wert im Randbereich und zur Passivierung (gelb) führt.

Diese Darstellung zeigt deutlich den wesentlichen Unterschied zwischen der homogenen Mischelektrode und dem galvanischen Element. Während bei der homogenen Mischelektrode keine relevanten Veränderungen der Ionenkonzentration und des pH-Werts auftreten, bewirkt die räumliche Trennung von Oxidations- und Reduktionsreaktion eine relevante Veränderung der Konzentrationen der gelösten Ionen. Dieser Effekt ist in *Abb. 8* im Pourbaixdiagramm dargestellt. Ausgehend von neutralen Bedingungen beim Kontakt der Stahloberfläche mit dem Wassertropfen kommt es als Folge der Korrosion zu relevanten Veränderungen der Elektrolytzusammensetzung. Die Ansäuerung im anodischen Bereich (roter Pfeil) verhindert nachhaltig die Bildung eines Passivfilms und die Alkalisierung im kathodischen Bereich (blauer Pfeil) stabilisiert den Passivfilm. Unter diesen heterogenen Bedingungen ist folglich mit einem schnellen lokalen Korrosionsfortschritt zu rechnen. Dieser wird durch die Migration von Anionen (z.B. Chloride, Sulfide, Salze von organischen Säuren oder Hydrogencarbonaten) durch den galvanischen Strom in die Korrosionsstelle zusätzlich verschärft. Dies verdeutlicht die relevanten Effekte bei galvanischer Korrosion als Folge der Räumlichen Trennung von Anode und Kathode.

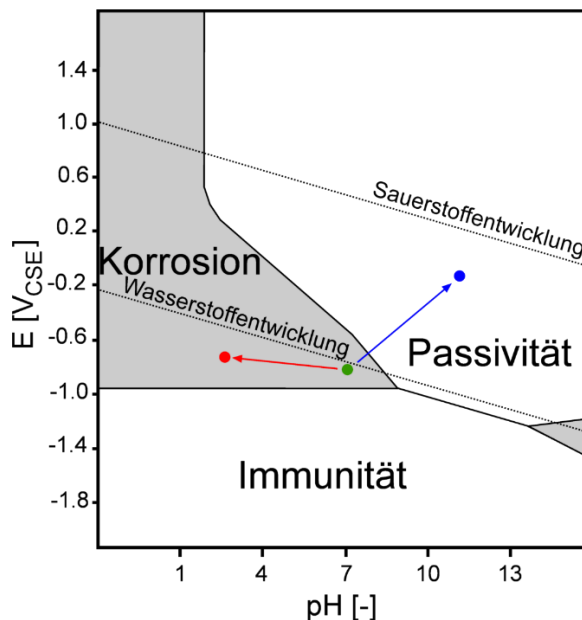


Abb. 8 Verschiebung des Korrosionspotenzials und des pH-Werts ausgehend von der homogenen Mischelektrode (grün) auf den gut belüfteten Kathodenflächen (blau) und der schlecht belüfteten Anodenfläche (rot).

Das Ausmass der Veränderung des pH-Werts an der Stahloberfläche ist eine direkte Folge der auftretenden anodischen und kathodischen Stromdichten. Diese wiederum sind bestimmt durch die Belüftung des Bodens oder des Betons. Diese Belüftung wird durch die Nachdiffusion des Sauerstoffs durch den Elektrolyten kontrolliert und kann mit Hilfe der

sogenannten Sauerstoffgrenzstromdichte quantifiziert werden. Der Sauerstoffgrenzstrom für einen normalen sandigen Boden ist in *Abb. 3* mit 0.1 A/m^2 angenommen und mit der Position (2) im Evansdiagramm markiert. Kathodisch (unterhalb) von (2) ist die blaue Reduktionskurve vertikal und somit unabhängig vom Potenzial. Diese Potenzialunabhängigkeit der Stromdichte ist die direkte Folge der Sauerstoffdiffusionskontrolle.

In den bisher diskutierten Beispielen von galvanischen Elementen war die Fläche von Anode und Kathode ungefähr gleich gross. Aus den Ausführungen folgt aber sofort, dass dem Flächenverhältnis von Anode zu Kathode eine entscheidende Bedeutung zukommt. So führt eine grosse Anode zu einem grossen Reduktionsstrom gemäss Reaktion (2), während eine sehr kleine Anode zu einer sehr hohen lokalen Korrosionsstromdichte gemäss Reaktion (1) führt. Die Erhöhung der Korrosionsgeschwindigkeit im galvanischen Element (i_{corr}) als Folge eines ungünstigen Flächenverhältnisses kann mit Hilfe von Gleichung (a) beschrieben werden, wobei i_0 die Korrosionsgeschwindigkeit der homogenen Mischelektrode (gemäss Kapitel 2.1.1), A_k die Oberfläche des Metalls mit dem positiveren Potenzial (Kathode) und A_a die Oberfläche des Metalls mit dem negativeren Korrosionspotenzial (Anode) ist.

$$i_{\text{corr}} = i_0(1+A_k/A_a) \quad (a)$$

Gleichung (a) darf nur qualitativ interpretiert werden, da mit steigenden Stromdichten ein zunehmender Beitrag des Elektrolytwiderstands auftritt. Mit steigendem spezifischem Elektrolytwiderstand ergibt sich ein grösserer Spannungsfall im Elektrolyten, welcher zunehmend die maximal möglichen Stromdichten begrenzt. Dieser widerstandskontrollierte Stromfluss ist der Grund für die meist begrenzte maximal mögliche Korrosionsgeschwindigkeit, welche kaum grösser als 2 mm/Jahr sein kann. Mit der in *Abb. 3* ermittelten Korrosionsstromdichte von 0.3 A/m^2 (ca. 0.3 mm/Jahr) würde sich bei den typischen Flächenverhältnissen bei Korrosion von Stahl in Beton mit $A_k = 1 \text{ m}^2$ und $A_a = 0.01 \text{ m}^2$ mit Gleichung (a) eine Korrosionsgeschwindigkeit von 30 mm/Jahr ergeben. Aufgrund des erhöhten Betonwiderstands sind die tatsächlich auftretenden Korrosionsgeschwindigkeiten aber meist kleiner als 1 mm/Jahr .

Die vorliegende Diskussion zeigt deutlich, dass der Korrosionsprozess im galvanischen Element die lokalen Bodenverhältnisse durch Absenken des pH-Werts an der Anode und Anhebung des pH-Werts an der Kathode in hohem Masse beeinflusst. Daraus ergeben sich sofort wichtige Schlussfolgerungen in Bezug auf die Dauerhaftigkeit von Stahl im Boden:

- Gut belüfteter Stahl wird generell positivere Korrosionspotenziale aufweisen und wirkt daher als Kathode. Dies hat zur Folge, dass Stahl in gut drainiertem Sand oder Kies kaum relevante Korrosion zeigen wird, da die Sauerstoffreduktion zu einem Anstieg des pH-Werts und zur Passivierung führt.
- Schlecht belüfteter Stahl (z.B. in Lehm oder in Sand unter dem Grundwasserspiegel) weist stets negativere Korrosionspotenziale auf und wird in der Folge zur Anode. Dies führt zum scheinbar paradoxen Effekt, dass Korrosion von Stahl im Boden stets dort auftritt, wo der Sauerstoffgehalt stark vermindert ist.
- Die Zusammensetzung des Bodens in Bezug auf aggressive Ionen (z.B. Chloride, Sulfide, Bikarbonate etc.) sowie pH-Wert ist daher oft von untergeordneter Bedeutung. Die durch den galvanischen Elementstrom bewirkte pH-Veränderung und Ionenmigration bewirkt innerhalb weniger Tage bis Wochen ausgeprägte Veränderungen in Bezug auf die Ionenkonzentration und den pH-Wert an der Stahloberfläche.

Diese Effekte dürften wesentlich für die oft irreführende Bewertung der Bodenaggressivität mit Hilfe der heute üblichen Verfahren sein: Der Vergleich von tatsächlichen Korrosionsgeschwindigkeiten mit den Vorgaben in SN EN 12501-2 [17], AWWA Specification [18] und DIN 50929-3 [19] zeigt oft eine sehr schlechte Korrelation [5, 8]. Dies dürfte primär darauf zurückzuführen sein, dass die wesentlichen Auswirkungen der galvanischen Ströme, die an erdverlegten Stahlstrukturen in heterogenen Böden kaum zu vermeiden sind, in diesen Regelwerken nicht oder nur marginal berücksichtigt werden.

Wenn umgekehrt die galvanischen Elemente die primären korrosionsrelevanten Parameter beeinflussen, erklärt sich sofort die dominante Wirkung des elektrischen Widerstands, wie dies auch in den vorliegenden Bewertungen bestätigt wird [5]. So ist der Strom und die daraus resultierende Stromdichte primär bestimmend für die sich an der Stahloberfläche einstellenden pH-Werte [20]. Bei der technischen Nutzung von Batterien (gemäss *Abb. 6*) ist deren Dauerhaftigkeit primär durch den elektrischen Widerstand des Verbrauchers bestimmt. Analog dazu ist die Korrosionsgeschwindigkeit im galvanischen Element und damit die Nutzungsdauer von Stahlstrukturen im Boden wesentlich durch den elektrischen Bodenwiderstand bestimmt.

2.1.3 Lochkorrosion

Die Diskussion der galvanischen Korrosion basierend auf dem Evans Tropfenversuch in *Abb. 7* hat verdeutlicht, dass es bei galvanischer Korrosion zwischen passivem und aktivem Stahl zu verstärktem lokalem Metallabtrag kommt. Im Extremfall kommt es in der Folge der pH-Wert Absenkung zu sogenannter Lochkorrosion. Die Lochkorrosion ist üblicherweise verknüpft mit passiven Werkstoffen (wie zum Beispiel Stahl in Beton gemäss dem orangen Punkt in *Abb. 2*). Dieser Passivfilm ist extrem dünn (3 bis 6 Atomlagen) und wird aufgrund von externen Einwirkungen, wie zum Beispiel mechanischer Belastung, einfach zerstört. Diese lokale Zerstörung führt sofort zu einem galvanischen Element zwischen der so gebildeten blanken Metalloberfläche und der passiven Stahloberfläche. Typischerweise betragen die dabei auftretenden Spannungen gemäss *Tab. 1* ca. 0.5 V. In der Folge des Ionenstroms zwischen passiver Kathode und korrodierender Anode werden positiv geladene Ionen (Kationen) zur passiven Kathode und negativ geladene Ionen (Anionen) zur Korrosionsstelle wandern. Dieser Prozess ist in *Abb. 9* dargestellt. Die OH⁻ Ionen werden folglich durch den galvanischen Elementstrom zur Korrosionsstelle wandern, wo sie den pH-Wert erhöhen. Gleichzeitig wandern die durch die Korrosion gebildeten Fe²⁺ oder H⁺-Ionen aus der Korrosionsstelle in den umliegenden Elektrolyten. Beide Effekte begünstigen somit die Neubildung des Passivfilms. In einem alkalischen Medium, wie zum Beispiel Beton, ist es folglich ausgeschlossen, dass der pH-Wert an der Anode absinkt. Der Korrosionsstrom selbst führt über die Migration von H⁺ und OH⁻ und gegenseitige Neutralisation zur Aufrechterhaltung einer alkalischen Umgebung. Daraus folgt mitunter die hervorragende Beständigkeit von Stahl in Beton.

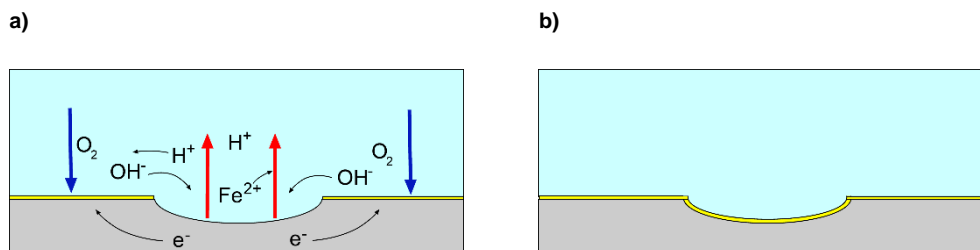


Abb. 9 Metastabile Lochkorrosion von Stahl in Beton: Galvanische Korrosion bei lokal zerstörtem Passivfilm (a) und Repassivierung durch Neubildung im alkalischen Beton (b)

Diese ideale Situation verändert sich, wenn relevante Mengen an weiteren Anionen im Beton vorhanden sind. Diese werden im galvanischen Elementstrom ebenfalls zur Anode wandern. Es kommt somit zu einem konkurrierenden Ionentransport zwischen diesen Anionen und den OH⁻ Ionen. Wenn die Konzentration dieser Anionen in derselben Grössenordnung wie jene der OH⁻ Ionen ist, wird die Aufrechterhaltung eines hohen pH-Werts basierend auf der Ionenmigration im Bereich der Anode beeinträchtigt. Diese Migration von weiteren Anionen wie Chloriden (Cl⁻), Sulfaten (SO₄²⁻) oder Karbonaten (CO₃²⁻) führt somit unweigerlich zu einer Verringerung des pH-Werts an der Anode, da sie die an der Anode gebildete Säure nicht neutralisieren können. Die Beweglichkeit dieser Anionen ist untereinander zwar vergleichbar, im Vergleich zu den OH⁻ Ionen sind sie aber deutlich langsamer. Der wesentliche Unterschied in Bezug auf die korrosive Wirkung dieser Anionen besteht damit nicht in deren Beweglichkeit, sondern in deren Säurestärke. So sind die Karbonate die Salze einer schwachen Säure, die Sulfate die Salze einer starken Säure und die Chloride die Salze einer sehr starken Säure. Folglich führt die Migration von

Chloriden zur Anode zur stärksten Verringerung des pH-Werts und somit zur stärksten Behinderung der Repassivierung.

Ohne Repassivierung kommt es im Beton zur Verringerung des pH-Werts an der Anode und zu stabiler Lochkorrosion bei stark reduziertem pH-Wert. Bei vergleichbaren Konzentrationen von Chloriden, Sulfaten oder Karbonaten ist somit stabile Lochkorrosion in erster Linie bei Chloriden zu erwarten. Aus der kompetitiven Migration der verschiedenen Anionen folgt sofort, dass ein kritisches Verhältnis der Cl^- zu OH^- Ionen bestehen müsste. Dieses wird tatsächlich beobachtet [21], was die Bedeutung der hier vereinfacht dargelegten Abhängigkeiten bestätigt. Allerdings ist es nicht möglich die Lochkorrosion von Stahl in Beton mit diesen Betrachtungen abschliessend zu behandeln. Dazu wäre eine vertiefte Behandlung sämtlicher relevanter Einflussgrössen notwendig.

Die Diskussion der bei Lochkorrosion auftretenden Effekte hat gezeigt, dass die lokale Zerstörung des Passivfilms und eine darauffolgende Repassivierung bei Stahl in Beton im Normalfall zu erwarten ist. Dieser oft als metastabile Lochkorrosion bezeichnete Effekt beeinträchtigt die Integrität der Struktur in keiner Weise. Erst wenn sich das metastabile Loch aufgrund einer erhöhten Cl^- oder verringerten OH^- Konzentration nicht repassiviert, kommt es zu stabilem Lochwachstum gemäss *Abb. 10*. Dieser Prozess der Stabilisierung der Lochkorrosion ist bis heute nicht abschliessend verstanden. Die überaus grosse Streuung der Literaturdaten in Bezug auf kritischen Chloridgehalt und das kritische Verhältnis der Cl^- zu OH^- in der Literatur [21] lässt den Schluss zu, dass noch weitere wesentliche Einflussfaktoren vorliegen müssen.

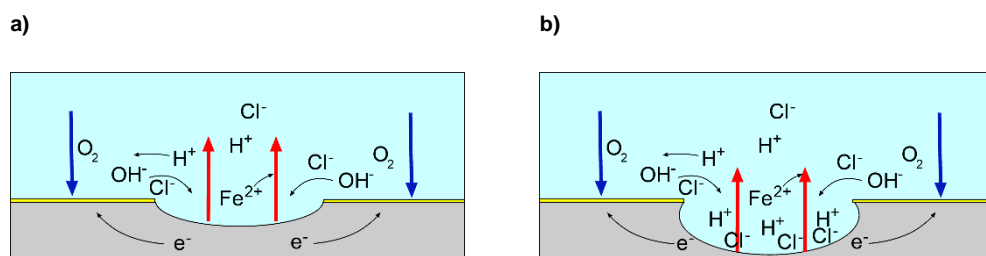


Abb. 10 Stabile Lochkorrosion von Stahl in Beton: Galvanische Korrosion bei lokal zerstörtem Passivfilm (a) und Stabilisierung der Lochkorrosion im chloridhaltigen Beton (b)

Es ist unbestritten, dass anodischer Stromaustritt aus Stahl zu einer Verringerung des pH-Werts führt. Ebenso ist allgemein anerkannt, dass das Ausmass dieser pH-Wert Absenkung wesentlich durch die dabei auftretenden Stromdichten bestimmt wird. Es ist somit zu erwarten, dass diejenigen Faktoren, welche zu einer erhöhten Stromdichte führen, eine stabilisierende Wirkung auf die Lochkorrosion haben müssen. Folglich ist zu erwarten, dass die folgenden Parameter die Dauerhaftigkeit von Stahl in Beton bei einer gegebenen Chloridkonzentration ungünstig beeinflussen müssen:

- Ein tiefer Beton- und Elektrolytwiderstand
- Eine grosse Spannungsdifferenz zwischen Anode und Kathode
- Eine grosse Kathodenfläche

Dabei kommt es zu komplexen Wechselwirkungen innerhalb dieser Einflussgrössen. So wirkt sich zwar ein verringerter pH-Wert im Beton ungünstig auf das Verhältnis der Cl^- zu OH^- Ionen aus. Gleichzeitig wird sich bei verringertem pH-Wert, aufgrund der geringeren Ionenkonzentration, aber auch ein erhöhter Betonwiderstand einstellen. Dieser wiederum bewirkt geringere Stromdichten und begünstigt damit die Repassivierung von metastabiler Lochkorrosion. Diese Ausführungen zur Lochkorrosion von Stahl in Beton zeigen, dass dieser Prozess sehr komplex und noch nicht abschliessend verstanden ist. Sie erlauben es jedoch, die relevanten Einflussgrössen zu identifizieren. Diese lassen sich auch auf die Korrosion von Stahl in Boden übertragen, womit die Zweckmässigkeit verschiedener Korrosionsschutzmassnahmen beurteilt werden kann.

2.1.4 Spannungsrisskorrosion

Der Korrosionsschutz von Stahl in Mörtel ist durch den erhöhten pH-Wert und die sich einstellende Passivität sichergestellt. Dieser dünne Passivfilm mit einer Dicke von wenigen Nanometern kann aber bei mechanischer Beanspruchung aufreißen, wobei der Stahl in direktem Kontakt mit dem Elektrolyten kommt. Dies führt zu einer Passivierung und Wiederherstellung des Korrosionsschutzes. Wenn diese Repassivierung aufgrund von unzureichend hohem pH-Wert oder erhöhtem Chloridgehalt verzögert ist, kommt es bei wiederholter Aktivierung und Repassivierung zur Bildung von Korrosionsmulden. Spannungsrisskorrosion ist somit kontrolliert durch die Abfolge von Aufreißen des Passivfilms und dessen Neubildung [22]. Dieser Prozess führt unweigerlich zu einer Rissbildung, da die erhöhte Spannungsintensität am Rissgrund das Aufreißen des Passivfilms an der Rissspitze begünstigt. Für die Neubildung des Passivfilms läuft die Eisenoxidation nach Reaktion (1) ab. Zusätzlich sind die Sauerstoffreduktionsreaktion (2) und die Wasserstoffentwicklung nach Reaktion (3) oder (4) zu erwarten. In alkalischem Mörtel erfolgt die Passivierung sehr schnell. Die Sauerstoffreduktion und auch Wasserstoffbildung sind daher nur gering. Bei erhöhtem Chloridgehalt oder verringertem pH-Wert ist die Repassivierung verzögert und es kommt zu relevanter Wasserstoffentwicklung als Folge des Korrosionsprozesses. Diese führt einerseits zur Bildung von Wasserstoffgas. Andererseits wird ein Teil des Wasserstoffs aber auch in den Stahl eintreten und sich bevorzugt im Bereich der Rissspitze, aufgrund des elastisch aufgeweiteten Metallgitters, zwischen den Eisenatomen anlagern. In der Folge werden die mechanischen Eigenschaften des Stahls verändert. Dies trägt nach Fessler [23] zu einer Verringerung der Streckgrenze und plastischer Deformation an der Rissspitze bei. Dieser Ansatz ist ein Einklang mit dem von Parkins [24] beobachteten erhöhten Kriechen des Stahls bei mechanischer Auslastung unterhalb der Streckgrenze als Folge der Wasserstoffbeladung. Diese plastische Deformation führt zu einem beschleunigten Wiederaufreißen des Passivfilms und einem schnelleren Rissfortschritt. Mit abnehmendem Querschnitt steigt die Spannungsintensität und in der Folge kommt es zu einem verformungsarmen Bruch des Bauteils. Man spricht dabei von Wasserstoffversprödung, da makroskopisch kaum plastische Verformung beobachtet wird. Die tatsächliche Wirkung des Wasserstoffs ist, basierend auf dem beschriebenen Prozess, aber eine Plastifizierung des Stahls und verstärktes plastisches Fließen auf mikroskopischer Ebene an der Rissspitze. Aus dieser Betrachtung ergeben sich wesentliche Schlussfolgerungen:

- Die Wirkung des Wasserstoffs führt makroskopisch zu einer Versprödung, ist aber mikroskopisch eine Plastifizierung des Stahls, welche zu verstärktem Kriechen führt.
- Rissbildung unter Beteiligung von Wasserstoff ist daher an allen Stählen und unabhängig von deren Streckgrenze zu erwarten
- Bei Baustählen sind die mechanischen Spannungen geringer und die Verringerung der Streckgrenze durch Wasserstoffeinlagerung führt zu weniger ausgeprägtem Kriechen.
- Bei hochfesten Stählen führt die hohe mechanische Auslastung zu starkem Kriechen und schnellem Rissfortschritt.
- Die Risswachstumsgeschwindigkeit ist eine Funktion der absoluten mechanischen Last (nicht der Auslastung des Stahls relativ zur Streckgrenze) und der Beladung mit Wasserstoff, das heisst der Korrosionsgeschwindigkeit.
- Bei Korrosion von Stahl nach Reaktion (1) ist zwingend auch Wasserstoffentwicklung zu erwarten, da gemäss *Abb. 2* die Immunität stets kathodisch der Gleichgewichtslinie für Wasserstoffentwicklung liegt. Der Eintrag von Wasserstoff bei Korrosion ist somit zu erwarten.

Aus diesen Einflussfaktoren folgt, dass Spannungsrisskorrosion besonders bei hochfesten Stählen kritisch ist. Deren mechanische Belastung und auch die Eigenspannungen sind aufgrund der erhöhten Festigkeit deutlich erhöht. Eine Plastifizierung durch Wasserstoffeintrag und Anlagerung an der Rissspitze führt in der Folge zu verstärktem Kriechen und Rissfortschritt. Im Falle von aktiver Korrosion kann es daher zu einem schnellen Versagen kommen. Im Gegensatz dazu ist bei Baustahl die mechanische Belastung aufgrund der geringeren Streckgrenze generell geringer. Bei Korrosion und daraus resultierendem Wasserstoffeintrag kommt es daher zu deutlich geringerem

Kriechen und Rissfortschritt. Daher nimmt die Rissbildung und das Versagen durch Spannungsrissskorrosion mit geringerer Streckgrenze des Stahls ab. Das Auftreten von Spannungsrissskorrosion ergibt sich folglich aus den Werkstoffeigenschaften, der mechanischen Spannung sowie dem korrosiven Medium. Daraus folgt, dass es unmöglich ist einen Grenzwert bezüglich Streckgrenze anzugeben.

Basierend auf diesen Ausführungen wird deutlich, dass ein wirksamer Korrosionsschutz basierend auf einer Bettung in alkalischem und chloridarmen Mörtel das Auftreten von Spannungsrissskorrosion weitestgehend verhindert: die schnelle Repassivierung begrenzt die Korrosion und damit die Beladung mit Wasserstoff.

2.2 Korrosions-Mechanismus von Stahl im Boden

Stahl in Kontakt mit wässrigen Elektrolyten zeigt in vielen Anwendungsfällen Korrosionserscheinungen. Basierend auf umfangreichen Auslagerungsversuchen in zahlreichen Böden wird festgestellt, dass die sich einstellende Korrosionsgeschwindigkeit im Bereich von 0.01 bis 0.03 mm/Jahr liegt. Derartige Korrosionsgeschwindigkeiten sind vernachlässigbar klein und führen üblicherweise nicht zu einer relevanten Beeinträchtigung der Dauerhaftigkeit. Dieses in den Versuchen beobachtete, oft sehr gute Korrosionsverhalten von Stahl im Boden ist die direkte Folge von kleinen Prüfkörpern oder homogenen Bodenbedingungen. Die umfassenden Untersuchungen in Schweden, Norwegen und Japan haben die sehr geringen Korrosionsgeschwindigkeiten an Mikropfählen in der Grössenordnung von 0.01 mm/Jahr in einem 33 jährigen Auslagerungsversuch bestätigt [25]. Diese tiefen Korrosionsgeschwindigkeiten wurden insbesondere an Mikropfählen unterhalb des Grundwasserspiegels, das heisst bei homogenen Bettungsbedingungen, beobachtet. Dieses überaus gute Korrosionsverhalten war weitgehend unabhängig von den Bodenbeschaffenheiten und der Aggressivität des Bodens. Diese Beobachtungen sind in guter Übereinstimmung mit den Ausführungen zu den Korrosionsprozessen im vorangehenden Kapitel und den Ausführungen zu *Abb. 3* und *Abb. 4*: Homogene Korrosion führt zur Anreicherung von Korrosionsprodukten. Diese wiederum begünstigen die Passivierung selbst bei nah neutralen Bodenbedingungen, was zu Korrosionsgeschwindigkeiten in der Grössenordnung von 0.01 mm/Jahr führt. Diese grossangelegten Felduntersuchungen bestätigen die Richtigkeit der Modellvorstellung.

Allerdings zeigte sich bei diesen Langzeitauslagerungsversuchen [25], dass im Bereich der Obergrenze des Grundwasserspiegels lokal erhöhte Korrosionsgeschwindigkeiten auftraten. Diese sind die Folge von heterogener Bodenbelüftung und daraus resultierenden galvanischen Elementen. In weiterführenden Untersuchungen wurden daher die Korrosionsströme an Mikropfählen in verschiedenen Böden in Schweden mit Messproben auf Mikropfählen untersucht [25]. Auf der Pfahlänge von 2.5 m wurden 25 Messproben gleichmässig über die Tiefe verteilt. Die Strommessungen auf einzelnen Messproben zeigten zwei wesentliche Effekte:

- Es traten sowohl Messproben mit kathodischen als auch anodischen Strömen auf, was die Relevanz von galvanischen Elementen entlang von Mikropfählen als Folge von unterschiedlicher Belüftung zeigt.
- Die anodischen Stromdichten waren sehr gering. Es wurden in verschiedenen Böden erneut maximale Korrosionsgeschwindigkeiten im Bereich von 0.02 mm/Jahr gefunden, was in Einklang mit den Beobachtungen in der Literatur und den Modellvorstellungen ist.

Das Fehlen von relevanter lokaler Korrosion auf den Mikropfählen trotz sehr grosser Anzahl Messproben zeigt die Problematik von Lochkorrosion: Ein Grossteil des Pfahls ist im passiven Zustand und die lokale Anode ist räumlich meist auf eine Fläche von 1-2 cm² begrenzt. Es ist nicht möglich, den Ort dieser Anode zum Zeitpunkt der Positionierung der Messproben zu kennen. In der Folge von zahlreichen lokalen Lochinitiationsprozessen wird sich aufgrund der äusseren Randbedingungen an einer oder wenigen Stellen stabile Lochkorrosion bilden. Diese Orte mit Lochkorrosion sind abhängig von der Spannung zwischen Anode und Kathode, der lokalen Belüftung, dem lokalen Bodenwiderstand, der Grösse der Kathode sowie der lokalen Bodenchemie. Folglich ist es nicht möglich, aufgrund einer begrenzten Anzahl an Messproben auf die maximale

Korrosionsgeschwindigkeit zu schliessen, welche sich entlang des Pfahls ausbilden wird. Es ist sehr unwahrscheinlich, dass die Lage der Lochkorrosionsstelle mit der Position einer Messprobe zusammenfällt. Diese Untersuchungen bestätigen aber die oft sehr geringe Korrosionsgeschwindigkeit auf den passiven Stahloberflächen. Es sind aber gerade diese passiven Stahloberflächen, welche als Kathoden die hohen anodischen Stromdichten in den Anoden liefern, welche zu stabiler Lochkorrosion und folglich lokal erhöhter Korrosionsgeschwindigkeit führen.

Auf der vorliegenden Grundlage bezüglich der Korrosionsprozesse und der Felduntersuchungen ist es möglich, die kritischen Zustände zu identifizieren, welche die Dauerhaftigkeit von Mikropfählen beeinträchtigen können:

- Stahl in vielen homogenen Böden gelangt in der Folge von sich bildenden Korrosionsprodukten meist in einen passiven Zustand, welcher zu vernachlässigbaren Korrosionsgeschwindigkeiten im Bereich von 0.02 mm/Jahr führen.
- Diese sehr geringe Korrosionsgeschwindigkeit in homogenen Böden ist weitestgehend unabhängig von der Bodenaggressivität und wird insbesondere unterhalb des Grundwasserspiegels mit begrenzter Belüftung beobachtet. Bei fehlendem Oxidationsmittel verringert sich das Risiko für Lochkorrosion auf der passiven Stahloberfläche als Folge der fehlenden Kathode. Ohne Kathode ist die Stabilisierung von Lochkorrosion weitestgehend unmöglich, wie die Erfahrungen mit Innenkorrosion in Rohrleitungen zeigen [26].
- In heterogenen Böden kommt es unweigerlich zu galvanischer Korrosion zwischen unterschiedlich belüfteten Bereichen. Dies führt üblicherweise im Bereich mit schlechter Belüftung zu einer Stabilisierung von Lochkorrosion und in der Folge erhöhten lokalen Korrosionsgeschwindigkeiten. Die Folge sind relevante Querschnittsverluste, verminderte Tragfähigkeit und beschränkte Nutzungsdauern von Mikropfählen.

Für die Dauerhaftigkeit von Mikropfählen ist es daher entscheidend, ob sich bei heterogener Belüftung des Bodens stabile lokale Korrosion bilden kann. Die bei metastabiler lokaler Korrosion auftretenden Stromdichten haben dabei für die Stabilisierung der lokalen Korrosion eine zentrale Bedeutung. Wenn diese Stromdichte gering ist, ist die Säurebildung begrenzt und es kommt zur Repassivierung. Wenn diese Stromdichte an der Anode jedoch sehr hoch ist, sinkt der pH-Wert ab und es kommt zu stabiler lokaler Korrosion und beschränkter Nutzungsdauer des Pfahls. Die bei der Stabilisierung der lokalen Korrosion auftretenden Stromdichten werden dabei durch folgende Faktoren beeinflusst:

- Die Grösse der Kathode: Eine grössere Kathode führt zu einem ungünstigen Verhältnis zwischen Anoden- und Kathodenfläche. Dies führt zu hohen anodischen Stromdichten, welche die Stabilisierung der lokalen Korrosion begünstigen und die Integrität des Pfahls beeinträchtigen.
- Galvanische Trennung des Pfahls von der Bewehrung: Die Bewehrung von Stahlbetonstrukturen wirkt als sehr grosse Kathode. Die galvanische Trennung des Pfahls von der Bewehrung verbessert das Verhältnis von Anode zu Kathode und begünstigt die Repassivierung.
- Der Bodenwiderstand: Ein hoher Bodenwiderstand führt zu einer ohmschen Kontrolle des Stromflusses und begrenzt die maximal möglichen Stromdichten in der Anode. Bodenwiderstände können von 10 bis 1000 Ω m variieren. Dies führt entsprechend zu einer Verringerung der auftretenden Stromdichten in der Anode um bis zu einem Faktor 100 in hochohmigem Boden. In der Folge wird Repassivierung in hochohmigem Boden wahrscheinlicher.
- Spannung zwischen Anode und Kathode: Je grösser die Spannung zwischen Anode und Kathode, desto grösser wird die mögliche Stromdichte. Das Potenzial der Anode liegt üblicherweise bei ca. $-0.75 V_{CSE}$. Jenes von passivem Stahl in belüfteten Beton bei $-0.2 V_{CSE}$. Daraus folgt, dass durchaus Spannungen von 0.55 V auftreten können. In nassem Beton kann das Potenzial deutlich negativer sein und auch in den Bereich von $-0.8 V_{CSE}$ gelangen. In der Folge geht die Spannung zwischen der Anode und der Kathode gegen Null oder wird gar leicht negativ. Die Anodenstromdichte wird in der Folge vernachlässigbar klein und die Stabilisierung von Lochkorrosion in homogenem

nassem Boden wird unwahrscheinlich. Die Spannung zwischen Anode und Kathode ist folglich in hohem Masse durch die Belüftung und deren Verteilung im Boden bestimmt.

Die Stromdichte, welche zur Stabilisierung von lokaler Korrosion führt, ist ein wichtiger Aspekt. Es gibt aber weitere wesentliche Einflussgrößen, welche einen Einfluss auf die Stabilisierung von Lochkorrosion haben:

- Der Werkstoff: Nichtrostender Stahl zeigt ein deutlich besseres Repassivierungsverhalten als Stahl in vergleichbarer Bettung.
- Der pH-Wert der Bettung: Stark alkalische Bettung verbessert das Repassivierungsverhalten von Stahl und nichtrostendem Stahl erheblich. Wesentlich für die Integrität ist die vollständige und rissfreie Umhüllung mit Zementmörtel von ausreichender Überdeckung. Insbesondere bei Mikropfählen unter Zugbeanspruchung kann Rissbildung und Zutritt von Wasser aus dem umgebenden Erdreich kaum ausgeschlossen werden. In der Folge kann es zum lokalen Verlust der Passivität und Korrosion kommen.
- Anionen, welche die Absenkung des pH-Werts begünstigen: Insbesondere Chloride, aber bis zu einem gewissen Grad auch Sulfate können die Absenkung des pH-Wert an der Anode und damit die Stabilisierung von Lochkorrosion begünstigen. Dabei ist stets das Verhältnis von Chlorid zu Hydroxidionen relevant. Solange der Stahl in alkalischem Mörtel gebettet ist, sind hohe Chloridkonzentrationen an der Stahloberfläche für stabilen Lochfrass erforderlich.
- Anionen, welche die Konzentration von Fe^{2+} begrenzen: Der Korrosionsprozess führt zur Bildung von Fe^{2+} Ionen als Korrosionsprodukt. Eine erhöhte Fe^{2+} Konzentration begünstigt die Passivierung des Stahls selbst in nah neutralen Böden. Dementsprechend sind Anionen, welche die Anreicherung von Fe^{2+} begrenzen aus korrosionstechnischer Sicht kritisch: Karbonate (als Reaktionsprodukt von CO_2), Sulfide (aus bakterieller Aktivität unter anaeroben Bedingungen) und die Salze von organischen Säuren (z.B. aus Torf) wirken sich daher stark korrosionsfördernd aus.

Nebst diesen chemischen Aspekten sind weitere physikalische Effekte zu beachten. Die Anreicherung an Fe^{2+} Ionen und die Aufrechterhaltung eines hohen pH-Werts im Mörtel erfordern einen begrenzten Stofftransport. Strömendes Grundwasser an der Stahloberfläche beeinträchtigt den Korrosionsschutz des Stahls durch Neutralisation des pH-Werts und Austrag von Fe^{2+} Ionen erheblich. Derartige negative Effekte können bei Rissbildung in der Zementumhüllung des Mikropfahls oder kompletter Ablösung des Mörtels von der Stahloberfläche auftreten. Ein begrenzter Stofftransport durch optimale Bettung und dicht anliegende Zementmörtelumhüllung sind daher für die Dauerhaftigkeit von zentraler Bedeutung.

2.3 Exposition und Korrosionsgefährdung

2.3.1 Einleitung

Die Dauerhaftigkeit von Mikropfählen ist in hohem Masse durch deren Exposition bestimmt. Die verschiedenen Felduntersuchungen mit Stahl in unterschiedlichster Bettung im Boden haben deutlich gezeigt, dass bei homogenen Bettungsbedingungen ohne galvanische Elementbildung und schlechter Belüftung keine integritätsrelevanten Korrosionsgeschwindigkeiten zu erwarten sind. Auch bei Einbau unterhalb des Grundwasserspiegels im Boden wird bei homogenen Bedingungen ohne galvanische Elementbildung keine relevante Schädigung beobachtet.

Diese hohe Dauerhaftigkeit selbst bei direktem Bodenkontakt ist aber nur unter ganz speziellen Randbedingungen sichergestellt. Unter realen Expositionen in heterogenen Böden ist daher eine Beeinträchtigung der Dauerhaftigkeit zu erwarten. So führt Bettung in homogenem Boden mit heterogener Belüftung zu Belüftungselementen und damit verstärkter Korrosion. Diese Aspekte werden in den folgenden Kapiteln behandelt.

2.3.2 Heterogenität des Untergrunds

Mikropfähle werden meist in heterogenen Untergrund eingebacht. Unterschiedliche Bodenbeschaffenheit in Bezug auf Zusammensetzung, Granulometrie, Standfestigkeit, Wasserdurchlässigkeit, Wassersättigung, elektrischen Widerstand und Belüftung führen unweigerlich zu unterschiedlichen Potenzialen entlang des Mikropfähls und somit zu möglicher galvanischer Korrosion. Selbst beim Einbau in homogenem wassergesättigtem Untergrund führt der Übergang aus dem Boden in das Bauwerk und die Verankerung im Beton zu heterogener Bettung, Belüftung und damit einem galvanischen Element.

2.3.3 Chlorideintrag

Eine ausreichende Dauerhaftigkeit von Stahl im Boden ist nur dann sichergestellt, wenn der Stahl in einem passiven Zustand vorliegt und dieser dauerhaft aufrechterhalten wird. Dieser passive Zustand kann insbesondere bei erhöhtem Chloridgehalt im Boden, aber bei sehr hohen Konzentrationen auch im Beton nicht unter allen Umständen sichergestellt werden. Die Chloride können einerseits von salzhaltigen Bodenschichten, aber auch vom Eintrag von Tausalzen auf Strassen stammen.

2.3.4 Sulfateintrag

Sulfate haben gegenüber Chloriden einen deutlich weniger schädlichen Einfluss in Bezug auf Lochkorrosion von Stahl. Erhöhte Gehalte an Sulfaten aus dem Grundwasser können aber dennoch ungünstige Auswirkungen haben:

- In Kombination mit Chloriden wird die Stabilisierung von Lochkorrosion begünstigt
- Hohe Sulfatkonzentrationen verringern den Bodenwiderstand und begünstigen galvanische Korrosion
- Die Kombination von erhöhten Sulfatgehalten mit schlechter Belüftung begünstigt die Aktivität von Sulfat reduzierenden Bakterien.

Die durch die Bakterien generierten Sulfide und die freigesetzte Kohlensäure bewirken durch die Verringerung des pH-Werts und die Bildung von schwerlöslichen Eisenverbindungen eine zusätzliche Erhöhung der Korrosionsgefährdung.

2.3.5 Organische Säuren

Böden mit einem erhöhten organischen Anteil, wie zum Beispiel Torf oder Humus, enthalten als Folge von bakteriellen Zersetzungsprozessen stets organische Säuren. Organische Säuren senken den pH-Wert und komplexieren Fe^{2+} Ionen. In der Folge wird das Korrosionsrisiko erhöht.

2.3.6 Wasserdurchlässigkeit

Korrosionsprozesse sind in hohem Masse beeinflusst durch Stofftransportprozesse. Eine erhöhte Durchlässigkeit des Bodens oder gar strömendes Grundwasser führen zu deutlich verschärften Korrosionsbedingungen, da OH^- Ionen und gebildetes Fe^{2+} abgeführt und Sauerstoff nachgeliefert wird. Diese Effekte sind vor allem im Grundwasser oder in den Bereichen mit wechselndem Grundwasserspiegel zu erwarten.

2.3.7 Mechanische Beanspruchung

Mikropfähle werden üblicherweise eingesetzt, um mechanische Kräfte in den Boden einzuleiten. Diese Kräfte können in gewissen Fällen zeitlich konstant sein. Es gibt aber auch Anwendungsfälle mit relevanten Lastwechseln als Folge des Betriebs oder als Ergebnis von Setzungsprozessen oder Verschiebungen im Boden. Diese mechanischen Randbedingungen haben Konsequenzen für den Korrosionsschutz sowie dessen Nutzungsdauer. Die Auswirkung der mechanischen Beanspruchungen auf die Dauerhaftigkeit ist abhängig vom gewählten Korrosionsschutzsystem. So können

mechanische Belastungen bei einer Zementmörtelumhüllung zu einer Rissbildung und einer Beeinträchtigung der Korrosionsschutzwirkung führen.

2.3.8 Streustrombeeinflussung

Die an den Anoden auftretenden Stromdichten sind entscheidend für die Stabilisierung von Lochkorrosion. Diese Ströme können die Folge von galvanischen Elementen sein. Ebenso können aber auch Ströme von Gleichstromanlagen zu einer Beeinflussung der Mikropfähle führen. Als mögliche Quellen für Streuströme kommen Gleichstrombahnen und kathodische Schutzanlagen in Frage. Bei Streustrombeeinflussung wird die Korrosionsgefährdung oft deutlich erhöht.

2.4 Anforderungen an den Korrosionsschutz von Mikropfählen

Im Tiefbau werden konkrete Vorgaben in Bezug auf die Bewehrungsüberdeckung gemacht, damit die Nutzungsziele der Anlagen erreicht werden können. Dabei sind konkrete Anforderungen in Bezug auf den verwendeten Beton und die Überdeckung einzuhalten. Die Erfahrung zeigt, dass trotz diesen Vorgaben die geforderte Dauerhaftigkeit von Tiefbauten nur durch regelmässige Zustandserfassung und gezielte Instandhaltung erreicht werden kann.

Die Mikropfähle haben eine zentrale Funktion für den sicheren und dauerhaften Betrieb der Infrastruktur. Deren Versagen kann die Sicherheit der Anlagen in erheblichem Masse beeinträchtigen. Im Gegensatz zur Bewehrung von Tiefbauten sind die Mikropfähle für eine Zustandsbewertung und eine Instandhaltung üblicherweise nicht zugänglich. Daraus folgt, dass die Anforderungen an den Korrosionsschutz den konkreten Expositionen angepasst sein müssen und für die vorgesehene Nutzungsdauer sichergestellt sein müssen. Aus dieser fehlenden Kontroll- und Instandsetzungsmöglichkeit für die strukturell relevanten Mikropfähle bei gleichzeitig schlecht definierten und zeitlich nicht konstanten Expositionsbedingungen folgen erhöhte Anforderungen an den Korrosionsschutz. Diese Anforderungen sind zwangsläufig restriktiver als jene für den Bewehrungsstahl im Tiefbau.

Bei der praktischen Anwendung ist immer von der Möglichkeit von galvanischen Elementen auszugehen. Der Begrenzung der Kathodenfläche und der Erhöhung des elektrischen Widerstands kommt daher eine wesentliche Bedeutung zu. Bei stark erhöhtem Bodenwiderstand kann somit generell von einer reduzierten Korrosionsgefährdung ausgegangen werden. Falls dieser nicht gegeben ist, muss in der Folge durch zusätzliche Massnahmen, wie der erhöhten Mörteldeckung oder der Verwendung von nichtrostenden Stählen der Korrosionsschutz sichergestellt werden.

3 Korrosionsschutz Systeme

3.1 Einleitung

Im Gegensatz zu Bewehrungsstahl in Beton, welcher durch eine definierte Überdeckung mit definiertem Beton vor Korrosion geschützt wird, sind die Anforderungen bei Mikropfählen deutlich komplexer. Durch den Einsatz und die Kombination geeigneter Korrosionsschutzsysteme kann auch bei anspruchsvollen Expositionen ein dauerhaftes System erreicht werden.

Korrosionsschutz Systeme oder -Massnahmen beschreiben unterschiedliche Methoden, mit welchen ein Schutz des Traggliedes vor Korrosion bzw. eine Abminderung der Auswirkungen eines Korrosionsangriffes erzielt werden können. Folgende Korrosionsschutzmassnahmen können hierfür angewendet werden:

- einfacher Korrosionsschutz (SCP):
Ein einfacher Korrosionsschutz kann wie folgt ausgeführt werden:
 - als Zementumhüllung (GCP)
 - als Verzinkung (ZCP)
 - als organische Beschichtung (CCP)
 - als Korrosionszuschlag (STA)
- doppelter Korrosionsschutz (DCP):
Der Doppelte Korrosionsschutz ist die Kombination von Zementumhüllung mit Zementsuspension, Zementmörtel oder Beton und der Verwendung einer zusätzlichen Verrohrung aus Kunststoff oder Stahl
- materialbedingter Korrosionsschutz (MCP):
Die Verwendung von Werkstoffen mit erhöhter Korrosionsbeständigkeit wie nichtrostender Stahl oder, z. B. glasfaserverstärkter Kunststoff, als Tragglied, wird als materialbedingter Korrosionsschutz bezeichnet.

Die Norm SIA 267 [27] sieht für auf Druck belastete Mikropfähle eine Zementumhüllung (GCP) als Korrosionsschutzmassnahme vor. Bei auf Zug belasteten Systemen und bei ungespannten Ankern sind die Korrosionsschutzmassnahmen bezüglich der Korrosionsgefährdung und der Bauwerksklasse abgestuft. Die Schutzstufe 1 entspricht GCP, die Schutzstufen 2a und 3a entsprechen DCP und die Schutzstufen 2b und 3b entsprechen MCP.

3.2 Zementumhüllung (GCP)

Zementstein weist einen pH-Wert von ca. 12.5 auf. Dieser erhöhte pH-Wert stellt die Passivität des Stahls sicher. Der Korrosionsschutz ist sichergestellt, solange der pH-Wert an der Stahloberfläche erhöht ist und kein relevanter Eintrag von Chloriden aus der Umgebung erfolgt. Bei Rissen, Abplatzungen oder Karbonatisierung der Zementumhüllung durch den erhöhten CO₂ Gehalt im Boden, ist die Korrosionsschutzwirkung nicht mehr sichergestellt. Unter diesen Bedingungen kann es zur Stabilisierung von Lochkorrosion kommen. Dabei wirken sich insbesondere Streuströme, galvanische Elemente, Chloride, hohe Sulfatgehalte, organische Säuren und schlechte Belüftung an der Anode zusätzlich ungünstig aus.

3.3 Verzinkung (ZCP)

Die Feuerverzinkung von Stahl stellt in vielen Anwendungsfällen einen wirksamen Korrosionsschutz dar. Diese Verzinkung hat eine Schichtdicke von ca. 0.07 mm. Da das Zink in vielen Bedingungen eine Deckschicht bildet, werden bei typischen atmosphärischen Beanspruchungen Nutzungsdauern von bis zu 40 Jahren erreicht. Unter dauernassen Bedingungen sowie in Gegenwart von Chloriden kann sich diese Passivschicht auf Zink

nicht bilden. In der Folge kommt es zum schnellen Abbau der Verzinkung und zum Verlust des Korrosionsschutzes. Dieser Abtrag von Zink erfolgt insbesondere in wässrigen alkalischen Medien sehr schnell. Zwar kann Zink in Beton nach einer Korrosionsphase durch die Anreicherung von Zn^{2+} Ionen an der Metalloberfläche passivieren, bei Rissbildung in der Zementumhüllung und Verdünnung der Zink Ionen kommt es aber wieder zum schnellen Abtrag der Verzinkung. Aus diesen schlecht definierten und kaum kontrollierbaren Einflussfaktoren folgt, dass eine Verzinkung nicht für einen dauerhaften Korrosionsschutz im Boden eingesetzt werden darf.

3.4 Organische Beschichtungen (CCP)

Durch das Aufbringen einer Beschichtung auf die Stahloberfläche wird eine Trennung von Stahl und umgebenden Boden erreicht. Dies bewirkt grundsätzlich einen wirksamen Korrosionsschutz. Bei Beschichtungen muss aber davon ausgegangen werden, dass diese nie fehlerstellenfrei eingebaut werden können. Zudem ist auch bei der mechanischen Beanspruchung im Betrieb oder in der Bauphase sowie beim Einbau mit weiteren Schäden in der Umhüllung zu rechnen. Diese Umhüllungsfehler sind oft klein und führen zum Kontakt von vergleichsweise kleinen Stahlflächen mit dem Erdboden. Einzelne dieser kleinen Fehlerstellen können als Anoden wirken, während die grosse verbleibende Anzahl an Fehlerstellen als Kathoden wirkt. Galvanische Korrosion und lokal erhöhte Korrosionsgeschwindigkeiten können folglich mit organischen Beschichtungen nicht zuverlässig ausgeschlossen werden.

3.5 Korrosionszuschlag (STA)

Mikropfähle werden zur Übertragung mechanischer Kräfte in den Boden eingesetzt. Zur Sicherstellung dieser Funktion ist ein ausreichender Querschnitt erforderlich. Nur so kann die erforderliche Zugfestigkeit und/oder Druckfestigkeit bzw. der erforderliche Knickwiderstand sichergestellt werden. Durch das Überdimensionieren des Querschnittes, dem sogenannten Korrosionszuschlag, kann einem allfälligen Korrosionsabtrag begegnet werden, wie dies z.B. bei Spundwandbohlen gemacht wird. Dieser Ansatz stellt somit nicht eine Korrosionsschutzmassnahme dar. Vielmehr wird die Korrosion bewusst in Kauf genommen und durch eine Überdimensionierung des Querschnitts berücksichtigt, damit die erwartete Nutzungsdauer trotzdem erreicht werden kann.

Dieser Ansatz wird in der Ölindustrie angewendet, um der Innenkorrosion in den Rohrleitungen bei der Gewinnung von Rohöl Rechnung zu tragen. Die wichtige Voraussetzung dabei ist jedoch die Annahme von homogener Flächenkorrosion. Dadurch kommt es zu einem gleichmässigen Abrosten und einer langsamen und gleichmässigen Wandstärkenverminderung. Für den Fall von lokal beschleunigter Korrosion ist die Anwendung eines Korrosionszuschlags jedoch nicht zweckmässig. Der Grund dafür liegt in den schlecht abschätzbaren erhöhten Korrosionsgeschwindigkeiten bei Lochkorrosion sowie der durch den lokalen Angriff hervorgerufenen Kerbwirkung. Die beiden Effekte erschweren die Anwendung und Auslegung eines Korrosionszuschlags.

3.6 Hüllrohre (DCP)

Durchgehende Hüllrohre über Mikropfähle stellen für sich keinen Korrosionsschutz dar. Sie erfordern zusätzliche Massnahmen wie die Verfüllung mit Zement. In Kombination mit einer zementösen Verfüllung nehmen Kunststoffhüllrohre aber wichtige Korrosionsschutzfunktionen wahr:

- Durch das Hüllrohr wird eine möglichst lückenlose Zementüberdeckung mit einer definierten Stärke sichergestellt (Distanzhalter zwischen Stahltragglied und Hüllrohr).
- Die Hüllrohre behindern die Bildung von durchgehenden Rissen im Zement vom Boden bis an die Stahloberfläche. Damit werden strömendes Wasser und ein beschleunigter Stofftransport wirksam unterbunden. Ein alkalisches Medium und folglich die Passivität des Stahls wird auch bei mechanischer Beanspruchung des Mikropfahls aufrechterhalten.

- Das Hüllrohr ist eine wirksame Barriere, die den Transport von Schadstoffen wie Chloriden, Sulfaten, O₂ oder CO₂ an die Stahloberfläche behindert.
- Das Kunststoffhüllrohr führt zu einem beschränkten Zementvolumen und damit einem erhöhten elektrischen Widerstand. In der Folge kann sich kein räumlich ausgedehntes galvanisches Element zwischen einer lokalen Korrosionsstelle und der passiven Stahloberfläche im Hüllrohr bilden. Stabile Lochkorrosion wird somit unwahrscheinlich.
- Hüllrohre aus metallischen Werkstoffen weisen eine ähnliche Korrosionsschutzwirkung auf. Sie behindern den Stofftransport und die Bildung von durchgehenden Rissen. Die Hüllrohre können jedoch im Gegensatz zu Kunststoffhüllrohren ebenfalls durch Korrosionsprozesse beschädigt werden. Für die Dauerhaftigkeit der metallischen Hüllrohre gelten somit die gleichen Überlegungen wie für die Mikropfähle ohne Hüllrohr.
- Bei Mikropfählen mit grösseren Längen müssen die Hüllrohre und die Tragglieder gekuppelt werden. In der Kupplungsstelle muss der Korrosionsschutz gleichwertig ausgebildet werden, wie in den übrigen Bereichen. Dies führt vor allem bei im Werk vorfabrizierten Mikropfählen zu der Schwierigkeit, dass die Zementinjektion im Kupplungsbereich nicht vorhanden ist und deshalb ein zusätzlicher Korrosionsschutz in diesem Bereich notwendig ist. Mögliche Lösungen sind Korrosionsschutzmassen, oder Korrosionsschutzbänder, welche in der Kupplungsstelle aufgebracht werden, bevor die Hüllrohre mit einem Schrumpfschlauch dicht verschlossen werden. In der praktischen Anwendung werden diese zusätzlichen Massnahmen jedoch oft nicht umgesetzt.

Die im Vergleich zu organischen Beschichtungen deutlich grössere Dicke der Hüllrohre führt zu deutlich besseren mechanischen Eigenschaften. Zudem zeigt Polyethylen, im Gegensatz zu anderen Kunststoffen, in alkalischen Medien wie Zement eine weitgehend unbegrenzte Dauerhaftigkeit.

3.7 Nichtrostende Stähle (MCP)

Durch die Zugabe von mindestens 12% Chrom zum Eisen wird auch bei neutralem pH-Wert die spontane Bildung eines Passivfilms ermöglicht. Durch Erhöhung des Chromgehalts sowie das Legieren von Molybdän kann der Widerstand gegen Lochkorrosion weiter verbessert werden. Abhängig von deren Legierungszusammensetzung sind nichtrostende Stähle daher in verschiedene Korrosionswiderstandsklassen gemäss SIA 179:2019 [28] bzw. Merkblatt SIA 2029 [29] eingeteilt. Die Basis für die Einteilung ist die Wirksumme, in der die gewichtete Wirkung verschiedener Elemente (Cr, Mo, N) berücksichtigt sind. Für den Einsatz in Zement ist eine Korrosionswiderstandsklasse I in gewissen Fällen ausreichend. Für den direkten Einsatz von nichtrostendem Stahl im Boden ist eine Korrosionswiderstandsklasse IV oder V erforderlich. Nur so kann dauerhaft das Versagen durch Lochkorrosion verhindert werden.

Durch eine Kombination von nichtrostenden Stählen mit einer zusätzlichen Zementumhüllung wird auch mit geringeren Korrosionswiderstandsklassen ein hervorragendes Korrosionsverhalten erreicht. Bei der Verwendung von nichtrostenden Stählen ist darauf zu achten, dass die mechanischen Kennwerte sich von normalen Betonstahl unterscheiden. Die Anforderungen bezüglich den Duktilitätseigenschaften werden nicht von allen Stählen erreicht.

3.8 Schutz gegen galvanische Korrosion

Galvanische Korrosion kann bei Mikropfählen begrenzt werden, indem der galvanische Kontakt zu Fremdkathoden verhindert wird. Dadurch werden die meist sehr grossen Kathoden in Form von passiver Bewehrung der Stahlbetonstrukturen sowie der damit verbundenen Erdungssysteme abgetrennt. Diese Massnahme kann zwar das galvanische Element stark verringern, die galvanische Elementbildung auf dem Mikropfahl selbst bleibt aber bestehen. Diese verbleibende galvanische Korrosion kann durch folgende Massnahmen weiter begrenzt oder gar vollständig unterbunden werden:

- Beim Einbau in einen hochohmigen Boden ($>100 \Omega\text{m}$) wird durch den erhöhten elektrischen Widerstand der Korrosionsstrom und damit das Risiko der Stabilisierung der Lochkorrosion verringert.
- Bei niederohmigem Boden kann durch den Einbau eines Kunststoffhüllrohrs die Ausdehnung des galvanischen Elements auf dem Mikropfahl auf eine geringe Länge beschränkt werden. Nebst dem geometrischen Effekt über die Erhöhung des Widerstands und die Begrenzung der Kathodenfläche bewirkt das Hüllrohr auch einen stark behinderte Sauerstoffdiffusion. Diese führt zu geringeren Spannungen zwischen Anode und Kathode, was zusätzlich das Risiko für die Stabilisierung von Lochkorrosion vermindert.
- Der Einsatz eines nichtrostenden Stahls verbessert den Widerstand gegen Lochkorrosion des Mikropfahls in der Zementmörtelumhüllung. Dadurch wird die Stabilisierung der Lochkorrosion unterbunden und ein wirksamer Korrosionsschutz erreicht. Ohne Stabilisierung der Lochkorrosion kommt es nicht zu galvanischen Strömen auf dem Mikropfahl. Die Wirksamkeit dieser Massnahme ist abhängig von der Korrosionswiderstandsklasse des nichtrostenden Stahls sowie den Angriffsbedingungen.
- Mit einer Feuerverzinkung und einer organischen Beschichtung des Stahles (Duplex-Beschichtung) kann die wirksame Kathodenfläche auf dem Mikropfahl reduziert werden. Die Korrosionsprozesse können nur noch in den Fehlstellen der Beschichtung ablaufen und somit wird die galvanische Korrosion deutlich vermindert. Die Wirksamkeit dieser Massnahme ist abhängig von der Qualität der Beschichtung (Fehlstellengrösse) im eingebauten Zustand.

3.9 Schutz gegen Streuströme

Die Stabilisierung der Lochkorrosion kann nicht nur durch galvanische Ströme erfolgen. Die Beeinflussung von Mikropfählen durch Streuströme von Gleichstromanlagen, wie Bahnen oder kathodischen Korrosionsschutzanlagen, kann ebenfalls die Stabilisierung der Lochkorrosion stark begünstigen und zu relevant erhöhten Korrosionsgeschwindigkeiten führen. Die Streustrombeeinflussung kann durch die folgenden Massnahmen beschränkt werden:

- Die galvanische Trennung des Mikropfahls von der Bewehrung sowie von Erdungssystemen beschränkt die am Mikropfahl auftretenden Spannungen und damit das Risiko von kritischer Streustrombeeinflussung.
- Die zusätzliche Verwendung eines Kunststoffhüllrohrs erhöht durch starke Erhöhung des Erdübergangswiderstands des Mikropfahls den Schutz gegen Streustrombeeinflussung. Durch den Einbau eines dichten Hüllrohrs wird nicht nur der erhöhte pH-Wert und der Wasser sowie Schadstoffzutritt unterbunden. Vielmehr wird auch der mögliche Stromfluss stark beschränkt.

Die bei Streustrombeeinflussungen auftretenden Spannungen können kurzzeitig beträchtlich sein. Unter Umständen kann die Stabilisierung der Lochkorrosion daher bei nichtrostenden Stählen nicht in allen Fällen ausgeschlossen werden. Diese sind daher nicht geeignet als zuverlässiger Korrosionsschutz bei kritischer Streustrombeeinflussung.

3.10 Schutz des Mikropfahlkopfes

Mit Hilfe verschiedener Korrosionsschutzmassnahmen wird der Korrosionsschutz des Mikropfahls auf der Verankerungslänge sichergestellt. Der Übergangsbereich aus dem Boden in den Kopf stellt jedoch aus Sicht der Integrität und Dauerhaftigkeit eine kritische Stelle dar. Dies aus folgenden Gründen:

- In diesem Bereich wirken erhöhte Kräfte, mitunter auch lateral zum Pfahl.
- Im Übergangsbereich zwischen dem gewachsenen Boden und dem Bauwerk kommt es beim Bau zu einer Auflockerung des Bodens, und oft werden auch zusätzliche Kies- oder Magerbetonschichten eingebaut.
- Das Risiko in Bezug auf den Eintrag von Schadstoffen wie Chloriden ist im Oberflächenbereich um den Kopf erhöht

- Während der Bauphase besteht die Gefahr, dass der Korrosionsschutz des Mikropfähles in diesem Bereich mechanisch beschädigt wird.

Es ist daher wesentlich, dass mindestens dieselben Korrosionsschutzmassnahmen im Übergangsbereich zum Kopf sichergestellt sind, wie auf der erdverlegten Pfahlänge. Weiter muss durch ausreichende Bewehrungsüberdeckung oder gegebenenfalls durch eine Abdeckung mit Fettverfüllung ein zuverlässiger Korrosionsschutz im Kopf über die Nutzungsdauer des Mikropfähls garantiert werden. In diesem Fall ist insbesondere die Exposition der Kopfbereichs sowie die zukünftige Beanspruchung in die Auslegung des Korrosionsschutzes miteinzubeziehen.

Analoge Überlegungen gelten auch für den Kopfbereich von ungespannten Ankern, wobei dort aufgrund der geometrischen Verhältnisse und der Bauabläufe etwas andere Schwachstellen im Vordergrund stehen (vgl. Kap. 6.1.1).

3.11 Weitere Schutzsysteme

Der Korrosionsschutz von Mikropfählen wird üblicherweise mit Stahl oder nichtrostendem Stahl in Kombination mit Zementumhüllung sowie Hüllrohr sichergestellt. Grundsätzlich sind noch weitere oder ergänzende Massnahmen möglich, welche in speziellen Situationen den Korrosionsschutz ermöglichen oder verbessern. Drei mögliche Massnahmen, welche in der Schweiz bisher kaum angewandt wurden, werden im Folgenden diskutiert:

- Faserverstärkte Kunststoffe (MCP): Zugbelastete Mikropfähle aus glasfaserverstärkten Kunststoffen werden als temporäre Massnahme im Tunnelbau verbreitet angewendet. Diese Systeme können die Problematik der galvanischen Korrosion und der Streustrombeeinflussung wirksam lösen. Allerdings weisen gerade Glasfasern und Polyesterharze begrenzte Dauerhaftigkeit in alkalischen Medien wie Zement auf. Die dauerhafte Funktion derartiger Systeme muss somit mit der vorliegenden Exposition am Einbauort abgeglichen werden, damit die Integrität sichergestellt werden kann.
- Für Anwendungen in extrem korrosiver Umgebung wird gelegentlich nichtrostender Stahl der Korrosionswiderstandsklasse V eingesetzt (MCP). Derartige Werkstoffe sind auch in Meerwasseranwendungen dauerhaft, sofern die Verarbeitung durch Wärmeeintrag, Phasenumwandlung und Oberflächenoxidation nicht zu einer Beeinträchtigung der Korrosionsschutzwirkung führt.
- Grundsätzlich ist es möglich, Mikropfähle mit Hilfe eines kathodischen Korrosionsschutzes gemäss SN EN 12954 [30] vor Korrosion zu schützen. Voraussetzung dafür ist die galvanische Trennung von Erdungssystemen. Zudem ist für eine ökonomische Lösung der zusätzliche Einsatz eines Umhüllungssystems angezeigt.

4 Korrosionsschutz von Mikropfählen in Normen und Richtlinien

4.1 Übersicht Normierung

Die Vielfalt der in der Schweiz gültigen, und damit auch umzusetzenden Normen ist sehr gross. Neben dem Normenwerk Europas existiert zurzeit auch ein eigenständiges, vollständiges Schweizer Normenwerk. Dieses umfasst im Bauwesen die Normen des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins (SIA) und die Normen des Schweizerischen Verbands der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS). Zusätzlich sind Richtlinien, Weisungen etc. von grösseren Bauherren wie dem Bundesamt für Strassen (ASTRA), den Schweizerischen Bundesbahnen, Netzbetreibern oder kantonalen Tiefbauämtern zu befolgen.

Zum Zeitpunkt der Erstellung des vorliegenden Berichts, ist in Europa die Ausarbeitung der Eurocodes der zweiten Generation (EC 2.G) im Gange. Die in diesem Bericht gemachten Verweise und Bemerkung zur europäischen Normierung beziehen sich auf die vorliegenden Normenentwürfe. Es ist deshalb zu beachten, dass sich die Normen bis zur definitiven Einführung in den Details noch ändern können. Der SIA hat entschieden, das europäische Normenwerk künftig zu übernehmen und die im Moment gültigen SIA-Normen damit zu ersetzen. Mit nationalen Ergänzungen und zusätzlichen Bestimmung wird das europäische Normenwerk dabei an die lokalen Verhältnisse angepasst werden.

4.1.1 Geotechnik in der Normierung

In der Schweiz gelten für Mikropfähle primär die Normen für die Geotechnik SIA 267 [27], SIA 267/1 [27], Ergänzende Bestimmungen, sowie die SIA 118/267 [31], Allgemeine Bedingungen für geotechnische Arbeiten. Damit wird alles abgedeckt, sämtliche Systeme, von der Planung bis zum fertigen Bauwerk. Auf europäischer Ebene ist demgegenüber die Planung im Eurocode EN 1997 geregelt und zu jeder Bauteilart gibt es eine Norm für die Ausführung. Schliesslich gibt es für die Prüfung von Systemen oder Einzelkomponenten separate Prüfnormen. *Abb. 11* zeigt die Verflechtung der europäischen mit den Schweizer SIA-Normen.

Zuordnung Inhalte SIA 267 zu europäischen Normen

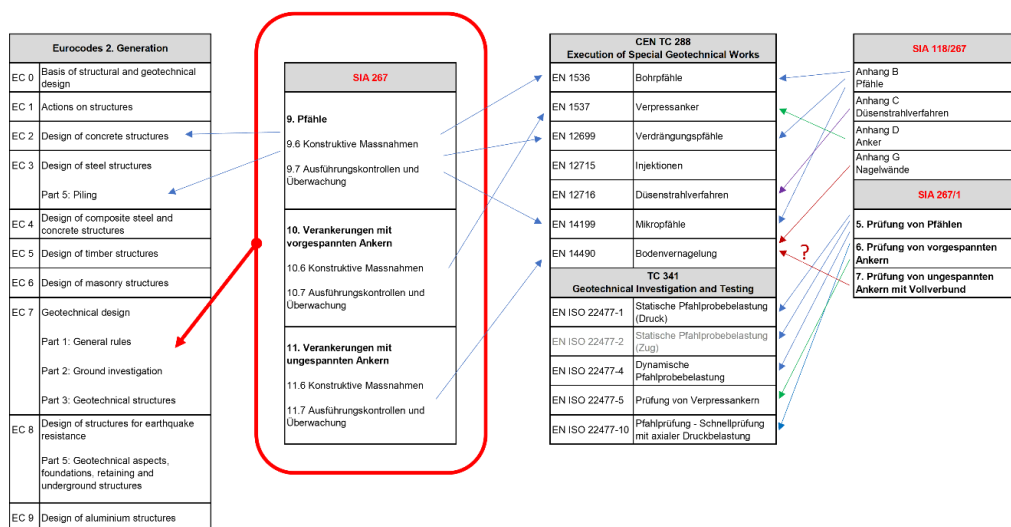


Abb. 11 Übersicht über die Verflechtung der Schweizer SIA-Normen mit den europäischen Normen für den thematischen Schwerpunkt dieses Berichts (Mikropfähle und ungespannte Anker).

4.1.2 Dauerhaftigkeit und Korrosionsschutz in der Normierung

Das Thema Korrosionsschutz wird sowohl auf europäischer als auch auf schweizerischer Ebene überall aufgegriffen, wo Werkstoffe einer potenziell korrosiven Umgebung ausgesetzt sind. Im Zusammenhang mit Mikropfählen und ungespannten Bodennägeln sind dies für die Planung die entsprechenden Kapitel in den SIA-Normen zur Geotechnik, aber auch die Normen zum Betonbau (SIA 262 [32], SIA 262/1[27] und SIA 118/262 [33]) oder zum Stahlbau (SIA 263 [34], SIA 263/1 [35] und SIA 118/263 [36]). Diese basieren wiederum grundsätzlich auf den Eurocodes EN 1997, EN 1992 und EN 1993, sowie auf der Betonnorm (SN EN 206 [37]). Schliesslich finden sich auch in den europäischen Normen zur Ausführung von Mikropfählen und Bodennägeln Bestimmungen zum Korrosionsschutz bzw. zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit.

Im Zusammenhang mit dem Korrosionsschutz im Stahlbau sind zudem die SN EN ISO 12944, Teile 1 bis 9 zu erwähnen (Beschichtungsstoffe – Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme), sowie die SIA 179 [28] (Befestigungen in Beton und Mauerwerk).

In der Regel wird in einem ersten Schritt versucht, die Korrosivität des umgebenden Mediums zu erfassen, zu bewerten und einer Expositions- oder Korrosivitätsklasse zuzuordnen. In einem zweiten Schritt werden, abhängig von weiteren Aspekten, konstruktive und materialtechnische Anforderungen festgelegt.

4.1.3 Normen zur Bewertung der Bodenaggressivität

In den bereits erwähnten Normen sind eher neutrale und meist sehr allgemein gehaltene Bestimmungen zur Baugrunduntersuchung enthalten. Ausgenommen sind die Normen SN EN 14490 [38], Bodenvernagelung, und die Betonnorm (SN EN 206 [37]). Die SN EN 14490 übernimmt im informativen Anhang B die Klassifizierung der Aggressivität von Böden von Clouterre [39] aus dem Jahr 1991, die SN EN 206 definiert sowohl Prüfverfahren als auch Grenzwerte für die Zuordnung zu den Expositionsklassen für chemischen Angriff auf Beton (gilt für natürliche Böden und Grundwasser). In den Ausführungsnormen wird in der Regel auf den Eurocode EN 1997 verwiesen, dieser wiederum verweist auf die SN EN 12501-2 [17].

Für die Bewertung von Böden im Hinblick auf die Korrosion von Stahl stehen damit die SN EN 12501-2 «Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe – Korrosionswahrscheinlichkeit in Böden», die deutsche Norm DIN 50929-3 [19], «Korrosionswahrscheinlichkeit metallischer Werkstoffe bei äusserer Korrosionsbelastung» und die SN EN 14490 im Vordergrund.

Im Zusammenhang mit vorgespannten Ankern wird die Untersuchung allfällig vorhandener Streuströme erwähnt und auf die SN EN 50162 [40] «Schutz gegen Korrosion durch Streuströme aus Gleichstromanlagen» verwiesen.

Weiter definiert die SN EN ISO 14688 [41, 42], Teile 1 und 2, Geotechnische Erkundung, die geotechnische Beschreibung und Klassifizierung von Boden. Sie enthält aber keine Bestimmungen zur Korrosivität von Böden.

4.2 Allgemeine Grundsätze für die Projektierung

Im Anhang I werden Bestimmungen verschiedener Normen zusammengestellt. Im Fokus stehen Mikropfähle bis zu einem Durchmesser von 300 mm und ungespannte Anker. Grössere Bohrpfähle und vorgespannte Anker werden nicht betrachtet. Verglichen werden insbesondere Bestimmungen in europäischen und in Schweizer Normen.

In der Schweiz gelten für die Projektierung aller Tragwerke, auch von temporären Tragwerken und von Bauzuständen, die Grundsätze der Norm SIA 260 [43] (Grundlagen der Projektierung von Tragwerken). Diese basieren auf der EN 1990.

Der erforderliche Grad der Zuverlässigkeit ist abhängig von der Art und den Folgen eines Versagens, dem Ausmass der akzeptierbaren Schäden, der Bedeutung des Tragwerks, dem Aufwand zur Verminderung des Risikos und den Möglichkeiten von Überwachung, Instandhaltung und Instandsetzung. Er wird mit Hilfe von Beiwerten und Partialfaktoren gewährleistet.

Generell sind Umfang und Inhalt von Untersuchungen der Bedeutung des Tragwerks und der Komplexität der Problemstellung anzupassen, ebenso sind Anforderungen an die Kenntnisse und Erfahrung der beteiligten Fachpersonen zu stellen.

4.2.1 Gewährleistung der Dauerhaftigkeit

Die Gewährleistung der Dauerhaftigkeit erfolgt generell nach empirischen Grundsätzen. Der Exposition (Korrosivität oder Korrosionswahrscheinlichkeit im vorliegenden Baugrund) werden Anforderungen an die konstruktive Ausbildung und an die Werkstoffe gegenübergestellt, welche sich bewährt haben. Die Tabelle im Anhang I.1 gibt eine Übersicht über die Regelungen in verschiedenen Normen.

Die erforderlichen Anforderungen sind neben der Exposition von weiteren Parametern abhängig, primär von der geplanten Nutzungsdauer aber auch, entsprechend den allgemeinen Prinzipien, vom potenziellen Schadenausmass, der Relevanz des Bauwerks oder Bauteils, der Beanspruchung, der Überwachbarkeit, der Möglichkeit zu ersetzen oder zu ergänzen etc.

In der Regel erfolgt in der Geotechnik keine Bemessung auf Dauerhaftigkeit, wie diese z.B. im Betonbau in Ausnahmefällen praktiziert wird. Im Normalfall wird aber auch im Betonbau empirisch gearbeitet, wobei die Regelungen in der Betonnorm für eine Nutzungsdauer von 50 Jahren ausgelegt sind (SN EN 206:2013, NA.5.3.1). Für längere Nutzungsdauern bis 100 Jahre werden im Nationalen Anhang SN EN 206:2013, NA.8.2.3.4 zur Betonnorm schweizerische Vorgaben für Dauerhaftigkeitsprüfungen und die zugehörigen Anforderungen zur Gewährleistung der gewünschten Dauerhaftigkeit gemacht. In der Norm für den Betonbau wird dazu vermerkt, dass die Qualitätsanforderungen und die Bestimmungen zur Ausführung im Allgemeinen als Mindestanforderungen zu verstehen sind (SIA 262:2013, Ziffer 0.1.6).

4.2.2 Nutzungsdauer

Für die Nutzungsdauer werden in der Norm SIA 260 [43], basierend auf der EN 1990, folgende, generellen Angaben gemacht:

- | | | |
|---|--------|-------|
| • Temporäre Bauwerke | bis 10 | Jahre |
| • Austauschbare Bauteile | bis 25 | Jahre |
| • Bauwerke von normaler Bedeutung | 50 | Jahre |
| • Bauwerke von übergeordneter Bedeutung | 100 | Jahre |

Demgegenüber wird in der Norm für die Geotechnik (SIA 267[27]) bei den durch Zug beanspruchten Elementen nur zwischen temporär und permanent unterschieden, wobei die Grenze bei 2 (vorgespannte Anker) bzw. 5 (ungespannte Anker und Mikropfähle) Jahren liegt.

In der EN 1997 wird auf EN 1990 verwiesen. In den Ausführungsnormen gibt es weitere, abweichende Angaben. So darf gemäss SN EN 14199 [1] im Fall der Mikropfähle die Überdeckung mit Verpressmörtel auf 10 mm reduziert werden bei temporärer Nutzung (bis 5 Jahre, wenn keine chemische Aggressivität vorhanden ist). In der SN EN 14490 [38] werden für die Bemessung von Bodennägeln Dickenverluste, abhängig von der Nutzungsdauer angegeben: bis 1.5 Jahre (temporär), 1.5 bis 30 Jahre und 30 bis 100 Jahre (permanent). Und in der SN EN 1537 [44] (Anker) wird von Kurzzeitankern gesprochen mit einer maximalen Nutzungsdauer von 2 Jahren.

4.2.3 Schadenausmass und Relevanz des Bauteils/Bauwerks

Im EC 1990 werden die Grundsätze definiert, nach welchen die erforderliche Zuverlässigkeit eines Bauwerks erreicht werden soll.

Zunächst werden die Folgen eines Versagens fünf Schadensfolgeklassen (consequences classes CC) zugeordnet (CC0 bis CC4). Dabei werden primär Personenschäden sowie ökonomische, soziale und Umweltschäden berücksichtigt, wobei die Bewertung neutral gehalten ist. Genauere Definitionen sollen national, in den nationalen Anhängen zur Norm geregelt werden (Tab. 2). Beispiele werden im Anhang, bzw. für den Grundbau in EN1997-1 aufgeführt.

Tab. 2 Schadensfolgeklassen gemäss EN 1990

Schadensfolgeklasse	Bewertung der Schadenfolge		
	Personenschäden	Ökonomische,	soziale oder Umweltschäden
CC4 – Sehr hoch	Sehr hoch	Extrem hoch	
CC3 – Hoch	Hoch	Sehr gross	
CC2 – Mittel	Mittel	Erheblich	
CC1 – Niedrig	Niedrig	Gering	
CC0 – Gering	Sehr niedrig	Unbedeutend	

Die Schadensfolgeklasse, Schadensursache und Versagensart, die Relevanz eines Bauwerks sowie die Verhältnismässigkeit der Massnahmen zur Reduktion der Eintretenswahrscheinlichkeit bestimmen schliesslich die akzeptierbare Wahrscheinlichkeit für ein Versagen, bzw. die erforderliche Zuverlässigkeit einer Tragstruktur.

Um die erforderliche Zuverlässigkeit einer Struktur zu erreichen, sind verschiedene Massnahmen möglich und nötig. Dazu werden weitere Klassifizierungen eingeführt um die Anforderungen an die Qualität in der Projektierung (inkl. Prüffingenieur) und in der Ausführung (inkl. Qualitätssicherung) zu gewährleisten (Tab. 3). Die Festlegung der Niveaus im Detail muss wiederum national geregelt werden.

Tab. 3 Klassifizierungen zu Managementmassnahmen, um die geforderte Zuverlässigkeit zu erreichen (gemäss EN 1990)

Klasse für die erforderliche Ausbildung/Erfahrung der Projektierenden	Klasse für die Überprüfung der Projektierung	Qualitätssicherung der Ausführung
DQL3 (Projektierung komplexer Bauwerke)	DCL3 (umfassende Fremdüberwachung)	IL3 (umfassende Fremdüberwachung)
DQL2 (weiter fortgeschrittene Projektierung)	DCL2 (normale Fremdüberwachung)	IL2 (normale Fremdüberwachung)
DQL1 (Projektierung einfacher Bauwerke)	DCL1 (Eigenüberwachung)	IL1 (Eigenüberwachung)

Ja nach Schadensfolgeklasse werden minimale Anforderungen an die Qualität der Projektierung (Design qualification and experience levels DQL und Design check levels DCL) und der Ausführung (Inspection levels IL) festgelegt.

Für Fundationen wird die Klassifizierung für die Struktursensitivität (structural sensitivity classes SSC) eingeführt (SSC1 bis SSC5, Tab. 4). Im EC7 werden dazu für die maximale differentielle Setzung, die maximale Verformung, die maximale Verkippung Grenzwerte definiert und es werden für die Sensitivitätsklassen Beispiele von Bauwerken angegeben. Zusätzlich zur EN 1990 wird in der EN 1997 eine geotechnische Komplexitätsklasse definiert (GCC1 bis GCC3), in die Boden- und Grundwassereigenschaften und die Komplexität der Boden-Struktur-Interaktion einfließen. Die Kombination der geotechnischen Komplexitätsklasse mit der Schadensfolgeklasse der Struktur (CC) ergibt dann die geotechnische Kategorie (GC1 bis GC3).

Um die erforderliche Zuverlässigkeit einer geotechnischen Kategorie zu erreichen sind Anforderungen an die Bodenuntersuchungen, Bemessungsmodelle, Validierung, Kenntnisse und Erfahrung der Projektierenden, Überwachung, Unterhalt etc. zu stellen. Auch für die geotechnischen Kategorien werden minimale Anforderungen an die Qualität der Projektierung und der Ausführung festgelegt.

Tab. 4 Klassen für die Struktursensitivität bei Foundationen (gemäss EN 1990)

Klasse der Struktursensitivität für Foundationen	Sensitivität
SSC5	Sehr hoch
SSC4	Hoch
SSC3	Normal
SSC2	Niedrig
SSC1	Unbedeutend

Detailliertere Ausführungen zu all diesen Klassifizierungen werden weder in der SIA 260 [43] noch in der SIA 267 [27] gemacht. Die Schadensfolgeklassen werden in den Stahlbaunormen aufgenommen (SIA 263/1 [35]). Bei ihrer Festlegung sind die Komplexität der Konstruktion sowie die Gefährdung von Benützenden und Umgebung bei einem allfälligen Versagen zu berücksichtigen (Tab. 5).

Auf der Basis der Schadensfolgeklasse und der Beanspruchungskategorie (insbesondere statisch/ dynamisch) werden im Stahlbau Anforderungen an den Stahlbaubetrieb gestellt (Ausführungsklassen EXC1 bis EXC3, Nachweis mittels Herstellerqualifikation).

Tab. 5 Schadensfolgeklassen gemäss SIA 263-1

Klasse	Merkmale	Beispiele
CC3	Hohe Folgen für Menschenleben oder sehr grosse wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Tribünen, Gebäude mit hohen Versagensfolgen (Konzerthallen, Spitäler), Brückenbauten mit hohen Versagensfolgen
CC2	Mittlere Folgen für Menschenleben, beträchtliche wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Gebäude mit mittleren Versagensfolgen (Bürogebäude, Theater, Schulen), Brückenbauten mit mittleren Versagensfolgen (Fuss- und Radwegbrücken)
CC1	Niedrige Folgen für Menschenleben und kleine oder vernachlässigbare wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Landwirtschaftliche Gebäude ohne regelmässigen Personenverkehr (Scheunen, Gewächshäuser), Ein- und Mehrfamilienhäuser

Auch im Zusammenhang mit der Vorbeugung von Schäden durch die Alkali-Aggregat-Reaktion bei Betonbauten werden Umgebungsklassen (UK), Risikoklassen (RK) und Präventionsklassen (PK) definiert (SIA 2042 [45]). Die Risikoklassen umfassen auf Bauwerksebene eine Beurteilung der Sicherheit von Personen, der Kosten des Bauwerks für die Gesellschaft, der Relevanz des Bauwerks für eine Region und auf Bauteilebene die Beurteilung der Sicherheit für Personen, der Relevanz des Tragverhaltens, der Überwachbarkeit und der Möglichkeit einer Instandsetzung oder Erneuerung. Die Umgebungsklassen enthalten eine Gruppe von Expositionsclassen gemäss SN EN 206 [37], da die Verwendung von einzelnen Expositionsclassen im Zusammenhang mit AAR ungeeignet ist. Mit den Präventionsclassen wird schliesslich der Umfang der notwendigen Massnahmen definiert, um die erforderliche Dauerhaftigkeit zu erzielen.

In der Norm SIA 267 wurde die Relevanz des Bauwerks mit der Verwendung der Bauwerksclassen aus der Erdbebenbemessung bei den Korrosionsschutzmassnahmen berücksichtigt. Geotechnische Merkmale oder Anforderungen an die Projektierung sind nicht Bestandteil dieser Klassierung.

4.2.4 Bewertung der Korrosivität des Baugrunds

Im Anhang I.2 sind Angaben zur Baugrunduntersuchung und zur Bewertung der Korrosivität verschiedener Normen zusammengestellt. Nachfolgend werden die Regelungen einzelner Normen detaillierter beschrieben.

SN EN ISO 12944-2:2018

Die SN EN ISO 12944-2, Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme-Teil 2: Einteilung der Umgebungsbedingungen [46] definiert für atmosphärische Korrosion Korrosivitätskategorien auf der Basis von Massen- und Dickenverlusten in Auslagerungsversuchen (Tab. 6).

Tab. 6 Korrosivitätskategorien für atmosphärische Korrosion, Abtragsraten nach einem Jahr nach SN EN ISO 12944-2

Korrosivitätskategorie	Massenverlust [g/m ² /J]	Dickenabnahme [µm/J]
C1 (unbedeutend)	≤ 10	≤ 1.3
C2 (gering)	> 10 bis 200	> 1.3 bis 25
C3 (mässig)	> 200 bis 400	> 25 bis 50
C4 (stark)	> 400 bis 650	> 50 bis 80
C5 (sehr stark)	> 650 bis 1'500	> 80 bis 200
CX (extrem)	> 1'500 bis 5'500	> 200 bis 700

Für Bauteile in Wasser und Böden sind vier Immersionskategorien definiert. Die vier Immersionskategorien sind demgegenüber nur schwammig, mit Beispielen umschrieben (Im1 bis Im4).

Die Aggressivität im Boden ist von der Art und vom Gehalt von Mineralien und von löslichen Salzen, von organischen Bestandteilen, vom Wasser- und Sauerstoffgehalt sowie vom pH-Wert abhängig. Infolge von inhomogenen Bodenverhältnissen bilden sich meist Makroelemente aus, deshalb ist es schwierig Klassen zu definieren.

Im Wasser spielen die Art des Wassers (Süss-, Brack-, Salzwasser), der Sauerstoffgehalt, die Art und Menge gelöster Stoffe sowie die Temperatur eine Rolle. Verstärkt werden Korrosionsangriffe durch mechanische und chemische Beanspruchungen und evtl. vorhandene Ablagerungen. Schliesslich hat die Immersionszone einen Einfluss auf die Korrosivität (Unterwasser-, Wasserwechsel-, Spritzwasserzone).

SIA 179:2019

Die SIA 179, Befestigungen in Beton und Mauerwerk [28] übernimmt die Korrosivitätskategorien für atmosphärische Korrosion der SN EN 12944 und verweist darauf, dass vor allem das Mikroklima entscheidend ist, und nach Möglichkeit die Kontrollierbarkeit gewährleistet werden muss.

SN EN 12501-2:2003

Die SN EN 12501-2, Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe – Korrosionswahrscheinlichkeit in Böden - Teil 2: Niedrig- und unlegierte Eisenwerkstoffe [17] definiert drei Klassen für die Korrosionsbelastung von Böden und verknüpft sie mit der Wahrscheinlichkeit eines Korrosionsabtrags oder einer spezifischen Korrosionserscheinung (lokale Angriffe), Tab. 7.

Tab. 7 Klassifizierung der Korrosionsbelastung gemäss SN EN 12501-2

Korrosionsbelastung	Korrosionswahrscheinlichkeit
Niedrig	Niedrige Wahrscheinlichkeit, dass der Abtrag einen Grenzwert überschreiten oder eine spezifische Korrosionserscheinung auftreten wird.
Mittel	Hohe Wahrscheinlichkeit, dass der Abtrag zwischen dem oberen und unteren Grenzwert liegt.
hoch	Hohe Wahrscheinlichkeit, dass der Abtrag einen Grenzwert überschreiten oder eine spezifische Korrosionserscheinung auftreten wird.

Kriterien, die zu einer hohen Korrosionsbelastung führen sind z.B. die Anwesenheit von Torf, Mooregebiete, anaerobe Böden, Verunreinigungen, die Nähe zu Gleichstrombahnen oder Hochspannungsleitungen, Grundwasserspiegelschwankungen etc. sowie, generell, inhomogene Bodenverhältnisse.

Sind Untersuchungen vor Ort angezeigt, umfassen diese Messungen des Bodenwiderstands und von Spannungsgradienten sowie allenfalls die Entnahme und Analyse von Bodenproben. SN EN 12501-2 macht Angaben zur Beurteilung des spezifischen Bodenwiderstands im Zusammenhang mit dem pH-Wert des Bodens (SN EN 12501-2, Tabelle 2).

SN EN 14490:2010

Im Anhang B (Informativ) der SN EN 14490, Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Bodenvernagelung [38] werden anhand der Kennzahl $\Sigma\Delta$ vier Bodenkategorien definiert (Tab. 8). Die Bewertung basiert auf einer Quelle von 1991 (Clouterre [39]).

Die Kennzahl $\Sigma\Delta$ basiert auf den Kriterien Bodenart, Bodenwiderstand, Feuchtigkeit und pH-Wert. Jedem Kriterium ist eine Gewichtung Δ zuzuordnen und daraus die Summe $\Sigma\Delta$ zu bilden. Wenn keine Informationen zu den Bodeneigenschaften vorhanden sind, ist wie in der SN EN 12501-2, von korrosiven oder hoch korrosiven Verhältnissen auszugehen.

Tab. 8 Klassifizierung von Böden gemäss SN EN 14490

Klassifizierung	Eigenschaften Boden	Kennzahl $\Sigma\Delta$
I	Hoch korrosiv	≥ 13
II	Korrosiv	9 bis 12
III	Durchschnittlich korrosiv	5 bis 8
IV	Leicht korrosiv	≤ 4

Ausser bei hoch korrosiven Verhältnissen sieht die SN EN 14490 primär einen Korrosionsschutz mit Korrosionszuschlag (STA) vor. Um den notwendigen Korrosionszuschlag zu bestimmen, werden Angaben für zu berücksichtigende Dickenverluste gemacht, abhängig von der Nutzungsdauer und von der Relevanz des Bauwerks (Tab. 9). Zur Berücksichtigung der Relevanz des Bauwerks wird die Kennzahl $\Sigma\Delta$ erhöht bei kritischen Bauwerken.

Die zu kompensierenden Dickenverluste sind deutlich grösser als die entsprechenden Angaben im SN EN 1993-5 [47] oder in der DIN 50929 [19].

Tab. 9 Dickenverluste, abhängig von der Klassifizierung des Bodens und von der Relevanz des Bauwerks gemäss SN EN 14490

Gesamtkennzahl $I = \Sigma\Delta + C^*)$	Klassifizierung	Dickenverlust nach Nutzungsdauer [μm]		
		≤ 1.5 Jahre	1.5 bis 30 Jahre	30 bis 100 Jahre
≥ 13	I	Zwingend Kunststoffhüllrohr einzusetzen		
9 bis 12	II	2'000	8'000	Kunststoffhüllrohr
5 bis 8	III	0	4'000	8'000
≤ 4	IV	0	2'000	4'000

*) Kritische Bauwerke: $C = 2$, Normalbauwerke: $C = 0$

DIN 50929, Teil 3

Die Bewertung der Korrosivität von Böden und Wässern erfolgt in der DIN 50929-3 [19] mit Hilfe von Bewertungszahlsummen. Mit den Resultaten von Bodenuntersuchungen werden Bewertungszahlen und -summen bestimmt (Bodenart, Verunreinigungen, spezifischer Bodenwiderstand, Feuchtigkeit, pH-Wert, Pufferkapazität, Sulfid-, Sulfat- und Chloridgehalt sowie Lage in Bezug auf das Grundwasser). Grundsätzlich wurde das Verfahren für die Bewertung aus der SN EN 14490 [38] bzw. der dort verwendeten Quelle aus dem Jahr 1991 übernommen. Es wurde allerdings modifiziert bzw. der Detaillierungsgrad wurde stark erhöht, sowie Messverfahren festgelegt. Eher verwirrend ist, dass die Klassen Ia und Ib gemäss DIN 50929 für eine niedrige Korrosionsbelastung stehen, in der SN EN 14490 umfasst Klasse I die hoch korrosiven Böden.

B_0 bewertet die Wahrscheinlichkeit für flächige Korrosion ohne Bildung von ausgedehnten Elementen. B_0 wird verwendet, um die generelle Korrosionsbelastung des Bodens zu bestimmen und Bodenklassen zu bilden.

Homogene Verhältnisse und flächige Korrosion sind in der Praxis allerdings nur bei kleinen Messproben oder allenfalls bei Objekten mit geringen Abmessungen vorhanden. Normalerweise ist davon auszugehen, dass die Bodenverhältnisse nicht homogen sind und damit Elementbildung möglich ist. Die Wahrscheinlichkeit von Korrosion mit Elementbildung wird mit B_1 beurteilt. Zusätzlich zu den Einflüssen auf B_0 werden die Inhomogenität des Bodenwiderstands und des pH-Werts berücksichtigt. Weiter werden B_A und B_K bestimmt, mit denen zusätzlich die Wirksamkeit der entstehenden Anoden- oder Kathodenbereiche beurteilt werden kann.

B_A wird schliesslich zur Bestimmung von B_E weiterverwendet, um die Verschärfung der Situation bei vorhandenen Fremdkathoden zu beurteilen. In Tab. 10 sind die Bodenklasse und Korrosionsbelastung, abhängig vom B_0 -Wert, sowie die Korrosionswahrscheinlichkeit, abhängig vom B_1 - bzw. B_E -Wert zusammengestellt.

Abgesehen von der Beurteilung der Korrosionswahrscheinlichkeit werden dieselben Bereiche der B-Werte mit mittleren Korrosionsgeschwindigkeiten über 100 Jahre bzw. maximalen Abtragsraten bei Loch- oder Muldenkorrosion verknüpft (Tab. 11). Damit kann der zu erwartende Abtrag grob abgeschätzt werden, wobei zu berücksichtigen ist, dass die Bildung von Deckschichten bei Flächenkorrosion eine Abnahme der Korrosionsgeschwindigkeit mit der Zeit bewirken kann.

Tab. 10 Bodenklasse und Korrosionsbelastung, abhängig vom B₀-Wert, sowie Korrosionswahrscheinlichkeit, abhängig vom B₁- bzw. B_E-Wert gemäss DIN 50929-3

B ₀ bzw. B ₁ bzw. B _E	B ₀ -Wert flächige Korrosion ohne Elementbildung		Korrosionswahrscheinlichkeit B ₁ -Wert (Korrosion mit Elementbildung)		Korrosionswahrscheinlichkeit B _E -Wert (Elementbildung mit Fremdkathoden)	
	Bodenklasse	Korrosions- belastung	Flächen- korrosion	Mulden- und Lochkorrosion	Flächen- korrosion	Mulden- und Lochkorrosio n
≥ 0	Ia	Sehr niedrig	Sehr gering	Sehr gering	Sehr gering	Gering
-1 bis -4	Ib	Niedrig	Sehr gering	Gering	Sehr gering	Mittel
-5 bis -8	II	Mittel	Gering	Mittel	Mittel	Hoch
< -8	III	hoch	mittel	hoch	erhöht	Sehr hoch

Die Beurteilung der Aggressivität von Wässern erfolgt in derselben Weise mit W-Werten.

Tab. 11 Richtwerte für die mittlere Korrosionsgeschwindigkeit bzw. die mittlere Abtragsrate und die maximale Eindringrate bei Mulden- und Lochkorrosion gemäss DIN 50929-3. Aus der mittleren Korrosionsgeschwindigkeit wurde der resultierende Abtrag nach 25 bzw. 100 Jahren berechnet

Bewertungszahl- summen	Mittlere Abtragsrate w (100 J) [µm/J]	Abtrag in 25 J. berechnet [µm]	Abtrag in 100 J. berechnet [µm]	maximale Eindringrate w _{L,max} (30 J) [µm/J]	Bemerkung
B ₀ - und B ₁ -Werte					
≥ 0	5	125	500	30	zeitlich abnehmend
-1 bis -4	10	250	1'000	50	zeitlich abnehmend
-5 bis -8	20	500	2'000	200	zeitlich abnehmend
< -8	60	1'500	6'000	400	zeitlich konstant
B _E -Wert					
≥ 0	10	250	1'000	50	örtlicher Korrosionsangriff überwiegt
-1 bis -4	20	500	2'000	100	
-5 bis -8	50	1'250	5'000	300	
< -8	200	5'000	20'000	1000	

SN EN 1993, Teil 5:2007

In SN EN 1993-5, Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 5: Pfähle und Spundwände [47] werden Abtragsraten bzw. bei der Bemessung zu berücksichtigende Materialverluste infolge gleichmässiger Korrosion angegeben, abhängig von der geforderten Nutzungsdauer (Tab. 12). Dabei wird eine gewisse Verlangsamung der Korrosionsgeschwindigkeit mit der Zeit berücksichtigt (siehe DIN 50929-3). Der Vergleich mit den Angaben in der DIN 50929-3 (Tab. 11) bzw. in der EN 14490 (Tab. 9) für 25 und 100 Jahre zeigt das vorhandene Spektrum auf.

Tab. 12 Zu berücksichtigender Abtrag für gleichmässige Korrosion, abhängig von der erforderlichen Nutzungsdauer gemäss SN EN 1993-5

	Dickenerverlust infolge Korrosion in Böden, mit oder ohne Grundwasser [μm]				
	Geforderte Nutzungsdauer [Jahre]				
	5	25	50	75	100
Ungestörte, natürliche Böden	0	300	600	900	1'200
Verunreinigte, natürliche Böden, industrielle Standorte	150	750	1'500	2'250	3'000
Aggressive, natürliche Böden	200	1'000	1'750	2'500	3'250
*) Unverdichtete, nicht aggressive Auffüllungen	180	700	1'200	1'700	2'200
*) Unverdichtete, aggressive Auffüllungen	500	2'000	3'250	4'500	5'750

*) Bei verdichteten Auffüllungen können die Werte halbiert werden.

SN EN 206:2013+A2:2021

Die SN EN 206, Beton-Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Komformität [37] definiert Prüfverfahren und Grenzwerte für die Expositionsklassen XA1 bis XA3 bei chemischen Angriffen auf Beton durch natürliche Böden und Wasser (Tab. 13). Die Schweiz unterscheidet zwischen Sulfatangriffen (XA1s etc.) und lösenden Angriffen (XA1c etc.).

Die Expositionsklassen betreffend Korrosion infolge Karbonatisierung (XC1 bis XC3) oder durch Chloride induziert (XD1 bis XD3) sowie für Frostangriff (XF1 bis XF4) werden qualitativ umschrieben. Hauptkriterien sind die Feuchtigkeitsverhältnisse und vorhandene Chloride aus Taumitteln. Die Expositionsklassen XS1 bis XS3 sind bei Meereswasserexpositionen heranzuziehen.

Tab. 13 Expositionsklassen XA bei chemischem Angriff von Böden und Wässern gemäss SN EN 206

Chemisches Merkmal	Referenzprüfverfahren	XA1	XA2	XA3
Grundwasser				
SO_4^{2-} [mg/l]	EN 196-2	200 ... 600	600 ... 3000	3000 ... 6000
pH-Wert	ISO 4316	5.5 ... 6.5	4.5 ... 5.5	4.0 ... 4.5
CO_2 [mg/l] angreifend	EN 13577	15 ... 40	40 ... 100	100 bis Sättigung
NH_4^+ [mg/l]	ISO 7150-1	15 ... 30	30 ... 60	60 ... 100
Mg^{2+} [mg/l]	EN ISO 7980	300 ... 1000	1000 ... 3000	3000 bis Sättigung
Böden				
SO_4^{2-} [mg/kg]	EN 196-2	2000 ... 3000	3000 ... 12000	12000 ... 24000
Säuregrad Baumann-Gully [ml/kg]	prEN 16502	> 200	In der Praxis nicht anzutreffen	

4.3 Konstruktive und materialtechnische Vorgaben

Nachfolgend wird versucht, die Bestimmungen verschiedener Normen zu einzelnen Aspekten zu vergleichen. Im Fokus stehen Mikropfähle bis zu einem Durchmesser von 300 mm und ungespannte Anker. Grössere Bohrpfähle und vorgespannte Anker werden nicht betrachtet. Verglichen werden insbesondere die Bestimmungen in den europäischen und in den Schweizer Normen.

Grundsätzlich mögliche Ansätze für den Korrosionsschutz wurden schon in Kapitel 3 diskutiert:

- Einbettung des Stahls in Zementmörtel/-beton oder Korrosionsschutzmassen, evtl. mit der Möglichkeit der Nachverpressung
- Einsatz von Schutzhüllen/Hüllrohren oder Beschichtungen
- Einsatz von nichtrostendem Stahl
- Elektrische Trennung des Stahls von Bodennägeln und Mikropfählen von der Bewehrung der Konstruktion
- Korrosionszuschlag

In der Norm SIA 267 wird bei den Mikropfählen unterschieden zwischen ausschliesslich auf Druck- oder auf Zug- und/oder Querkraft beanspruchten Pfählen. Letztere sind wie ungespannte Anker zu behandeln. Bei den Bodennägeln wiederum werden in der Norm SIA 267 Schutzstufen definiert, wobei die Schutzstufen 2a und 3a einem umfassenden und (beim Einbau) überprüfbareren Korrosionsschutz, vergleichbar mit vorgespannten Ankern entsprechen. Die Überprüfung der Wirksamkeit des Korrosionsschutzes erfolgt mittels elektrischen Widerstandsmessungen.

4.3.1 Konstruktive Aspekte, Hüllrohr

Im Anhang I.3 sind Bestimmungen verschiedener Normen zu konstruktiven Aspekten zusammengestellt. Überall wird verlangt, dass für die Gewährleistung der geforderten Überdeckung Abstandhalter in genügendem Ausmass zur Anwendung kommen. Auch eine elektrische Trennung von der Bewehrung der Konstruktion wird gefordert. In der Schweiz ist im Gegensatz zur europäischen Norm ein Korrosionszuschlag bei ungespannten Ankern nicht erlaubt.

Im Zusammenhang mit dem Einsatz eines Hüllrohrs werden ähnliche Vorgaben gemacht und im Wesentlichen wird auf die Vorgaben der SN EN 1537 [44] (Vorgespannte Anker) verwiesen.

4.3.2 Beton, Mörtel, Verpressmörtel

Im Anhang I.4 sind Bestimmungen verschiedener Normen zu den Anforderungen an Verpressmörtel, Mörtel und Beton zusammengestellt. Die Bestimmungen sind generell eher verwirrend. Auch gibt es keine saubere Abgrenzung zwischen Verpressmörtel/Injektion (Anforderungen wären in der SN EN 447 [48] definiert, der nationale Anhang macht einige präzisierende Angaben zum Injektionsgut für Anker) und Mörtel/Beton (Anforderungen sind in der SN EN 206) bei den Mikropfählen und den Bodennägeln.

Im nationalen Anhang der SN EN 206 definiert die Schweiz je vier Betonsorten für den Hoch- und Tiefbau sowie vier Sorten für Pfähle und Schlitzwände. Jeder Sorte können Expositionsklassen oder Kombinationen zugeordnet werden und für jede Sorte sind grundlegende und zusätzliche Anforderungen festgelegt, z.B. Festigkeitsklasse, maximaler w/z-Wert, Mindestzementgehalt, Richtwerte für den Mehlkorngelalt. Die Zementart muss vom SIA freigegeben sein (aktuelle Liste) und soll aufgrund der Exposition und von zusätzlichen Anforderungen, betreffend F-/T-, Sulfatwiderstand oder AAR-beständigkeit gewählt werden. Die Definition von (häufig eingesetzten) Betonsorten hat zum Ziel, eine möglichst regelmässige Qualität von Werkbeton zu erreichen. Es ist nicht zu empfehlen, eigene Vorgaben für die Zusammensetzung zu machen. Damit übernimmt man die Verantwortung für die resultierenden Eigenschaften.

In den europäischen Normen verweist die EN 1997 auf die EN 1992, die wiederum auf die Betonnorm (SN EN 206) verweist. Die Ausführungsnorm SN EN 14199 verweist etwas umständlich in mehreren Ziffern ebenfalls auf die SN EN 206 und macht eine Vorgabe, betreffend Festigkeitsklasse und das Grösstkorn. In den Schweizer Normen wird, mit mehr oder weniger Umwegen auf die Bemessungs- und die Betonnorm (SIA 262, SN EN 206) und auf die SN EN 447 verwiesen.

4.3.3 Überdeckung

Im Anhang I.5 sind Bestimmungen verschiedener Normen zu den Anforderungen an die Überdeckung zusammengestellt. Bereits diese Zusammenstellung zeigt die breite Vielfalt der Anforderungen an die Überdeckung.

Bei der Betrachtung der detaillierteren Angaben in der SIA 262 [32], der SN EN 14199 [1] und der SN EN 14490 [38], wird die Vielfalt noch grösser (Tab. 14 bis Tab. 16). Trotzdem fehlen praktisch ausnahmslos Hinweise zum Umgang mit den Expositionsklassen XA1 bis XA3, die für Mikropfähle und Bodennägel eigentlich im Vordergrund stehen würden.

Normen SIA 262 (Betonbau) und 267 (Geotechnik)

Zusätzlich zur Tab. 14 gibt es im Zusammenhang mit Mikropfählen weitere Varianten: Gegen Erdreich (≥ 90 mm, +/- 30 mm), bei vorbereitetem Untergrund (≥ 50 mm, +/- 20 mm), verrohrt oder im Fels (≥ 60 mm, +/- 20 mm), nicht verrohrt, im nicht standfesten Boden (75 mm), für permanente Mikropfähle (≥ 40 mm, lückenlos) oder auch «ausreichend».

Im Zusammenhang mit ungespannten Ankern umfasst das Spektrum, unabhängig von der Exposition, nur abhängig von der Schutzstufe 20 oder 40 mm (Abstand Stahl oder Hüllrohr zur Bohrlochwand) bzw. Abstand Stahl zum Hüllrohr 5 mm (im Werk gefertigt) oder 20 mm (auf der Baustelle). In der SIA 118/267 [31] findet sich ein Minimalwert für den Abstand zur Bohrlochwand von 10 mm.

Tab. 14 Überdeckung, c_{nom} [mm] gemäss SIA 262. Die Toleranz beträgt bei $c_{nom} \geq 30$ mm, +/- 10 mm

Bewehrungsüberdeckung c_{nom} [mm] ¹⁾	Expositionsklasse gemäss Tabelle 1							
	2) Bewehrungskorrosion in karbonatisiertem Beton				3) Bewehrungskorrosion induziert durch Chloride			
	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2a	XD2b	XD3
Betonstahl	20	35	40	40	40	55		
Spannstahl bzw. Spannglied	30	45	50	50	50	65		

¹⁾ Die tabellierten Werte der Bewehrungsüberdeckung dürfen bei der Ausführung maximal um die Abweichungen gemäss Ziffer A.3.5 unter- oder überschritten werden.

Normen SN EN 14199 (Mikropfähle) und SN EN 14490 (Bodennägel)

Weitere Angaben gibt es im Zusammenhang mit Mikropfählen (Tab. 15): Nennwert c_{nom} , mit zeitweiliger Verrohrung (50 mm oder mindestens 1.5 x Grösstkorndurchmesser), nach dem Betonieren eingebaut (75 mm), mit permanenter Verrohrung (25 mm, wobei die Mindestüberdeckung auf 10 mm reduziert werden kann).

Tab. 15 Richtwerte zur Mindestüberdeckung [mm] bei Mikropfählen gemäss SN EN 14199, Anhang B

Expositions- klasse ^a	Chemische Aggressivität	Tragglied mit Verpressmörtel- überdeckung		Tragglied mit Mörtel	
		Druck	Zug	Druck	Zug
X0	Mit dauerhafter Verrohrung	10	10	25	25
X0, XC1 – XC4	Nicht vorhanden	20 ^b	20 ^b	35	40
XD1, XD2	Chlorid, ausgenommen Salzwasser	20	20	35	40
XS1	Chlorid aus Salzwasser	20	20	35	40

^a Für andere Expositionsklassen in EN 206 wird die Mindestüberdeckung in EN 1992-1-1:2004, Abschnitt 4 und im gültigen Nationalen Anhang angegeben.

^b Für eine Betriebslebensdauer von maximal 5 Jahren darf die Mindestüberdeckung mit Verpressmörtel auf 10 mm verringert werden.

Einzig im Anhang der SN EN 14490 werden die Anforderungen an die Überdeckung mit der Korrosivität (Aggressivität) des Bodens verknüpft (Tab. 16).

Tab. 16 Leitlinie zur Mindestüberdeckung [mm] bei ungespannten Ankern gemäss SN EN 14490, Anhang B

	Zustand des Bodens	Nutzungsdauer des Bauwerks (Jahre) Einkapselung mit Einpressmittel (mm)				
		5	25	50	75	100
IV	Nicht aggressiv	10	20	25	35	a ₁
III	Leicht aggressiv	20	30	40	50	a ₁
II	aggressiv	30	40	50	75	a ₁
I	Hoch aggressiv	nicht anwendbar	nicht anwendbar	nicht anwendbar	nicht anwendbar	nicht anwendbar

^{a₁ Zur Ermittlung der notwendigen Einkapselung mit Einpressmittel ist eine besondere Betrachtung erforderlich.}

4.3.4 Prüfung des Korrosionsschutzes und Qualitätssicherung

Im Anhang I.6 sind Bestimmungen, betreffend Qualitätssicherung zusammengestellt. Die elektrische Trennung wird nur in der Schweiz mittels elektrischer Widerstandsmessung vor dem Betonieren überprüft. Die Qualitätssicherung betreffend Beton und (Verpress-)Mörtel erfolgt gemäss den entsprechenden Baustoffnormen (SN EN 206, SN EN 447 etc.).

4.3.5 Weitere internationale Dokumente

Das National Highway Institute der Federal Highway Administration in den USA hat drei Publikationen zum Thema Mikropfähle und ungespannte Anker sowie zu bewehrter Erde veröffentlicht. In einem Design Guide für Bodennägel [49] und in einem Design Guide für Mikropfähle [50] wird ein Überblick über die eingesetzten Systeme und die Einbauverfahren gegeben. Die angewendeten Korrosionsschutzmassnahmen sind mit den europäischen Methoden vergleichbar. Der Schwerpunkt liegt jedoch mehr auf Verzinkung und organischen Beschichtungen. Dies sicher auch aufgrund der Tatsache, dass in den USA auch organisch beschichteter Bewehrungsstahl im Stahlbeton eingesetzt wird. In dem Bericht über Bewehrte Erde [51] werden die Korrosionsmechanismen, und die Korrosivität des Bodens beschrieben. Ein weiteres Thema ist die Beständigkeit von Kunststoffen im Erdreich.

4.4 Fazit

Die Zusammenstellung der Bestimmungen in den Normen zeigt, dass es unterschiedliche Konzepte, Doppelspurigkeit und damit auch widersprüchliche Angaben in den anzuwendenden Dokumenten gibt. Ein durchgängiges Konzept der Bestimmungen zur Dauerhaftigkeit ist nicht erkennbar. Die Bestimmungen zum Korrosionsschutz sind auf zahlreiche Normen verteilt, was in der praktischen Anwendung zu Verwirrung, fehlendem Verständnis und selektivem Anwenden der Bestimmungen führt.

Die Bestimmungen zur Klassierung des Bodens werden in der Praxis kaum angewendet. Die Erfahrung der Berichtsverfasser zeigt, dass die Bestimmung der Bodenklasse gemäss DIN 50929-3 zurzeit in der Praxis kaum angewendet wird. Obwohl die Norm viele Aspekte berücksichtigt und konzeptionell eigentlich schlüssige Resultate liefern sollte. Ein Indiz dafür ist auch, dass die entsprechenden Laboranalysen auf dem Markt nicht angeboten werden. Es fehlt ein auf die Komplexität der Fragestellung abgestuftes Verfahren, welches sich mit einem vernünftigen Aufwand praktisch umsetzen lässt. Die Norm SN EN 12501-1 gibt ein solches Konzept vor, die praktische Umsetzung ist jedoch in den Anwendungsnormen nicht bzw. widersprüchlich geregelt.

Die Bestimmungen zu den Anforderungen an die Zementstein- bzw. Betonüberdeckung sind geprägt von einem sehr hohen Detaillierungsgrad an Regelungen. Ein durchgängiges Konzept mit Vorgaben von Sollwerten und Mindestwerten, welches die entsprechenden Toleranzen und Risiken beim Bauverfahren berücksichtigt und auf die Exposition und Nutzungsdauer abgestimmt ist würde die Schnittstelle zwischen Geotechnik (Foundation) und Stahlbeton (Tragwerk) erleichtern. Die alleinige Vorgabe von Mindestwerten ist nicht empfehlenswert, weil dies in der Praxis dazu führt, dass keine Vorhaltemasse berücksichtigt werden und die Mindestwerte systematisch unterschritten werden.

Ein ähnliches Bild zeigt sich auch bei den Bestimmungen zu den Beton- und Mörtel Eigenschaften. Eine Straffung und Vereinheitlichung der Bestimmungen mit einem klaren Fokus auf die Dauerhaftigkeit würden die praktische Umsetzung erleichtern. Insbesondere sind die Prüfverfahren so auszulegen, dass diese in der praktischen Umsetzung auch zu der gewünschten Qualität des Bauwerks führen.

Es besteht ein Harmonisierungsbedarf bei Begriffen und den Anforderungen. Eine Hauptursache für die aktuelle Situation ist, dass die Normen historisch aus verschiedenen Fachrichtungen und Bauverfahren sowie aus verschiedenen nationalen Normen entstanden sind und zudem zahlreiche Überschneidungen zwischen den SIA Normen und den europäischen Ausführungsnormen bestehen.

Grundsätzlich besteht keine realistische Möglichkeit, innert vernünftiger Frist auf europäischer Ebene eine vollständige Koordination und Harmonisierung zu erreichen. Im Rahmen der Ablösung der SIA Normen durch die Einführung des EC der zweiten Generation werden jedoch die Bestimmungen bezüglich Korrosionsschutz aus den SIA Normen verschwinden und dafür die europäischen Ausführungsnormen eine grosse Bedeutung erhalten. In diesem Zusammenhang besteht die Möglichkeit, bei der Erstellung der nationalen Anwendungsdokumente (Nationale Anhänge) die Begriffe zu klären und so weit wie möglich für eine inhaltliche Harmonisierung der Anforderungen zu sorgen. Die ÖNORM B4456 gibt ein Beispiel, wie dies innerhalb des Rahmens der europäischen Normen mit einer nationalen Norm gemacht werden könnte.

5 Beschreibung der Mikropfahl- und Ankersysteme

5.1 Übersicht, Abgrenzung und Begriffe

5.1.1 Pfahlsysteme

Die heute in der Schweiz üblichen Pfahlsysteme für Pfähle mit Durchmessern < 300 mm weisen in der Regel ein zentrisch angeordnetes, durchgehendes Tragglied aus Stahl auf und können anhand der Herstellungs- bzw. Einbringmethoden sowie der Art des Verbunds mit dem Baugrund gemäss *Abb. 12* gegliedert werden.

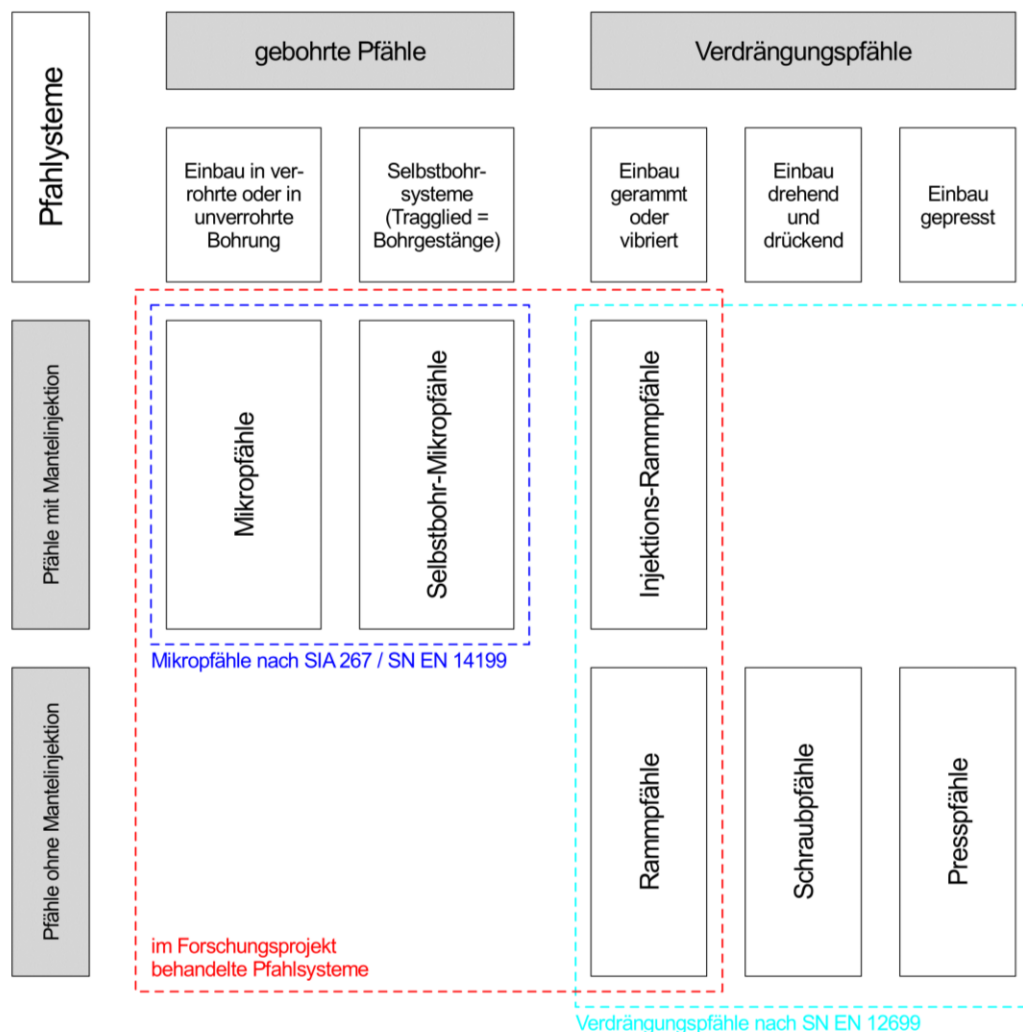


Abb. 12 Übersicht über die gängigen Pfahlsysteme für Pfähle mit kleinem Durchmesser (< 300 mm)

Nach den Begriffen der aktuellen Normen werden nur gebohrte Pfähle mit Durchmessern < 300 mm als Mikropfähle bezeichnet. Da sich bei geramnten Pfählen mit kleinem Durchmesser und einem durchgehendem Stahltragglied bezüglich Korrosionsgefährdung aber vergleichbare Fragen stellen, werden diese in im vorliegenden Forschungsbericht ebenfalls behandelt.

Für die in *Abb. 12* aufgeführten Pfahlsysteme können jeweils unterschiedliche Tragglieder und unterschiedliche Korrosionsschutzmassnahmen in verschiedenen Kombinationen verwendet werden, was zu einer Vielzahl von verschiedenen Pfahltypen führt. Ausführlichere Beschreibungen der im Forschungsbericht behandelten Pfahlsysteme und -typen folgen in den Kapiteln 5.2 bis 5.4.

Der Forschungsbericht beschränkt sich auf Mikropfähle mit Traggliedern aus Stahl (gerippte Stäbe und Hohlstäbe, Rohre und H-Profile). Mikropfähle mit Traggliedern aus anderen Werkstoffen wie zum Beispiel GFK-Stäben werden bisher nur in Spezialfällen eingesetzt und daher nicht behandelt.

Ortsbetonpfähle mit Bewehrungskorb werden im vorliegenden Forschungsbericht nicht behandelt, da diese für Durchmesser von weniger als 300 mm in der Schweiz praktisch nicht mehr ausgeführt werden, weder als Ortsbeton-Bohrpfahl, als Ortsbeton-Rammpfahl noch als Ortsbeton-Verdrängungsbohrpfahl.

Ebenfalls nicht detailliert behandelt werden die folgenden Spezialpfähle, wobei sich gewisse Erkenntnisse bezüglich Dauerhaftigkeit und Korrosionsschutz sinngemäss auf diese übertragen lassen:

- Schraubpfähle kommen meist nur für relativ kleine Lasten zum Einsatz. Sie bestehen in der Regel aus einem konischen Blechrohr mit einer aufgeschweissten Spirale, werden drehend/drückend in den Baugrund eingebracht und weisen keine Mantelinjektion aus Zement auf.
- Presspfähle werden hauptsächlich für Unterfangungen verwendet, insgesamt jedoch nur selten eingesetzt. Es handelt sich dabei um Stahlrohre, die unter einem freigelegten Fundament bzw. Bauwerksteil mit einer hydraulischen Presse Stück für Stück in den Baugrund gepresst werden. Presspfähle weisen keine Mantelinjektion auf.

5.1.2 Ankersysteme

Die heute in der Schweiz üblichen Ankersysteme für ungespannte Anker können anhand der Herstellungs- bzw. Einbringmethode, der Art des Verbunds mit dem Baugrund und der verwendeten Zugglied-Typen gemäss *Abb. 13* gegliedert werden.

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsberichtes werden nur Ankersysteme betrachtet, welche grosse Ähnlichkeit mit Mikropfählen aufweisen. Dabei handelt es sich um diejenigen Ankersysteme, bei welchen der Verbund mit dem Baugrund über eine Zementinjektion erfolgt und über die ganze Länge des Ankers ausgebildet wird (sogenannte Vollverbundanker).

Die folgenden speziellen Ankertypen, bei welchen der Verbund nicht über eine Zementinjektion erfolgt, werden hingegen nicht behandelt:

- Reibrohr-Anker werden im Untertagebau als temporäre Felsanker eingesetzt. Diese bestehen aus einem zu einem U-förmigen Querschnitt gefalteten Blechrohr, welches in die Bohrung eingeführt und anschliessend mit Wasserdruck wieder zur ursprünglichen Rohrform aufgepresst wird. Dadurch schmiegt sich das Blechrohr an die Unebenheiten der Bohrung an, so dass über Formschluss und Reibung ein Verbund mit dem Fels entsteht.
- Keil-Anker werden vor allem im Untertagebau als temporäre Felsanker eingesetzt. Diese bestehen aus einem Stahlstab, welcher am gebirgsseitigen Ende ein Spreizelement aufweist, womit der Anker punktförmig im Fels verkeilt wird.
- Sogenannte Telleranker werden im Lockergestein vor allem für temporäre, teilweise aber auch für permanente Anwendungen eingesetzt. Sie bestehen aus einem Stahlstab, der am erdseitigen Ende ein spezielles, exzentrisch befestigtes Verankerungselement (Teller) aufweist. Beim Einbau des Ankers, der in der Regel durch Rammen erfolgt, liegt das Verankerungselement dem Ankerstab parallel an und verursacht so nur einen geringen Einbringwiderstand. Sobald der Anker am luftseitigen

Ende angezogen wird, stellt sich das Verankerungselement durch seine exzentrische Befestigung am Ankerstab quer und erzeugt so eine punktförmige Verankerung.

Anker mit Zuggliedern aus GFK-Stäben werden praktisch nur dann eingesetzt, wenn die einfache Rückbaubarkeit wichtig ist, beispielsweise für die Ortsbrustverankerung im Untertagebau. Da die Fragestellungen bezüglich Dauerhaftigkeit und Korrosionsschutz ganz anders sind als bei Ankern mit Zuggliedern aus Stahl, werden GFK-Anker im vorliegenden Forschungsbericht nicht behandelt.

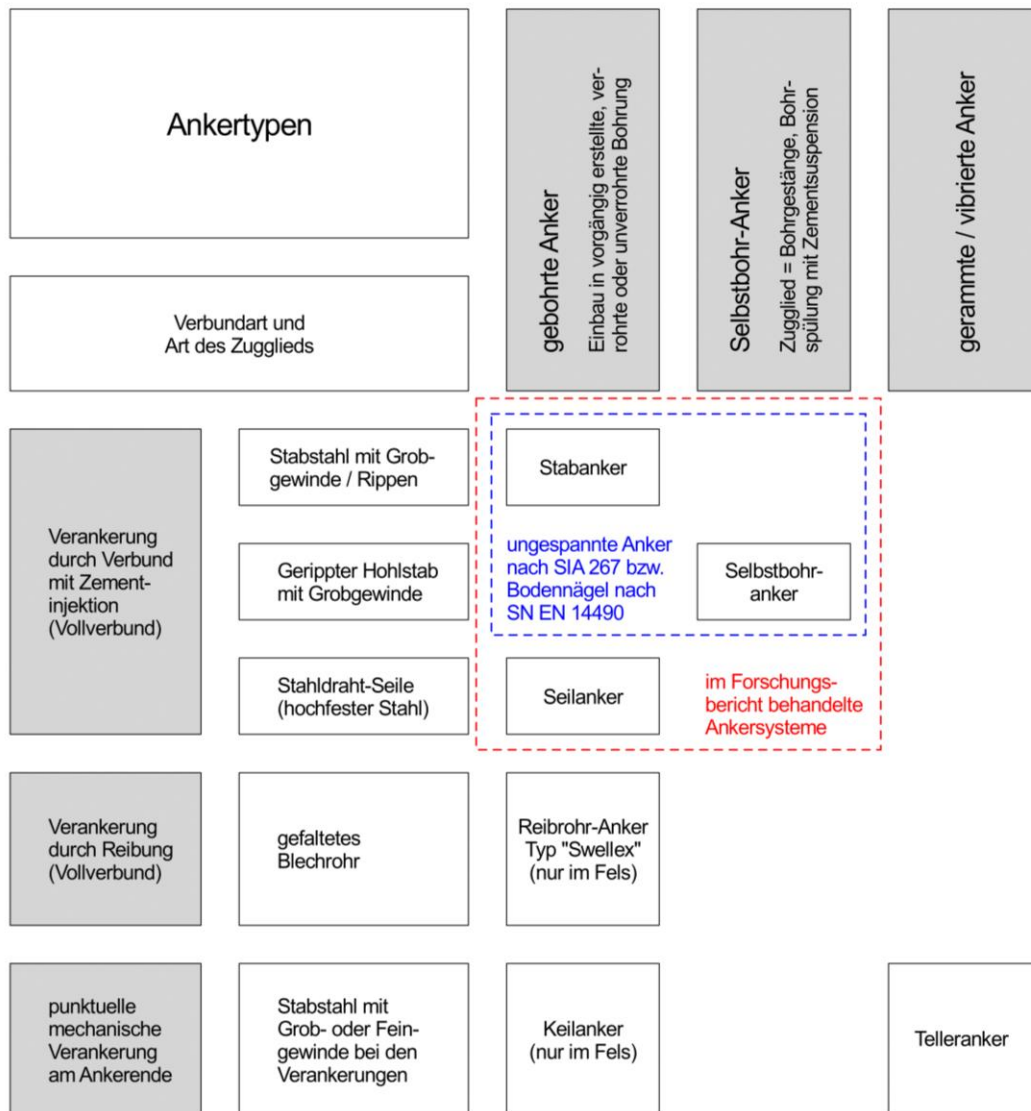


Abb. 13 Übersicht über die gängigen Ankersysteme für ungespannte Anker

Für die in Abb. 13 aufgeführten Ankersysteme können jeweils unterschiedliche Korrosionsschutzmassnahmen verwendet werden, was zu einer Vielzahl von verschiedenen Ankertypen führt. Die Ankersysteme bzw. -typen mit Zuggliedern aus Stabstahl bzw. Hohlstäben sind konstruktiv identisch mit den entsprechenden Mikropfahl-Typen.

Ausführlichere Beschreibungen der im Forschungsbericht behandelten Ankersysteme und -typen folgen in den Kapiteln 5.2 bis 5.4.

Nicht explizit behandelt werden im vorliegenden Forschungsbericht Verankerungen mit sogenannten Totmann-Konstruktionen gemäss Abb. 14. Die Verankerung erfolgt bei Totmann-Konstruktionen nicht über den Verbund zwischen Anker und Baugrund, sondern über erdseitig vom zu sichernden Bauwerk platzierte Ankerplatten oder Ankerwände (sogenannte Totmänner). Je nach Bauvorgang werden die Zugglieder in einem offenen Aushub verlegt oder in Bohrungen eingebaut. Diese Art von Verankerung ist vor allem im Hafен- und Wasserstrassenbau weit verbreitet, wird in der Schweiz aber nur selten angewendet.

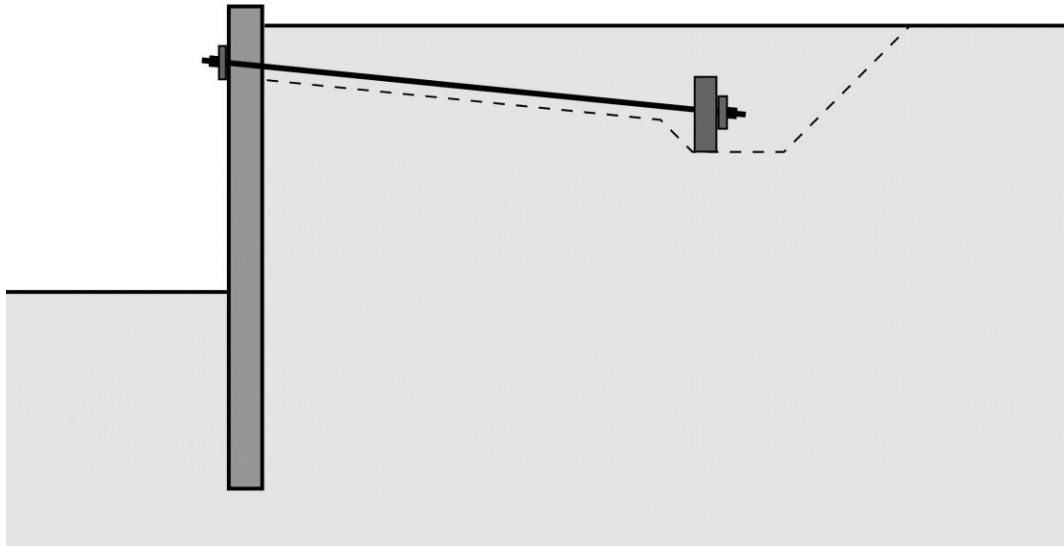


Abb. 14 Beispiel einer Verankerung mit Totmann-Konstruktion (schematisch)

Zwischen Totmann-Ankern und den im vorliegenden Bericht behandelten Vollverbundankern gibt es je nach Detailausbildung teilweise grosse Unterschiede bezüglich der konstruktiven Verhältnisse bzw. des Korrosionsschutzes:

- Zugglied bei Totmannankern teilweise ohne umhüllende Zementinjektion
- Zugglied bei Totmannankern beim Einbau teilweise zugänglich (nicht in Bohrungen versetzt)
- Verankerung am erdseitigen Ende der Totmannanker
- usw.

Die für Vollverbundankern mit Zementinjektionen geltenden Erkenntnisse aus dem vorliegenden Forschungsbericht dürfen deshalb nur sinngemäss und mit entsprechender Vorsicht auf Totmann-Anker übertragen werden.

5.1.3 Gesamtübersicht Anker- und Pfahlsysteme

Die Gesamtübersicht über die im Forschungsprojekt behandelten Pfahl- und Ankersysteme und über die Häufigkeit ihrer Anwendung ist in *Abb. 15* gegliedert nach Einbauart und nach Art des Tragglieds dargestellt.

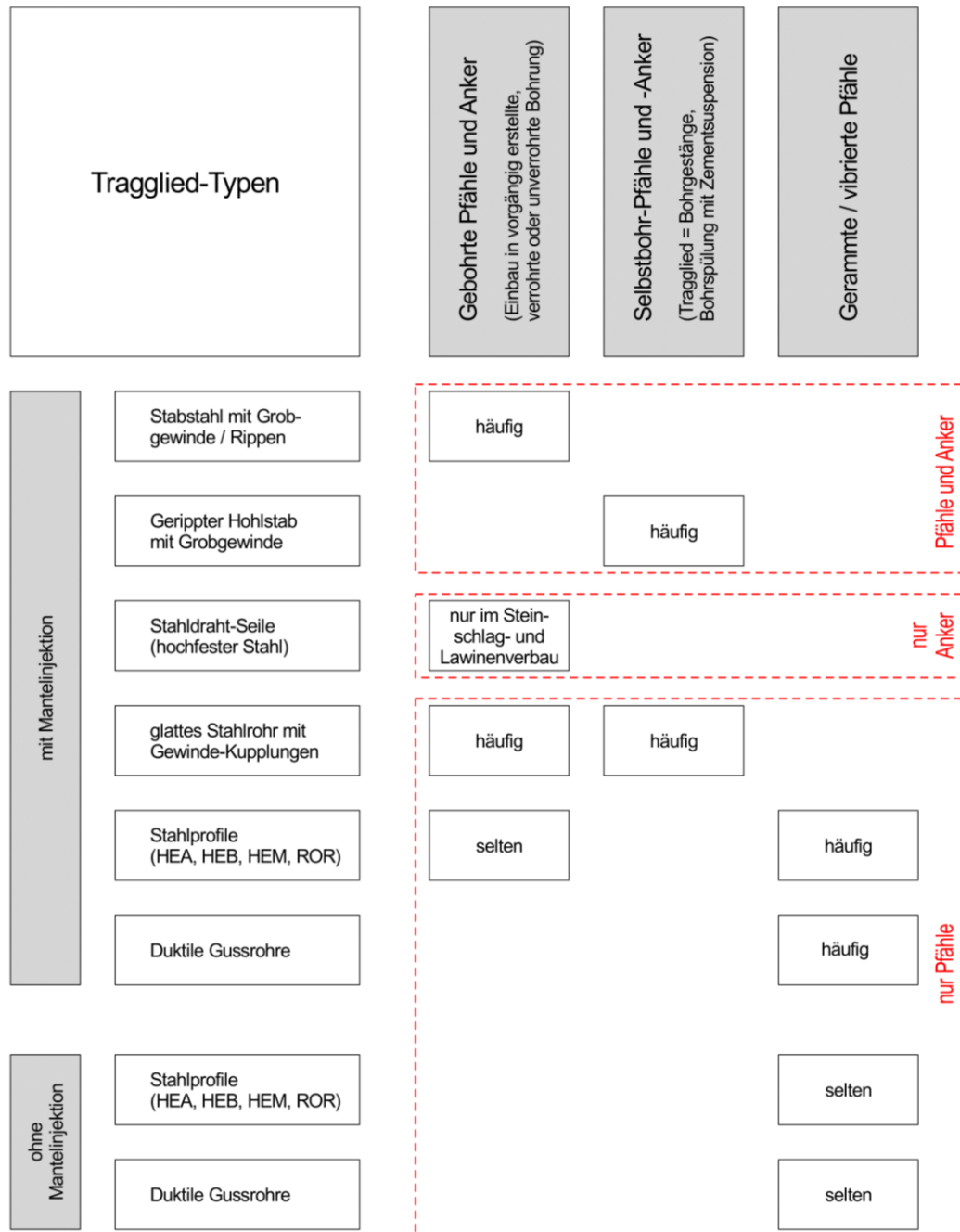


Abb. 15 Gesamtübersicht der betrachteten Pfahl- und Ankersysteme mit qualitativer Angabe der Häufigkeit ihrer Anwendung.

Gebohrte Mikropfähle und Anker mit einem Tragglied aus Stabstahl mit Rippen bzw. Grobgewinde werden häufig verwendet. Ebenfalls häufig verwendet werden Selbstbohr-Mikropfähle und -Anker mit einem Tragglied aus einem Hohlstab mit Grobgewinde. Bei beiden Systemen gibt es zwischen der Verwendung als Mikropfahl oder als ungespannter Anker bezüglich Konstruktion und Ausführung keine Unterschiede.

Tragglieder aus (hochfesten) Stahlseilen können keine Druckkräfte übertragen und werden daher nur für sogenannte Seilanker verwendet. Diese kommen fast ausschliesslich im Steinschlag- und Lawinenverbau zum Einsatz.

Tragglieder aus glattwandigen Rohren, die mit Schraubgewinden gekuppelt werden, kommen praktisch nur für Mikropfähle zum Einsatz, bei welchen die Druckbeanspruchung überwiegt. Bei gleicher Querschnittsfläche des Tragglieds weisen diese nämlich einen grösseren Knickwiderstand auf als Pfähle mit einem stabförmigen Tragglied, benötigen dafür aber auch einen grösseren Bohrdurchmesser. Der Zugwiderstand hingegen ist bei gekuppelten Pfählen wegen den ins Rohr eingeschnittenen Gewinden gegenüber dem Druckwiderstand deutlich reduziert. Zu beachten ist, dass im Bereich der Kupplungen auch ein reduzierter Biege- und Torsionswiderstand vorliegt, was den Knickwiderstand ebenfalls entsprechend reduziert. Dies wird insbesondere bei fehlender seitlicher Bettung der Mikropfähle relevant, z.B. wenn diese bei Unterfangungen nachträglich freigelegt werden.

Gebohrte Mikropfähle mit Stahlprofilen als Tragglied werden oft für sogenannte Mikro-Rühlwände verwendet, sind bei permanenten Anwendungen aber selten. Häufig eingesetzt werden hingegen gerammte Stahlprofile mit einer Mantelinjektion mit Zementmörtel (sogenannte Injektionsrammpfähle) und gerammte duktile Gussrohre, ebenfalls mit einer Mantelinjektion mit Zementmörtel (sogenannte Duktillpfähle). Gerammte Pfähle ohne Mantelinjektion werden in der Schweiz für permanente Anwendungen nur selten eingesetzt.

5.1.4 Begriffe

Die Begriffe für die Bezeichnung von Mikropfählen und von ungespannten Ankern haben sich über die Zeit aus den jeweiligen Anwendungen heraus entwickelt. Aus diesem Grund sind in der Praxis viele Begriffe nicht klar definiert und für gewisse Bauteile werden auch synonyme Begriffe verwendet.

Mikropfähle

In den aktuellen, in der Schweiz gültigen Normen finden sich zum Begriff *Mikropfahl* die folgenden Definitionen:

SIA 267 [27]	Mikropfahl	Kleiner Bohrfahl, Durchmesser bis 300 mm, mit Stab- oder Stahlrohrbewehrung und Pfahlmantelinjektion mit Mörtel oder Zement sowie eventuell Nachinjektionen.
	Bohrpfahl	Pfahl, der ohne Bodenverdrängung in ein vorgängig oder gleichzeitig erstelltes Bohrloch eingebaut wird.
	Pfahl	Schlankes Bauelement zur Übertragung von Kräften (Druck-, Zug- und Schubkräfte) in den Baugrund.
SN EN 14199 [1]	Mikropfahl	Geborhter Pfahl mit einem Durchmesser kleiner als 300 mm.

Sowohl nach SIA 267 wie auch nach SN EN 14199 umfasst der Begriff Mikropfahl nur gebohrte Pfähle, jedoch keine Ramm- bzw. Verdrängungspfähle. Nach SN EN 14199 umfasst der Begriff aber im Gegensatz zur SIA 267 auch Ortsbeton-Bohrpfähle mit Durchmessern < 300 mm und einer aus einem Bewehrungskorb bestehenden Bewehrung.

Ungespannte Anker

In den aktuellen, in der Schweiz gültigen Normen finden sich zum Begriff *ungespannter Anker* die folgenden Definitionen:

SIA 267 [27]	Anker	Bauelement, das über ein Zugglied Kraft in den Baugrund überträgt.
	ungespannter Anker	Anker, der primär Zugkräfte in den Baugrund überträgt. Beim ungespannten Anker wird zur Zeit $t=0$ keine oder nur eine geringe Spannkraft aufgebracht.
SN EN 1997-1 [52]	Anker, nicht vorgespannt	Anker, die aus dem Ankerkopf, einer freien Ankerlänge und einer Rückhaltekonstruktion wie einem Verpresskörper als Krafteintragungslänge, einer Ankerplatte bzw. Ankerwand, einer Schraubverankerung oder einem Klemm- und Haftkörper im Fels bestehen.
SN EN 14490 [38]	Bodennagel	Bewehrung, üblicherweise in einem nach unten geneigten Winkel in den Baugrund eingebaut, die auf ihrer gesamten Länge Reibungswiderstand mit dem Boden erzeugt.

Der Begriff *ungespannter Anker* wird nur in der Schweizer Norm SIA 267 verwendet. In Ziffer 11 dieser Norm wird präzisiert, dass die Bestimmungen für ungespannter Anker nur für Vollverbundanker gelten, also für Anker ohne eine freie Ankerlänge. Im Sprachgebrauch der EN-Normen handelt es sich dabei um *Bodennägel* (bzw. bei Einbau in Fels um *Felsnägel*). In der Praxis sind auch in der Schweiz für ungespannte Anker die Begriffe Bodennagel bzw. Felsnagel weit verbreitet.

Der Begriff *nicht gespannter Anker* wird in der Norm SN EN 1997-1 für Anker verwendet, die zwar konstruktiv wie vorgespannte Anker ausgebildet sind (d.h. mit einer freien Ankerlänge), aber beim Einbau nicht vorgespannt werden. Sowohl diese Ausführungsart wie auch die entsprechende Verwendung des Begriffs nicht gespannter Anker sind in der Schweiz unüblich.

Ramm- bzw. Verdrängungspfähle

In den aktuellen, in der Schweiz gültigen Normen finden sich zum Begriff Ramm- bzw. *Verdrängungspfahl* die folgenden Definitionen:

SIA 267 [27]	Rampfpfahl	Pfahl, der durch Rammen oder Vibrieren unter Verdrängung des Bodens erstellt wird.
SN EN 12699 [53]	Verdrängungspfahl	Pfahl, der im Boden ohne Aushub oder Entfernen von Bodenmaterial hergestellt wird, ausgenommen zur Begrenzung von Hebungen und/oder zur Begrenzung von Erschütterungen sowie zum Entfernen von Hindernissen oder als Einbringhilfe.

Im Gegensatz zu den gebohrten Pfählen gibt es bei den Verdrängungspfählen sowohl in der Norm SIA 267 wie auch in der Norm SN EN 12699 keine speziellen Begriffe und Bestimmungen für Pfähle mit Durchmessern < 300 mm.

Dübel

Im Zusammenhang mit Hang- und Felssicherungen ist für im Baugrund eingebettete stabförmige Tragglieder, welche primär quer zu ihrer Achse beansprucht werden, der Begriff *Dübel* oder auch *Schubdübel* geläufig. In den aktuellen, in der Schweiz gültigen Normen finden sich dazu die folgenden Definitionen:

SIA 267 [27]	Dübel	Stabförmiges Bauelement, das primär Querkräfte übertragen, aber auch Zugkräfte aufnehmen kann.
--------------	-------	--

In der Praxis werden die Dübel konstruktiv gleich ausgebildet wie Mikropfähle und es werden auch die für die Mikropfähle geltenden Normbestimmungen angewendet.

5.1.5 Unterscheidung von Zugpfählen und ungespannten Ankern

Gemäss den vorangehend erläuterten Normbegriffen können schlanke, nicht vorgespannte Zugglieder mit Vollverbund (das heisst ohne freie Länge) sowohl als Zugpfähle wie auch als ungespannte Anker bzw. als Boden- oder Felsnägel bezeichnet werden. Aus der Entwicklung der Bauweisen und deren Hauptanwendungsgebieten heraus wird der Begriff Zugpfahl vor allem im Zusammenhang mit der Foundation oder Auftriebssicherung von Bauwerken verwendet, der Begriff ungespannter Anker oder Nagel vor allem im Zusammenhang mit Baugruben- und Hangsicherungen.

Aus technischer Sicht gibt es allerdings keine objektiven und logisch begründeten Unterscheidungskriterien, nach welchen ein Zugglied entweder als Zugpfahl oder als ungespannter Anker zu bezeichnen ist. Dies ist darum problematisch, weil für Zugpfähle und ungespannte Anker aufgrund der historischen Entwicklung teilweise unterschiedliche Normbestimmungen zur Anwendung kommen, unter anderem bezüglich Bemessung, Prüfung, konstruktiver Ausbildung und Dauerhaftigkeit. Konkret bedeutet das, dass für ein bestimmtes Bauteil unterschiedliche Bestimmungen gelten, je nachdem, ob dieses als Zugpfahl oder als ungespannter Anker bezeichnet wird. Dies ergibt nicht nur aus technischer Sicht keinen Sinn, sondern führt auch zu Missverständnissen und Unsicherheiten bei der Anwendung der Normen.

Der Versuch, die Situation durch eine genauer definierte Abgrenzung zwischen Zugpfählen und ungespannten Ankern zu klären, erscheint wenig zielführend, da es bezüglich Korrosionsgefährdung des einzelnen Zugglieds keine objektiven Unterscheidungskriterien gibt. Vielmehr sollte im Zuge der nächsten Normrevision bzw. der bevorstehenden Einführung der zweiten Generation der Eurocodes eine Harmonisierung der Bestimmungen für Zugpfähle und für ungespannte Anker angestrebt werden (vgl. Kapitel 7.2).

5.2 Anwendung und Verbreitung

5.2.1 Historische Entwicklung

Gebohrte Mikropfähle

Ab Beginn der 1950er Jahre wurden zuerst in Italien Bohrpfähle mit kleinen Durchmessern von 15 bis 30 cm und einem Stahlstab als Bewehrung, sogenannte *Wurzelpfähle* (pali radice) eingesetzt. Zunächst wurden diese fast ausschliesslich für Unterfangungen und Verstärkungen verwendet [54]. Von Italien aus verbreitete sich die Technik allmählich auch in den deutschen Sprachraum, wo der ursprüngliche Begriff Wurzelpfahl relativ bald durch die Begriffe *Mikropfahl* oder *Verpresspfahl* (Deutschland) ersetzt wurde.

In der Schweiz wurden die ersten Mikropfähle ab Beginn der 1970er Jahre eingesetzt. In der Schweizerischen Bauzeitung erscheint ab 1975 verschiedentlich Werbung für Wurzel- und Mikropfähle. An der Herbsttagung der Schweizerischen Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik von 1978 widmen sich erstmals zwei Beiträge den Themen "Le micropieu et ses applications" [55] und "Kleinbohrpfähle" [56]. Im Jahr 1979 wird in der Schweizerischen Bauzeitung unter dem Titel "Pfahlgründung im Innern des Altbaues des Theater-Casinos Zug" [57] der erste ausführliche technische Artikel zum Einsatz von Mikropfählen in der Schweiz publiziert.

In Deutschland erscheint im Jahr 1983 mit der DIN 4128 "Verpresspfähle (Ortbeton- und Verbundpfähle) mit kleinem Durchmesser – Herstellung, Bemessung und zulässige

Belastung" die erste Norm zu diesem Thema. In den Schweizer Normen werden Mikropfähle erstmals in der Empfehlung SIA V192 "Pfähle" von 1996 erwähnt.

Etwa ab den 1990er Jahren wurden sogenannte Selbstbohrpfähle entwickelt und im Markt eingeführt, bei welchen die Pfahltragglieder (Gewinde-Hohlstäbe oder ROR-Profile) mit einer verlorenen Bohrkronen versehen und als Bohrgestänge verwendet werden. Die Bohrspülung erfolgt dabei mit einer Zementsuspension, welche im erhärteten Zustand den Verbund zum Baugrund und den Korrosionsschutz gewährleistet. Da Selbstbohrpfähle sehr wirtschaftlich sind, werden sie heute vor allem für temporäre, aber auch für permanente Anwendungen sehr häufig eingesetzt.

Als Korrosionsschutz wurde bei den Mikropfählen zunächst ausschliesslich die für den Verbund mit dem Baugrund erforderliche Umhüllung mit Zementmörtel verwendet. Etwa ab der Jahrhundertwende wurden zunehmend auch ergänzende Korrosionsschutzsysteme wie Beschichtungen oder die Umhüllung des Tragglieds mit zusätzlichen Kunststoff-Hüllrohren eingesetzt.

Ramm- bzw. Verdrängungspfähle mit kleinen Durchmessern

Historisch gesehen sind gerammte Pfähle aus Stahlträgern ohne Mantelinjektion viel älter als gebohrte Mikropfähle und wurden zum Beispiel in Deutschland bereits bei Hafengebäuden um die letzte Jahrhundertwende eingesetzt [54]. Stahlrammpfähle mit einer Mantelinjektion (in Deutschland als Mantelverpressung bezeichnet) werden in Deutschland seit Mitte der 1950er Jahre ausgeführt und sowohl als Zug- wie auch als Druckpfähle verwendet. Oft wurden diese Pfähle nach dem ursprünglichen Patentinhaber als MV-Pfahl (Verpresspfahl System Müller-Völker) bezeichnet. Die Entwicklung in der Schweiz dürfte etwa parallel zu Deutschland erfolgt sein. Ein erster Artikel zu diesem Pfahlsystem erschien in der schweizerischen Bauzeitung 1961 unter dem Titel "Der MV-Pfahl" [58].

Rammpfähle aus Stahlprofilen mit einer Mantelinjektion werden in der Schweiz heute als Injektionsrammpfähle bezeichnet und vor allem für Fundamente im Wohnungsbau häufig verwendet.

Etwa seit Mitte der 1980er Jahre werden auch Rammpfähle mit Rohren aus duktilem Gusseisen eingesetzt. Ihren Ursprung haben diese sogenannten Duktillpfähle in den für die Wasserversorgung verwendeten Gussrohren. Die Pfähle werden sowohl mit wie auch ohne Mantelinjektion ausgeführt und sind vor allem in Österreich und Süddeutschland weit verbreitet. In der Schweiz ist vor allem die Ausführung mit Mantelinjektion üblich.

Ungespannte Anker

Die Entwicklung von ungespannten Ankern geht auf die Verwendung von Stahlstäben zur Firstsicherung im Bergbau zurück, wie sie beispielsweise im oberschlesischen Kohlerevier bereits zum Beginn des letzten Jahrhunderts eingesetzt wurden [54]. In der Schweiz wurden ungespannte Felsanker im Tunnel- und Stollenbau etwa ab Anfang der 1960er Jahre eingesetzt. Im Jahr 1965 präsentierte J.-C. Ott an der Frühjahrstagung der Schweizerischen Gesellschaft für Bodenmechanik und Foundationstechnik eine Übersicht über die gängigen Ankertypen, in welcher verschiedene ungespannte Felsanker, für Lockergestein hingegen nur vorgespannte Anker aufgeführt wurden [59]. Die ungespannten Felsanker gewannen im Laufe der 1960er Jahre immer mehr an Bedeutung, so dass im Jahr 1966 an der Empa auch erste Versuche zu diesem Ankertyp ausgeführt wurden [60].

Die ungespannten Anker im Lockergestein entwickelten sich erst später aus dem Verfahren der Bodenvernagelung. Dieses wurde in Europa erstmals 1973 für die Sicherung einer Baugrube in Versailles (F) eingesetzt. Anschliessend wurde das Verfahren zunächst vor allem in Deutschland durch die Firma Bauer weiterentwickelt, welcher 1984 vom Deutschen Institut für Bautechnik die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z20.1-101 "Bodenvernagelung System Bauer" erteilt wurde [54]. Weitere wichtige Entwicklungen folgten dann in Frankreich mit den nationalen Forschungsprojekten Clouterre I von 1986 bis 1990 [39] und Clouterre II von 1992 bis 1999 [61].

In der Schweiz dürfte das Verfahren der Bodenvernagelung gegen Ende der 1980er Jahre erstmals angewendet worden sein, zumindest erscheint in der Zeitschrift Schweizer Ingenieur und Architekt ab 1989 verschiedentlich Werbung zu diesem Thema. Weite Verbreitung findet das Verfahren ab Mitte der 1990er Jahre. Im Jahr 1995 erscheint das SIA-Merkblatt 2010 "Ungespannte Boden- und Felsanker" [62] und an der Frühjahrstagung der Schweizerischen Gesellschaft für Boden und Felsmechanik von 1999 widmen sich mehrere Beiträge diesem Thema [63].

In den Anfängen werden ungespannte Anker bzw. Bodennägel vor allem für temporäre Anwendungen eingesetzt. Permanente Anwendungen folgen erst mit der Zeit, wobei der Korrosionsschutz vor allem über die Umhüllung durch die Zementinjektion, teilweise auch über Abrostungszuschläge erfolgt. In der Norm SIA V191/1 "Ungespannte Boden- und Felsanker (Nägel) mit Vollverbund" von 2001 [64] wird dann für gewisse permanente Anwendungen erstmals ein zusätzlicher Korrosionsschutz mit einem Kunststoff-Hüllrohr verlangt.

In den Anfängen beschränkte sich die Anwendung von ungespannten Bodenankern bzw. Bodennägeln auf Bodenvernagelungen bzw. Nagelwände, wo diese in einem relativ dichten quadratischen Raster mit Ankerabständen von ca. 1.5 bis 2.0 m eingesetzt werden. Parallel zur Ausweitung des Anwendungsbereichs auf permanente Anwendungen erfolgte mit der Zeit dann zunehmend eine Ausweitung auch auf Anwendungen, wo ungespannte Anker die Funktion eines Einzelankers übernehmen, wie zum Beispiel bei der Verankerung von Einzelfundamenten, Masten etc.

Parallel zur Entwicklung bei den Mikropfählen wurden ab den 1990er Jahren auch sogenannte Selbstbohranker entwickelt und im Markt eingeführt. Da Selbstbohranker sehr wirtschaftlich sind, werden sie heute häufig eingesetzt, vor allem für temporäre, teilweise aber auch für permanente Anwendungen. Da die Selbstbohranker in der Norm SIA 267 [27] nicht explizit behandelt werden, führt die Anwendung als permanente Anker in der Praxis aber häufig zu Unsicherheiten und Diskussionen.

5.2.2 Datenerhebung bei Unternehmern und Lieferanten

Um die eigenen Erfahrungen und Einschätzungen zu den Anwendungsgebieten und zur Häufigkeit der verschiedenen Pfahl- und Ankertypen sowie zu den verschiedenen Korrosionsschutzsystemen zu validieren, wurde von der Forschungsstelle eine Datenerhebung bei ausgewählten Spezialtiefbau-Unternehmern und bei Lieferanten von Pfahl- und Ankersystemen durchgeführt.

Datenerhebung Spezialtiefbau-Unternehmer

Insgesamt wurden 15 Spezialtiefbau-Unternehmer in allen drei Landesteilen um das Ausfüllen eines Fragebogens gebeten. Leider haben sich trotz mehrmaligem Nachfragen nur 6 Unternehmer an der Datenerhebung beteiligt, davon 5 aus der Deutschschweiz und einer aus der Französischen Schweiz.

Die Umfrage bei den Unternehmern fokussierte primär auf die folgenden Punkte:

- Anwendungsgebiete der verschiedenen Pfahl- und Ankertypen
- Anwendung unterschiedlicher Stahlqualitäten bei den verschiedenen Pfahl- und Ankertypen
- Anwendung unterschiedlicher Korrosionsschutz-Systeme bei den verschiedenen Pfahl- und Ankertypen
- Injektionsmörtel für Mikropfähle und ungespannte Anker
- Qualitätskontrolle Korrosionsschutz
- Probleme im Zusammenhang mit dem Korrosionsschutz und den entsprechenden Anforderungen

Aufgrund des beschränkten Rücklaufs können die Resultate der Datenerhebung bei den Unternehmern nicht als repräsentativ betrachtet werden. Dennoch lassen sich daraus zumindest gewisse qualitative Aussagen und Tendenzen ableiten.

Datenerhebung Lieferanten

Anhand der Kenntnisse der Forschungsstelle, Nachfragen bei ausführenden Unternehmen und einer Internetrecherche wurden 13 potentielle Lieferanten bzw. Hersteller von Anker- und Pfahlssystemen in der Schweiz, in Deutschland, Italien und Frankreich identifiziert. Mit einem Fragebogen wurden diese um die Angabe von Daten zur Art und Menge der in den Jahren 2018 – 2020 in die Schweiz gelieferten Tragglieder für Pfähle und Anker gebeten. Insgesamt 7 Firmen haben die Umfrage vollständig beantwortet. Eine weitere Firma hat einige Angaben zur Art der gelieferten Tragglieder gemacht, jedoch nicht zu den gelieferten Mengen. Von 2 Firmen wurde mitgeteilt, dass sie in diesem Zeitraum nicht in die Schweiz geliefert haben, und von 3 Firmen sind trotz mehrmaligem Nachfragen keine Antworten eingegangen.

Die Umfrage bei den Lieferanten beschränkte sich auf die folgenden, häufig verwendeten Tragglied-Typen:

- Gewindestäbe (für gebohrte Mikropfähle und Anker)
- Gewinde-Hohlstäbe (für Selbstbohr-Mikropfähle bzw. -anker)
- Glatte Stahlrohre mit Schraubgewinde (für gebohrte und für Selbstbohr-Mikropfähle)
- Duktile Gussrohre (für Ramppfähle mit und ohne Mantelinjektion)
- Stahldraht-Seile (für gebohrte Anker)

Auf die Erfassung von Nischenprodukten wie z.B. konische Blechrohre mit aufgeschweisstem Gewinde (für Schraubpfähle) wurde bewusst verzichtet.

Die Art und die Menge, der für Ramppfähle oder für gebohrte Mikropfähle verwendeten Stahlprofile und -rohre kann mit einer Umfrage bei den Lieferanten nicht erfasst werden. Bei diesen Pfahltypen werden die Stahlprofile oder -rohre nämlich meist nicht als fertiges System eingekauft, sondern von den ausführenden Unternehmen selbst mit den erforderlichen Elementen wie Pfahlfussplatte etc. ergänzt. Den Lieferanten ist deshalb oft gar nicht bekannt, dass die Stahlprofile einer bestimmten Lieferung als Mikropfähle verwendet werden.

Aufgrund des beschränkten Rücklaufs können die Resultate der Datenerhebung bei den Lieferanten nicht als vollständig und nur bei gewissen Tragglied-Typen als repräsentativ betrachtet werden. Dennoch lassen sich daraus zumindest gewisse qualitative Aussagen und Tendenzen ableiten.

5.2.3 Anwendungsgebiete und Häufigkeit

Im Rahmen des Forschungsberichts werden für die folgenden vier Anwendungsgebiete für Mikropfähle und ungespannte Anker unterschieden:

- Hochbau (Foundationen)
- Tiefbau (Foundationen und Hangsicherungen)
- Mastfundamente und Lärmschutzwände
- Steinschlag- und Lawinenverbau

Anwendungsgebiete Pfahlssysteme

Das Diagramm in *Abb. 16* zeigt die Rückmeldungen zum Einsatz der unterschiedlichen Pfahlssysteme aus der Datenerhebung bei den Unternehmen.

Die Übersicht zeigt, dass gebohrte Mikropfähle mit Traggliedern aus Gewindestäben und Selbstbohr-Mikropfähle mit Gewinde-Hohlstäben universell in allen Anwendungsgebieten eingesetzt werden. Gebohrte Mikropfähle mit Stahlrohren und Selbstbohr-Mikropfähle mit Stahlrohren werden mit Ausnahme des Steinschlag- und Lawinenverbbaus ebenfalls in allen Anwendungsgebieten eingesetzt.

Gerammte Pfähle werden von deutlich weniger Unternehmen ausgeführt als gebohrte Pfähle. Injektionsrammpfähle werden dabei mit Ausnahme des Steinschlag- und

Lawinenverbau in allen Anwendungsgebieten eingesetzt, gerammte Duktülpfähle hingegen mehrheitlich im Hochbau.

Im Steinschlag- und Lawinenverbau werden wegen den Baugrundverhältnissen keine Rammmpfähle eingesetzt (häufig Fels und/oder Blöcke) und wegen den grösseren Bohrdurchmessern, die sich aufgrund der oft schwierigen Zugänglichkeit ungünstig auswirken, auch keine Mikropfähle mit Traggliedern aus Stahlrohren.

Anzahl Nennungen der Pfahlsysteme pro Anwendungsgebiet

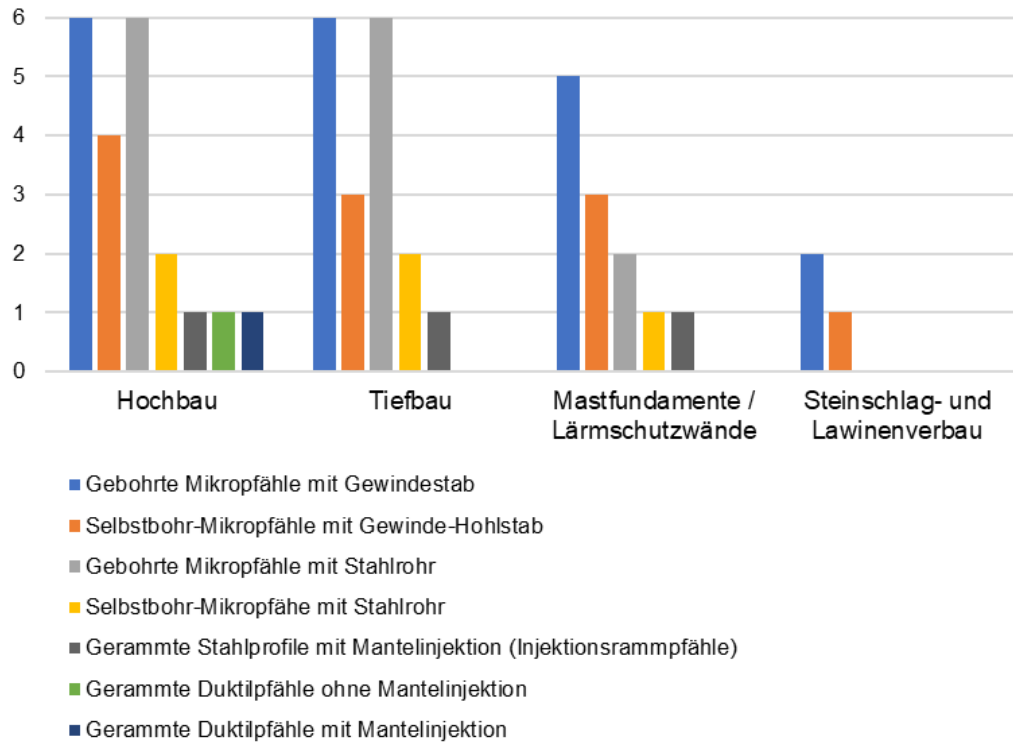


Abb. 16 Typische Anwendungsgebiete der verschiedenen Systeme für permanente Mikropfähle gemäss Datenerhebung bei ausgewählten Unternehmen.

Anwendungsgebiete ungespannte Anker

Das Diagramm in Abb. 17 zeigt die Rückmeldungen zum Einsatz der unterschiedlichen Systeme für ungespannte Anker aus der Datenerhebung bei den Unternehmen.

Bei der Fundation von Mastfundamenten und Lärmschutzwänden kommen praktisch keine reinen Zuganker vor, sondern fast ausschliesslich kombinierte Druck-/Zugpfähle. Für diesen Anwendungsbereich werden von den Unternehmen deshalb keine Ankersysteme angegeben.

In den übrigen Anwendungsgebieten werden Stabanker in verrohrter/unverrohrter Bohrung sowie Selbstbohranker mit Gewinde-Hohlstäben universell eingesetzt. Seilanker werden hauptsächlich im Steinschlag- und Lawinenverbau eingesetzt. Nur vereinzelt werden Seilanker von in diesem Gebiet tätigen und mit dem Ankersystem vertrauten Unternehmen auch im Tiefbau verwendet.

Anzahl Nennungen der Ankersysteme pro Anwendungsgebiet

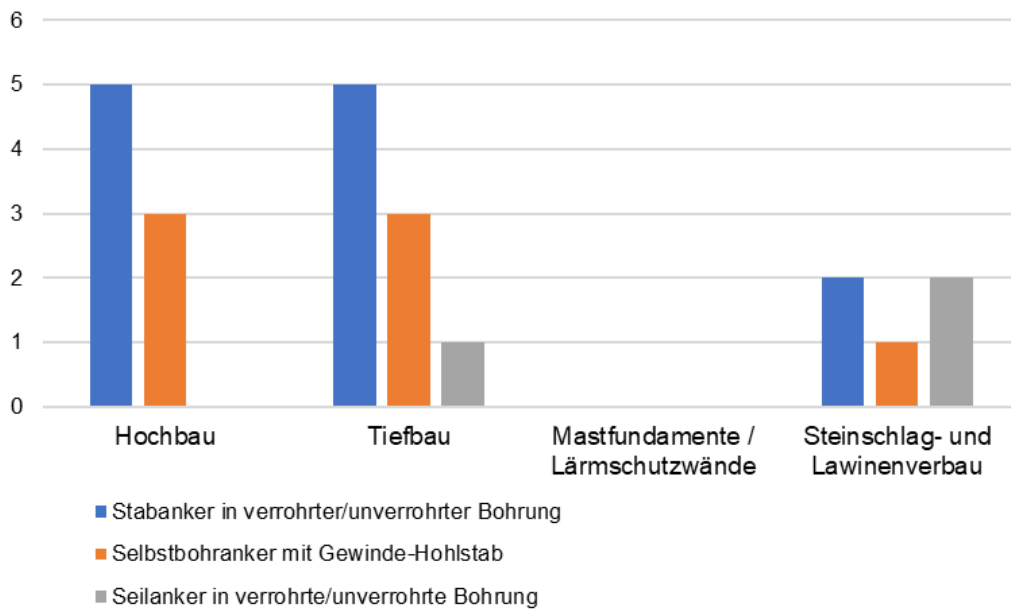


Abb. 17 Typische Anwendungsgebiete der verschiedenen Systeme für permanente ungespannte Anker gemäss Datenerhebung bei ausgewählten Unternehmen.

Tragglieder

Das Diagramm in *Abb. 18* zeigt die Art und Menge der in die Schweiz pro Jahr durchschnittlich gelieferten Tragglieder für Mikropfähle und ungespannte Anker gemäss Rückmeldung der angefragten Lieferanten. Dabei sind die folgenden Einschränkungen und Bemerkungen zu beachten:

- Die angegebenen Mengen sind nur bedingt repräsentativ und grundsätzlich eher zu klein, da nicht alle Lieferanten erfasst wurden bzw. auch nicht alle angefragten Lieferanten ihre Daten zur Verfügung gestellt haben.
- Die Angaben umfassen die Gesamtmenge für Mikropfähle und ungespannte Anker sowohl für temporäre wie auch für permanente Anwendungen, da den Lieferanten in der Regel nicht bekannt ist, wie die Tragglieder effektiv eingesetzt werden.
- Die angegebene Menge der Stahlrohre mit Schraubgewinde ist im Vergleich zu den übrigen Tragglied-Typen sicher deutlich zu tief, da von gewissen für diesen Typ wichtigen Lieferanten keine Daten vorliegen.
- Die Angabe zur Menge der verwendeten Stahlprofile bezieht sich nur auf den Einsatz als Injektionsrammpfahl und stammt nicht von Lieferanten, sondern von einem einzelnen, in diesem Sektor führenden Unternehmer. Im Vergleich zu den übrigen Tragglied-Typen dürfte die angegebene Menge eher zu tief sein.
- Bei den Gewindestäben und Gewinde-Hohlstäben ist davon auszugehen, dass nicht nur die Tragglieder mit speziellen Korrosionsschutzmassnahmen, sondern auch ein gewisser Teil der Tragglieder ohne spezielle Korrosionsschutzmassnahmen für permanente Anwendungen eingesetzt werden.
- Die angegebenen Mengen von Profilstahl, Duktilen Gussrohren und Stahldraht-Seilen dürften grösstenteils für permanente Anwendungen eingesetzt werden.

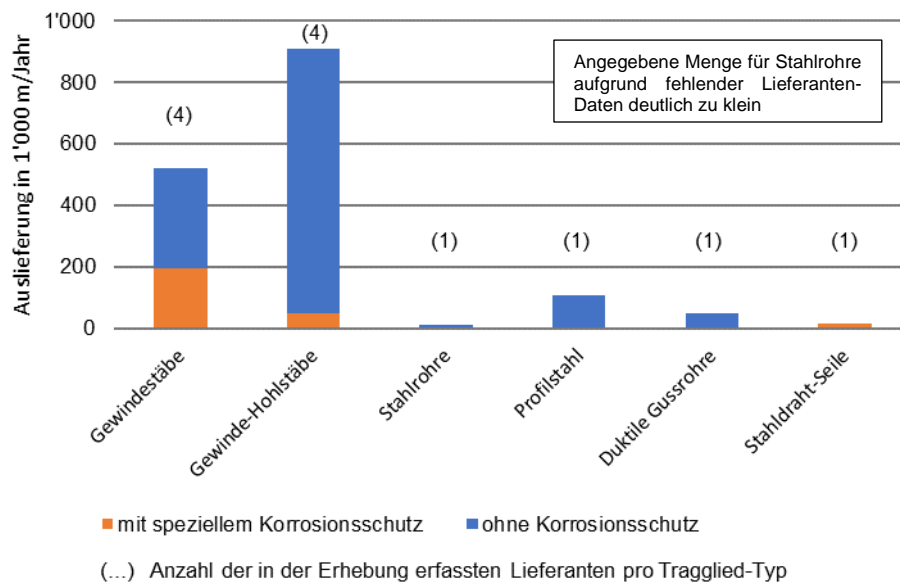


Abb. 18 Durchschnittlich gelieferte Menge von Traggliedern für Mikropfähle und ungespannte Anker, gemäss Datenerhebung bei Lieferanten (Jahre 2018 – 2020).

Trotz den Einschränkungen bezüglich Vollständigkeit und Repräsentativität lassen sich aus den Daten unter zusätzlicher Berücksichtigung der Rückmeldungen aus der Unternehmerbefragung aber die folgenden Erkenntnisse ableiten:

- Bei den Stabpfählen und -ankern überwiegt insgesamt der Einsatz von Selbstbohr-Mikropfählen und -Ankern mit Gewinde-Hohlstäben. Bei den permanenten Anwendungen ist der Anteil der gebohrten Mikropfähle und Anker mit Gewindestäben jedoch deutlich grösser als der Anteil von Selbstbohr-Mikropfählen und -Ankern mit Gewinde-Hohlstäben.
- Die für permanente Anwendungen eingesetzten Rammpfähle (Injektionsrammpfähle mit Stahlprofilen und duktile Gusspfähle) dürften insgesamt ein ähnliches Ausmass erreichen wie die gebohrten Mikropfähle und Anker mit Gewindestäben.
- Bei den Seilankern mit Stahldraht-Seilen handelt es sich gesamthaft gesehen eher um ein Nischenprodukt. Im Bereich des Steinschlag- und Lawinenverbau sind diese jedoch sehr wichtig.

5.3 Beschreibung der Einbauverfahren und Werkstoffe

5.3.1 Einbauverfahren

Im Wesentlichen lassen sich für Pfähle mit kleinem Durchmesser und für ungespannte Anker drei Einbauverfahren unterscheiden.

- gebohrte Mikropfähle und ungespannte Anker
- Selbstbohr-Mikropfähle und -Anker
- gerammte Pfähle

Gebohrte Mikropfähle und ungespannte Anker

Der Bauvorgang für gebohrte Mikropfähle ist in *Abb. 19* schematisch dargestellt und gliedert sich in folgende Schritte:

1. Ausführung der Bohrung (mit oder ohne Verrohrung je nach Standfestigkeit des Baugrunds)
2. Einbau des Tragglieds
3. Primäinjektion (drucklose Verfüllung mit Zementmörtel über bis ans untere Ende der Bohrung geführten Injektionsschlauch)

4. Schrittweiser Rückzug der Verrohrung (falls vorhanden) und Ergänzung der Primärinjektion (drucklos oder mit Druck über eine Kappe auf dem luftseitigen Ende, wie in der Abbildung gezeigt).
5. Allenfalls einfache oder mehrfache Nachinjektionen im Bereich der tragenden Baugrundschiicht bzw. der Verankerungslänge zur Verbesserung der Tragfähigkeit.

Der Bauvorgang für gebohrte Mikropfähle und für gebohrte ungespannte Anker ist identisch. Ungespannte Anker werden jedoch in der Regel mit Neigungen von 5 bis etwa 50° zur Horizontalen ausgeführt, was bezüglich Stabilität des Bohrlochs und Ausführung der Injektionen etwas heikler ist.

Je nach Baugrund- und Grundwasserverhältnissen sowie den sonstigen Randbedingungen kommen für das Erstellen der Bohrung eine Vielzahl von verschiedenen Bohrverfahren in Frage. Auf diese wird hier aber nicht weiter eingegangen.

Wie in *Abb. 19* dargestellt, kann die Verrohrung bei speziellen Verhältnissen im Bereich der nicht tragenden Baugrundschiichten im Baugrund belassen werden. Dies wird aber nur in seltenen Fällen angewendet, beispielsweise bei sehr breiigen Böden, wo zu befürchten ist, dass ansonsten die Überdeckung des Tragglieds mit Zementmörtel nicht gewährleistet werden kann.

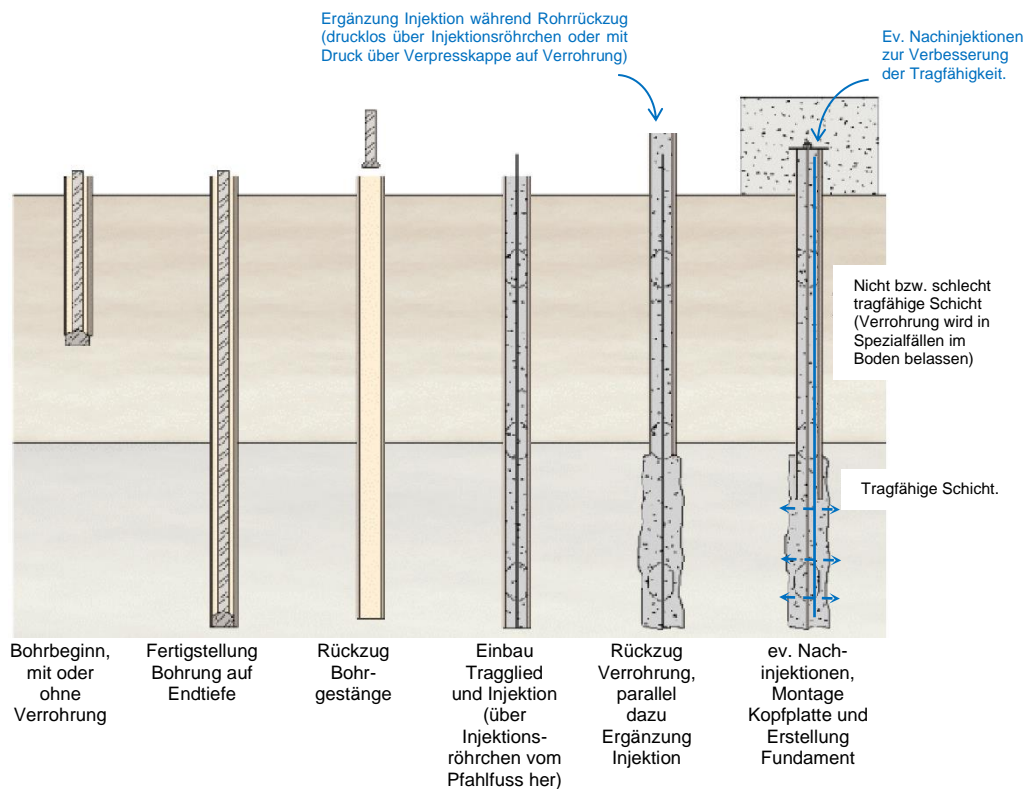


Abb. 19 Bauvorgang für gebohrte Mikropfähle und ungespannte Anker (Bild aus [50]), bearbeitet.

Der beschriebene Bauvorgang ist grundsätzlich unabhängig von der Art des eingebauten Tragglieds, mit Ausnahme des Injektionsvorgangs:

- Bei Traggliedern aus Gewindestäben, Stahlprofilen oder Seilankern erfolgt die Primärinjektion i.d.R. über ein bis ans Ende der Bohrung geführtes Injektionsröhrchen. Für allfällige Nachinjektionen werden am Tragglied weitere Injektionsröhrchen befestigt, die im Bereich der Verankerungslänge mit Manschetten versehen sind.
- Bei Traggliedern aus glattwandigen Rohren erfolgt die Primärinjektion in der Regel durch das Innere des Rohrs über Austrittsöffnungen am Rohrfuss. Allfällige Nachinjektionen erfolgen i.d.R. ebenfalls über das Rohr-Tragglied, in welchem im

Bereich der Verankerungslänge spezielle Ventile eingebaut werden. Damit die Nachinjektionen möglich sind, muss das Innere des Rohrs nach der Primäinjektion und nach den Nachinjektionen jeweils ausgespült werden und bleibt erst nach der letzten Nachinjektion verfüllt.

Je nach Platzverhältnissen und Länge der Pfähle können die Tragglieder bei diesem Einbauverfahren am Stück geliefert und eingebaut oder während dem Einbau aus kürzeren Stücken zusammengesetzt werden. Die Kupplung erfolgt bei Gewindestäben und Rohren über Schraubmuffen, bei Stahlprofilen durch Schweissung.

Zur Gewährleistung der erforderlichen Zementumhüllung werden bei den Gewindestäben und Seilankern üblicherweise Distanzhalter aus Kunststoff (meist PVC-Federkörbe) verwendet. Bei Stahlrohren und Stahlprofilen werden in der Regel Distanzhalter aus Stahl ans Tragglied angeschweisst. Diese Distanzhalter aus Stahl können somit in direktem Kontakt mit dem Boden stehen. Dadurch besteht die Möglichkeit, dass an diesen Korrosion auftritt. Dies stellt in der Regel kein Problem dar, weil die Funktion der Distanzhalter nur während dem Einbau bis zur Erhärtung des Zementmörtels gewährleistet sein muss. Eine Beeinträchtigung des Korrosionsschutzes des Tragglieds ist nicht vorhanden, die korrodierenden Distanzhalter können sogar eine kathodische Schutzwirkung auf das Tragglied haben und somit die Wirkung analog einer galvanischen Anode aufweisen.

Um einen übermässigen Injektionsgutverbrauch zu vermeiden bzw. das unkontrollierte Abfließen des Injektionsguts zu verhindern, kann das Tragglied in sehr durchlässigen Baugrundbereichen bzw. in Baugrundbereichen mit grossen Hohlräumen mit einem Gewebestrumpf versehen werden (sogenannte Sackanker bzw. -Pfähle). Die Injektion erfolgt dann innerhalb dieses Gewebestrumpfs. Beim Einbau in gut durchlässige Baugrundsichten unterhalb des Grundwasserspiegels ist die Ausführung mit Gewebestrumpf teilweise auch zum Schutz des Grundwassers nötig.

Bei auf der Baustelle injizierten Hüllrohren als Korrosionsschutz des Tragglieds werden je nach Art von Hüllrohr und Tragglied sowie je nach Unternehmer für den Einbau und die Injektionen unterschiedliche Abläufe angewendet. Ein vor allem bei Hangsicherungen zur Anwendung gelangender Spezialfall ist dabei die in *Abb. 20* dargestellte Methode, welche häufig als Injektionsverdübelung oder Injektionsverankerung bezeichnet wird. Dabei erfolgt die Injektion über ein geschlitztes Stahlrohr, womit in einem gewissen Masse auch der umgebende Baugrund injiziert und verfestigt werden soll. Das geschlitzte Stahlrohr, welches im Boden verbleibt, stellt für den inneren Gewindestab zwar keine dichte Umhüllung dar, gewährleistet jedoch, dass die Zementumhüllung überall eine bestimmte Mindestabmessung aufweist.

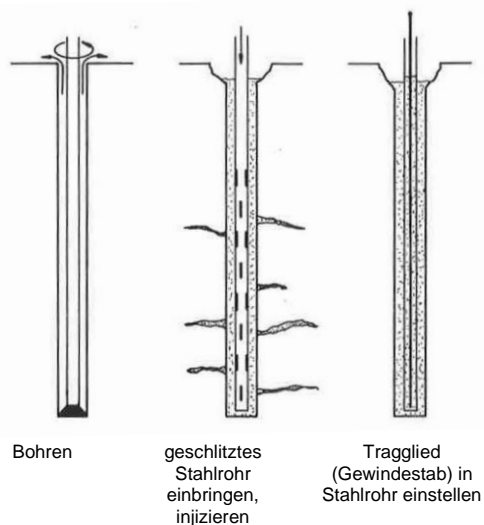


Abb. 20 Bauvorgang Injektionsverdübelung

Selbstbohr-Mikropfähle und Anker

Der Einbau von Selbstbohr-Mikropfählen und -Ankern mit einem Hohlstab als Tragglied erfolgt durch eine Drehschlagbohrung mit einer verlorenen Bohrkronen an der Spitze des Tragglieds *Abb. 21*. Während dem Bohrvorgang wird durch den Hohlstab laufend ein Zementmörtel injiziert. Dieser tritt durch Öffnungen in der Bohrkronen aus und dient während dem Bohrvorgang als Bohrspülung und zur Stützung des Bohrlochs. Im Endzustand gewährleistet die ausgehärtete Zementinjektion den Verbund zwischen Tragglied und Baugrund und dient auch als Korrosionsschutz des Tragglieds.

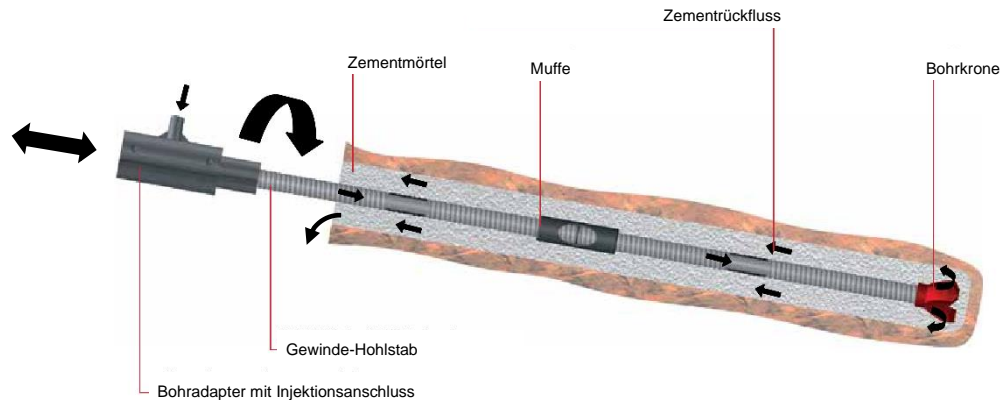


Abb. 21 Bauvorgang Selbstbohrpfähle mit Gewinde-Hohlstab (Bildquelle: Produkt-Dokumentation DYWIDAG GmbH, bearbeitet).

Um Beschädigungen des Tragglieds beim Bohren zu verhindern, müssen Schlagenergie, Anpressdruck und Drehmoment begrenzt werden.

Der Bohrfortschritt und die Injektionsmenge müssen beim Einbau so gesteuert werden, dass das Bohrloch jederzeit mit Injektionsgut gefüllt und dadurch immer gestützt ist (Kontrolle: kontinuierlicher Austritt von Injektionsgut beim Bohransatzpunkt). Nachdem der Anker fertig gebohrt ist, wird so lange weiter injiziert, bis das aus dem Bohrloch austretende Injektionsgut nur noch geringe Mengen an Bodenmaterial enthält.

Im Detail gibt es je nach Unternehmer und Systemlieferant Unterschiede beim Einbau- und Injektionsvorgang. Teilweise wird zum Beispiel jeweils beim Kuppeln der Stäbe versucht, durch sogenanntes Ausfegen der Bohrung (mehrmaligen Rückzug und erneuter Vorschub des Gestänges) die Entfernung des Bohrguts aus der Bohrung zu begünstigen und damit die Ausbildung und Qualität des Injektionskörpers zu verbessern. Oder es wird für die Injektion während dem Bohrvorgang eine dünnflüssigere Zementsuspension eingesetzt, die dann nach Erreichen der Endtiefe durch eine dickflüssigere Mischung ersetzt wird.

Bei Selbstbohrpfählen und -ankern mit Gewinde-Hohlstäben sind keine Nachinjektionen zur Erhöhung der Tragfähigkeit möglich. Allerdings kann beim Bohren der Anker über Bohrkronen mit speziellen Düsen und Injektionsdrücken von 100 – 250 bar ein sogenanntes Mini-Jetting oder Niederdruck-Jetting ausgeführt werden, welches zu einer Vergrößerung des Injektionskörpers und damit ebenfalls zu einer erhöhten Tragfähigkeit führt.

Der Einbau von Selbstbohr-Mikropfählen mit glatten Stahlrohren als Tragglied erfolgt im Prinzip gleich wie bei Hohlstäben. Bei den Stahlrohren können im Gegensatz zu den Hohlstäben aber Nachinjektionen ausgeführt werden. Das Vorgehen für die Nachinjektionen ist dabei gleich wie bei gebohrten Mikropfählen mit Traggliedern aus glatten Stahlrohren.

Beim Selbstbohrverfahren ist die Länge der einzelnen Teilstücke, die eingebaut werden können, durch die Lafettenlänge der Bohrgeräte und die Beanspruchung des Tragglieds beim Bohrvorgang begrenzt. (Standardlänge bei Hohlstäben häufig 3 m). Die erforderliche Kupplung der Gewinde-Hohlstäbe und der Stahlrohre erfolgt über Schraubmuffen.

Zur Gewährleistung der erforderlichen Zementumhüllung werden bei den Selbstbohr-Mikropfählen und -Ankern Distanzhalter aus Stahl verwendet, da Distanzhalter aus Kunststoff beim Bohrvorgang zerstört würden.

Das Anordnen von Gewebstrümpfen zur Vermeidung von übermässigen Injektionsgutverlusten oder aus Gründen des Gewässerschutzes ist bei den Selbstbohrsystemen nicht möglich.

Gerammte Pfähle

Verdrängungspfähle mit kleinem Durchmesser werden in den Boden gerammt oder vibriert. Bei Pfählen mit Mantelinjektion wird am Pfahlfuss ein Rammschuh angeordnet, welcher grösser ist als das Tragglied und so einen Hohlraum zwischen Baugrund und Tragglied erzeugt, welcher während dem Rammvorgang vom Pfahlfuss her kontinuierlich mit Zement verpresst wird (Abb. 22). Bei Rammpfählen aus duktilen Gussrohren erfolgt die Injektion dabei über das Innere des Rohrs, bei Rammpfählen aus Stahlprofilen wird dazu ein separates Injektionsröhrchen ans Stahlprofil angeschweisst.

Die Länge der einzelnen Pfahlsegmente ist durch die Gerätegrösse und die Stabilität der Profile begrenzt. Oft werden standardmässig 5 oder 6 m lange Teilstücke eingesetzt. Die Kupplung erfolgt bei den duktilen Gussrohren über Steckmuffen, bei Stahlprofilen durch Schweiessen.

Der Anwendungsbereich der gerammten Pfahlsysteme ist durch die Rammbarkeit des Baugrunds beschränkt. Bei Rammpfählen mit Mantelinjektion konzentriert sich die gesamte Rammenergie auf den Pfahlfuss (keine Mantelreibung während dem Einbau), so dass mit vergleichsweise geringen Rammenergien gearbeitet werden kann, was sich günstig auf die Erschütterungen in der Umgebung auswirkt.

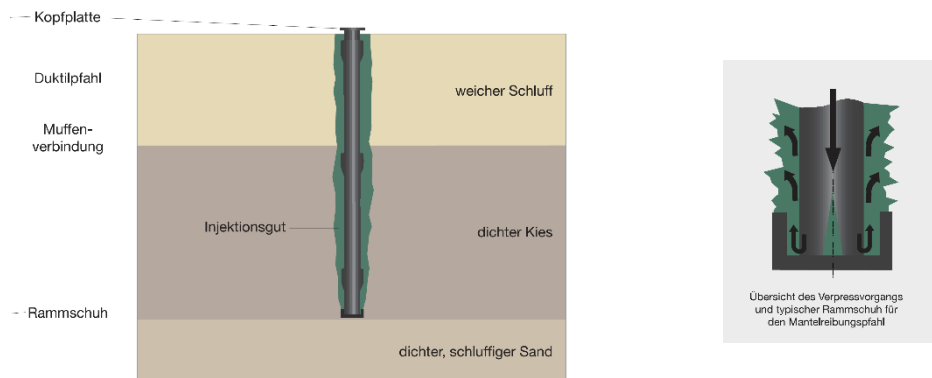


Abb. 22 Rammpfahl mit duktilem Gussrohr mit Mantelinjektion (Bildquelle: Produkt-Dokumentation Bauer GmbH)

Die gewünschte Zementumhüllung wird bei den Rammpfählen mit Zementinjektion durch den Überschneid des Rammschuhs erzeugt. Bei Pfählen aus duktilen Gussrohren ist der Durchmesser des Rammschuhs rund 80 bis 100 mm grösser als der Aussendurchmesser des Pfahlschafts und rund 50 mm grösser als der Aussendurchmesser des Pfahlschafts. Bei Rammpfählen werden keine Distanzhalter angeordnet.

Nachinjektionen zur Verbesserung der Tragfähigkeit sind bei gerammten Pfählen nicht möglich. Ebenso ist das Anordnen von Gewebstrümpfen, z.B. aus Gründen des Gewässerschutzes, nicht möglich.

5.3.2 Tragglieder

Je nach Tragglied-Typ und Hersteller bzw. Systemlieferant kommen für die Tragglieder unterschiedliche Stahlqualitäten zur Anwendung. Oft werden für den gleichen Tragglied-Typ auch Stahlqualitäten mit unterschiedlichen Festigkeiten angeboten.

Gewindestäbe

In der Regel werden Gewindestäbe aus nicht bzw. niedrig legiertem Betonstahl mit warm aufgerolltem Gewinde mit Fließgrenzen f_{sk} von 500/555 oder 670 MPa verwendet. Hochfeste Gewindestähle mit Fließgrenzen über 700 MPa werden zwar von gewissen Herstellern ebenfalls für den Einsatz als Mikropfähle oder ungespannte Anker angeboten, gemäss Unternehmerangaben und Datenauswertung der Lieferanten in der Schweiz aber nur selten eingesetzt. In den letzten Jahren hat sich hingegen der Einsatz von nichtrostenden Stählen zunehmend etabliert.

Tab. 17 Gewindestäbe, Stahlqualitäten und Grössen der Tragglieder

Stahlqualität	Festigkeit f_{sk} / f_{tk} [MPa]	Durchmesser \varnothing_{nom} [mm]	Tragwiderstand $R_{ik} = A_s f_{sk}$ [kN]	Bemerkungen
Betonstahl	500 / 550	16 - 75	100 - 2210	
	555 / 700	57.5 - 63.5	1440 - 1760	
	670 / 800	18 - 75	170 - 2960	
hochfester Stahl ¹⁾	835 / 1035	57 - 75	2150 - 3690	
	900 / 1100	20 - 63.5	280 - 2850	
	950 / 1050	18 - 47	230 - 1650	
nichtrostender Stahl ¹⁾	550 / 700	12 - 40	90 - 620	Werkst.-Nr. 1.4301
	560-650 / 680-750	12 - 40	100 - 630	Werkst.-Nr. 1.4462
	670 / 800	28 - 43	310 - 750	Werkst.-Nr. 1.4003

¹⁾ Duktilitätsanforderungen für Betonstahl der Duktilitätsklasse B (Bruchdehnung) bei gewissen Produkten nicht erfüllt.

Angaben zu den eingesetzten Stahlqualitäten und Grössen der Tragglieder sind in Tab. 17 zusammengestellt. Der Anteil der verschiedenen Stahlqualitäten an der Gesamtmenge (für temporäre und permanente Anwendungen) der in der Schweiz durchschnittlich ausgelieferten Gewindestäbe ist in Abb. 23 dargestellt.

Insbesondere bei den hochfesten Gewindestäben und den Gewindestäben aus nichtrostenden Stählen sind die Duktilitätsanforderungen, wie sie für Betonstahl der Duktilitätsklasse B gelten, teilweise nicht erfüllt.

Die Kupplung der Gewindestäbe erfolgt über Schraubmuffen-Verbindungen, die in der Regel so ausgelegt sind, dass die Verbindungen den gleichen Tragwiderstand aufweisen wie das Tragglied selbst. Je nach Grösse des Tragglieds ist der Aussendurchmesser der Muffen rund 15 bis 50 mm grösser als das Tragglied selbst.

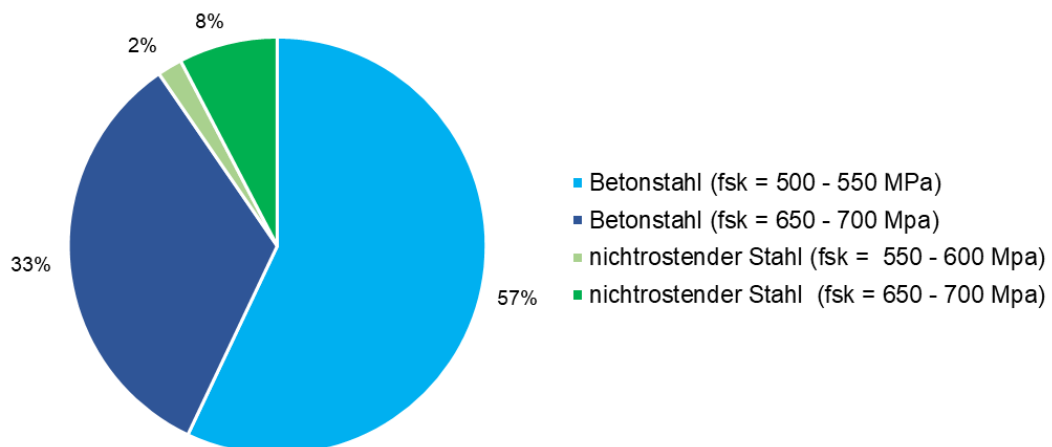


Abb. 23 Stahlqualitäten der durchschnittlich in der Schweiz ausgelieferten Gewindestäbe gemäss Datenerhebung bei Lieferanten (Jahre 2018 – 2020).

Gewinde-Hohlstäbe

Für Selbstbohr-Mikropfähle werden Hohlstäbe mit kalt aufgerollten Gewinden verwendet. Die Festigkeiten können daher bei der gleichen Stahlsorte je nach Durchmesser etwas variieren. Angaben zu den eingesetzten Stahlqualitäten und Grössen der Tragglieder sind in Tab. 18 zusammengestellt. Der Anteil der verschiedenen Stahlqualitäten an der Gesamtmenge (für temporäre und permanente Anwendungen) der in der Schweiz durchschnittlich ausgelieferten Gewindestäbe ist in Abb. 24 dargestellt.

Tab. 18 Gewinde-Hohlstäbe, Stahlqualitäten und Grössen der Tragglieder

Stahlqualität	Festigkeit f_{sk} / f_{tk} [MPa]	Durchmesser $\varnothing_{\text{ausser}} / \varnothing_{\text{innen}}$ [mm]	Tragwiderstand $R_{ik} = A_s f_{sk}$ [kN]	Bemerkungen
«Betonstahl» ¹⁾ und Feinkornstahl	460 / 560-600	32/20 – 114/94	160 - 1250	
	500-600 / 680-750	30/11 – 103/50	250 - 1770	Feinkornstahl 460NH
	500-600 / 800	25/14 – 114/94	150 - 1650	
	630-640 / 790-860	76/51 – 111/75	1200 - 2750	
hochfester Stahl ¹⁾	900 / 1000-1100	32/23 – 114/94	320 - 2700	
nichtrostender Stahl ¹⁾	500-600 / 680-750	30/11 – 40/16	250 - 530	Werkst.-Nr. 1.4462
	650 / 800	32/20 – 51/32	300 - 760	

¹⁾ Duktilitätsanforderungen für Betonstahl der Duktilitätsklasse B (Bruchdehnung) bei gewissen Produkten nicht erfüllt

Der überwiegende Teil der eingesetzten Hohlstäbe weist eine Fließgrenze f_{sk} von 500 bis 600 MPa auf, aber auch hochfeste Stähle mit einer Fließgrenze von 900 MPa werden mit 10% der Gesamtmenge regelmässig eingesetzt. Insbesondere bei den hochfesten Hohlstäben und den Hohlstäben aus nichtrostenden Stählen sind die Duktilitätsanforderungen, wie sie für Betonstahl der Duktilitätsklasse B gelten, teilweise nicht erfüllt.

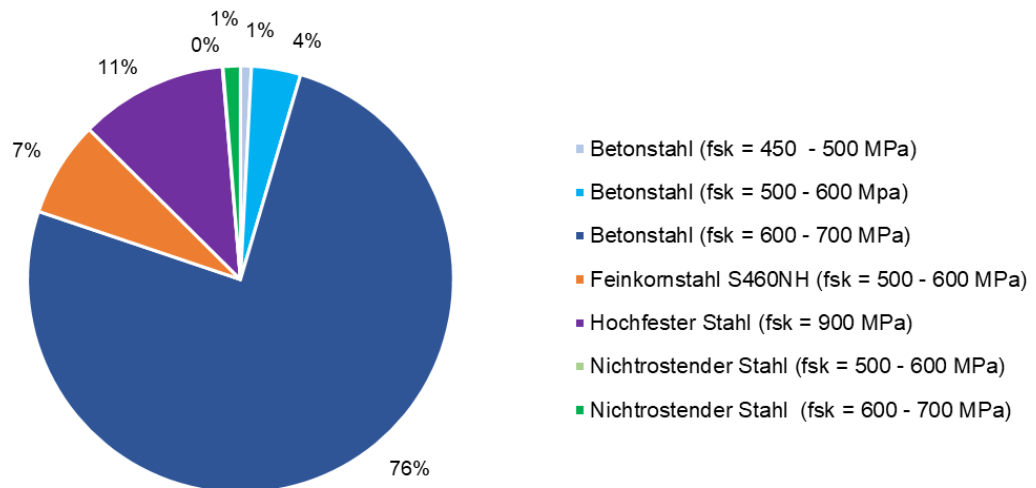


Abb. 24 Stahlqualitäten der durchschnittlich in der Schweiz ausgelieferten Gewinde-Hohlstäbe gemäss Datenerhebung bei Lieferanten (Jahre 2018 – 2020).

Die Kupplung der Gewindestäbe erfolgt über Schraubmuffen-Verbindungen, die in der Regel so ausgelegt sind, dass die Verbindungen den gleichen Tragwiderstand aufweisen wie das Tragglied selbst. Je nach Grösse des Tragglieds ist der Aussendurchmesser der Muffen rund 10 bis 25 mm grösser als das Tragglied selbst.

Glattwandige Stahlrohre

Für Mikropfähle mit glattwandigen Stahlrohren werden entweder Baustahl-Rohre oder Stahlrohre aus der Erdölförderung eingesetzt. Angaben zu den Stahlqualitäten und Grössen der Tragglieder sind in Tab. 19 zusammengestellt. In der Schweiz werden hauptsächlich Rohre der Stahlqualitäten S355 und N80 eingebaut.

Tab. 19 Glattwandige Stahlrohre, Stahlqualitäten und Grössen der Tragglieder

Stahlqualität		Festigkeit f_{sk} / f_{tk} [MPa]	Rohrtyp $\varnothing_{\text{Aussen}} / t$ [mm]	Tragwiderstand $R_{ik} = A_s f_{sk}$ [kN]	Bemerkungen
Baustahl	S235	235 / 350	60/5.0 – 244.5/12.5	200 - 2140	nach EN 10025
	S355	355 / 500	60/5.0 – 244.5/12.5	300 - 3230	
Stahlrohre Ölindustrie ¹⁾	J55 ²⁾	379 / 517	60/5.5 – 73/5.5	360 - 450	nach API 5CT
	K55 ²⁾	379 / 655	60/5.5 – 73/5.5	360 - 450	
	N80	551 / 689	60/5.0 – 244.5/12.5	460 - 5120	

t Wandstärke

¹⁾ Lieferung als Neurohre oder als Occasions-Rohre aus der Erdöl-Förderung

²⁾ in der Schweiz nur selten eingesetzt

Die Stahlrohre werden mit Schraubgewinden gekuppelt. Je nach Art der Kupplung resultiert eine erhebliche Reduktion des Zug- und Biegezugwiderstands (*Abb. 25*). Detaillierte Angaben dazu fehlen in den meisten Produktdokumentationen und müssen fallweise bei den Herstellern erfragt werden.



Bezeichnung	Male/Female Pinbox	Male/Male mit Aussenmuffe	Female/Female mit Innennippel
Reduktion Zugwiderstand	ca. 60%	ca. 30%	ca. 25%

Abb. 25 Schraubverbindung Rohr-Tragglieder

Stahlprofile

Für Injektionsrammpfähle werden typischerweise Profile HEA100 bis HEB180 in S355 eingesetzt, mit Tragwiderständen $R_{ik} = A_s f_{sk}$ zwischen 750 und 2320 kN. Für den Einbau in gebohrte Mikropfähle werden üblicherweise Profile der Typen HEA, HEB und HEM in S235 oder S355 verwendet.

Die Kupplung der Stahlprofile erfolgt falls nötig durch Schweissung auf der Baustelle.

Duktile Gussrohre

Rohre aus duktilem Gusseisen für gerammte Pfähle werden nur von ganz wenigen Herstellern produziert. Angaben zu den Stahlqualitäten und Grössen der Tragglieder sind in Tab. 20 zusammengestellt.

Tab. 20 Duktile Gussrohre, Stahlqualitäten und Grössen der Tragglieder

Stahlqualität	Festigkeit f_{sk} / f_{tk} [MPa]	Rohrtyp $\varnothing_{\text{Aussen}} / t$ [mm]	Tragwiderstand $R_{ik} = A_s f_{sk}$ [kN]	Bemerkungen
Duktiles Gusseisen	300 / 420	118/7.5 – 170/10.6	780 - 1590	
	320 / 450	98/6.0 – 170/13.0	555 - 2050	

Für Pfähle mit Mantelinjektion werden Rammschuhe eingesetzt, welche bezüglich dem Pfahlrohr einen Überschchnitt von rund 40 bis 50 mm erzeugen. Im Bereich der Muffen beträgt der Überschchnitt etwa 25 mm.

5.3.3 Zementmörtel

Der Injektionsmörtel für die Zementumhüllung der Mikropfähle und Anker wird auf der Baustelle gemischt. Je nach Unternehmer und Baustellen-Logistik werden fertige Mörtelmischungen verwendet, die nur noch mit Wasser vermischt werden müssen, oder der Mörtel wird durch den Unternehmer selbst aus Zement, Wasser und Zusatzmitteln hergestellt.

Bei durch das Bundesamt für Umwelt BAFU subventionierten Projekten, insbesondere im Lawinen- und Steinschlagverbau, dürfen nur geprüfte und auf einer Typenliste [65] registrierte Fertigmischungen verwendet werden.

Gemäss den Angaben der befragten Unternehmer werden für die Mörtelmischungen w/z-Werte zwischen 0.4 und 0.7 verwendet. Für die von den Unternehmern selbst gemischten Mörtel wurde traditionell CEM I verwendet, heute wird vermehrt auch CEM II/B-M eingesetzt. Als Zusatzmittel kommen Verflüssiger, Stabilisatoren und Expansionsmittel zum Einsatz.

Das Mischen der Mörtel erfolgt dabei je nach Produkt und Unternehmer oft mit einfachen Durchlaufmischern, teilweise aber auch mit hochtourigen Kolloidalmischern.

Die Normanforderungen an die Zementmörtel für Mikropfähle und ungespannte Anker sind eher unklar und verwirrend (vgl. Kap. 4.3.2). Systematische Mörtelkontrollen zur Prüfung von Normanforderungen oder projektspezifisch definierte Anforderungen werden im Allgemeinen auch bei permanenten Anwendungen nur selten durchgeführt, ausser wo sie von bestimmten öffentlichen Bauherren explizit gefordert werden.

5.4 Beschreibung der Korrosionsschutz-Systeme

5.4.1 Übersicht

Wie im Kapitel 3 des vorliegenden Berichts dargestellt können für die Stahltragglieder von Mikropfählen und ungespannten Ankern neben der Zementumhüllung (GCP) grundsätzlich die folgenden Korrosionsschutz-Systeme und Massnahmen verwendet werden:

- Verzinkung (ZCP)
- Organische Beschichtung (CCP)
- Duplex-Beschichtung (Verzinkung + organische Beschichtung; ZCP+CCP)
- Hüllrohre (Kunststoff oder Stahl; DCP)
- Nichtrostender Stahl (MCP)
- Korrosionszuschlag (STA)

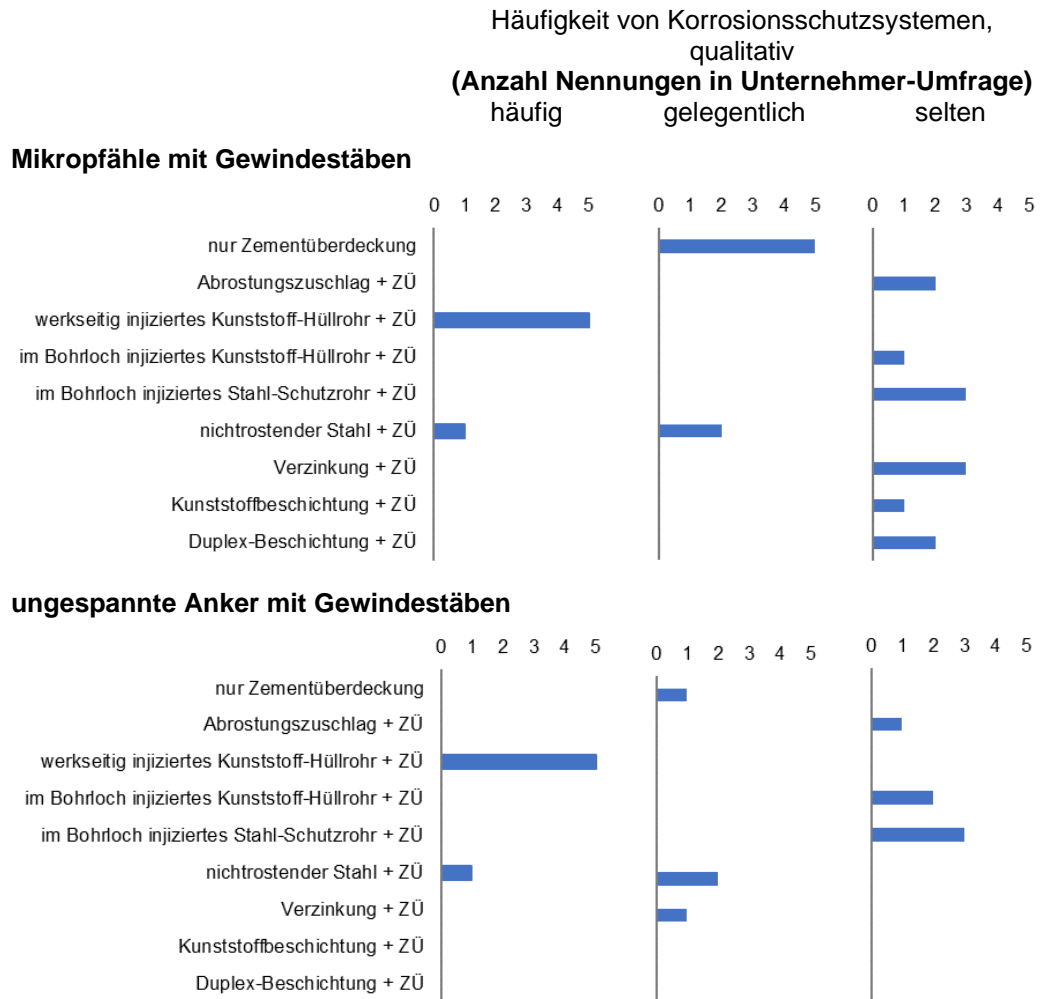
Tab. 21 Übersicht über die Pfahl- und Ankertypen und die entsprechenden Korrosionsschutzsysteme

Pfahl- bzw. Ankertyp	Korrosionsschutz-Systeme									
	Ausschliesslich Zementumhüllung (GCP)	in Kombination mit Zementumhüllung (GCP)								STA ohne GCP
		Verzinkung (ZCP)	Organische Beschichtung (CCP)	Duplex-Beschichtung (ZCP + CCP)	Kunststoff-Hüllrohr, im Werk injiziert (DCP)	Kunststoff-Hüllrohr, am Bau injiziert (DCP)	Stahl-Hüllrohr, am Bau injiziert (DCP)	Nichtrostender Stahl (MCP)	Abrostungs-zuschlag (STA)	
gebohrte Mikropfähle										
Gewindestab	++	++	+	+	++	+	+	++	+	⊗
glattes Stahlrohr	++	o ³⁾	o ³⁾	o ³⁾	o	o	o	o ³⁾	+	⊗
Stahlprofil	++	o ³⁾	o ³⁾	o ³⁾	o	o	o	o ³⁾	+	⊗
Selbstbohr-Mikropfähle										
Gewinde-Hohlstab	++	+	o	++	⊗	⊗	+	++	+	⊗
glattes Stahlrohr	++	o ³⁾	o ³⁾	o ³⁾	⊗	⊗	o	o ³⁾	+	⊗
gebohrte ungespannte Anker										
Gewindestab ¹⁾	++	++	o	o	++	+	+	++	+	⊗
Stahlseil (Seilanker)	o	++	o	+	o	o	+	+	o	⊗
Selbstbohr-Anker										
Gewinde-Hohlstab ¹⁾	++	+	o	++	⊗	⊗	+	++	o	⊗
Gerammte Pfähle mit kleinem Durchmesser										
Stahlprofil	++	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	o ³⁾	++	++ ²⁾
Duktiles Gussrohr	++	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	++	++ ²⁾
++ übliche Anwendung + seltene Anwendung o theoretisch mögliche Kombination, wird aber praktisch nicht angewendet ¹⁾ baugleiche Ausführung wie der entsprechende Mikropfahl ²⁾ Rammpfähle ohne Mantelinjektion für permanente Anwendungen in der Schweiz nur selten eingesetzt, in anderen europäischen Ländern jedoch weit verbreitet ³⁾ soweit bekannt keine entsprechenden Tragglieder am Markt erhältlich										

Die in Tab. 21 aufgeführten Korrosionsschutz-Massnahmen werden ausser bei Rammpfählen ohne Zementinjektion immer in Kombination mit einer Zementumhüllung angewendet. Nicht alle Kombinationen der verschiedenen Pfahl- und Ankersysteme mit den verschiedenen Korrosionsschutzsystemen sind ausführbar und zweckmässig. In der Praxis haben sich deshalb in der Schweiz, die in Tab. 21 dargestellten Kombinationen etabliert.

Die in Tab. 21 zusammengestellten Angaben zur Anwendung der unterschiedlichen Korrosionsschutzsysteme für die verschiedenen Pfahl- und Ankertypen basieren dabei auf den Erfahrungen und Kenntnissen der Forschungsstelle sowie auf der Datenerhebung bei Unternehmern und Lieferanten.

Für gebohrte Mikropfähle und ungespannte Anker mit Gewindestäben sowie für Selbstbohr-Mikropfähle und -anker sind die Angaben zu den verwendeten Korrosionsschutzsystemen aus der Datenerhebung in Abb. 26 und Abb. 27 (Datenerhebung Unternehmer) sowie in Abb. 28 (Datenerhebung Lieferanten) zusammengestellt.



ZÜ = Zementüberdeckung

Abb. 26 Anwendung von Korrosionsschutz-Systemen für Mikropfähle und ungespannte Anker mit Gewindestäben, gemäss Datenerhebung Unternehmer.

Für permanente Anwendungen von gebohrten Mikropfählen und ungespannten Ankern mit Gewindestäben zeigt sich aus den Daten in *Abb. 26* bis *Abb. 27* folgendes:

- Das bei Gewindestäben mit Abstand am häufigsten eingesetzte Korrosionsschutz-System besteht aus werkseitig vorinjizierten Kunststoff-Hüllrohren.
- Ebenfalls eine wichtige Rolle spielen Gewindestäbe aus nichtrostendem Stahl.
- Etwa ähnlich häufig wie Gewindestäbe aus nichtrostendem Stahl werden vermutlich Gewindestäbe eingesetzt, bei welchen als Korrosionsschutz nur die Zementumhüllung vorhanden ist (v.a. für Mikropfähle und bei geringer Korrosionsgefährdung).
- Verzinkung als Korrosionsschutz wird nur etwa halb so oft eingesetzt wie nichtrostender Stahl.
- Im Bohrloch injizierte Hüllrohre, organische Beschichtungen und Duplex-Beschichtungen spielen für Gewindestäbe eine vernachlässigbare Rolle.

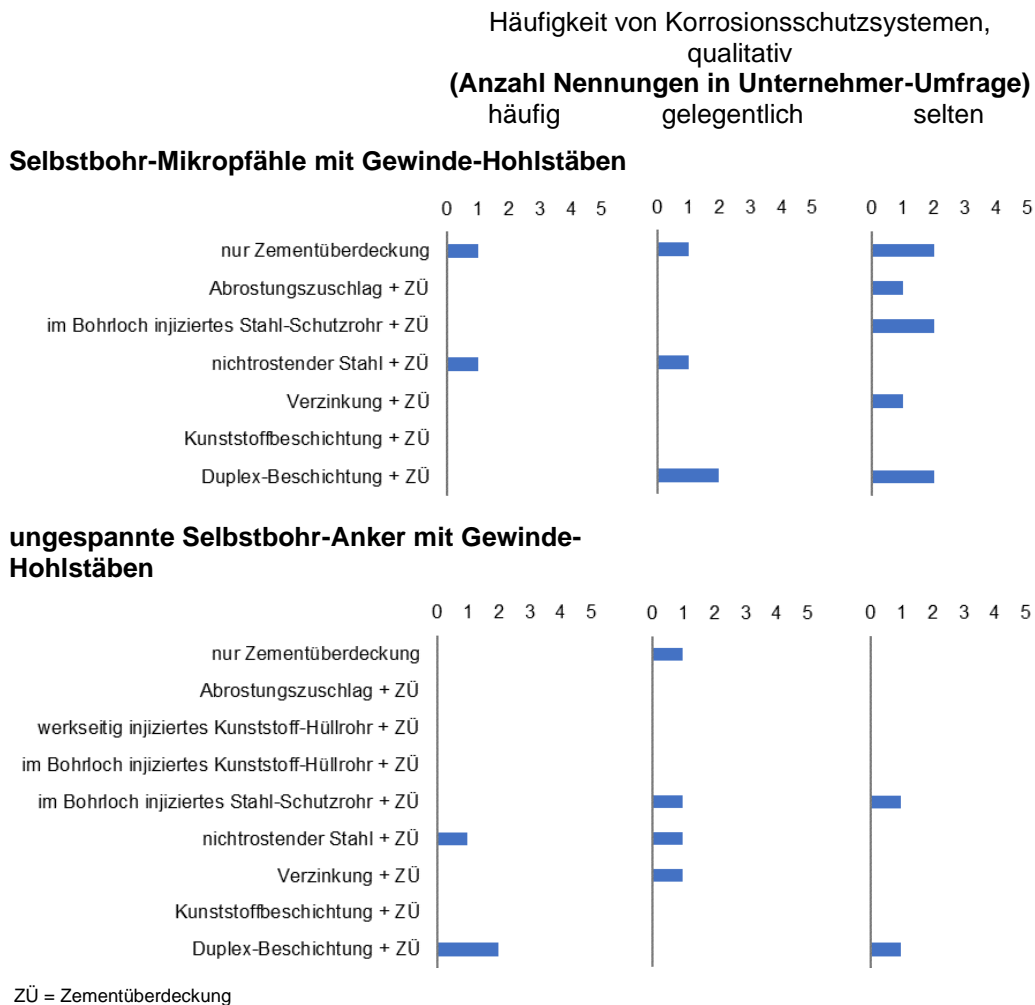


Abb. 27 Anwendung von Korrosionsschutz-Systemen für Selbstbohr-Mikropfähle und -Anker mit Gewinde-Hohlstäben, gemäss Datenerhebung Unternehmer.

Für permanente Anwendungen von Selbstbohr-Mikropfählen und -Ankern mit Gewinde-Hohlstäben zeigt sich aus den Daten in *Abb. 26* bis *Abb. 27* folgendes:

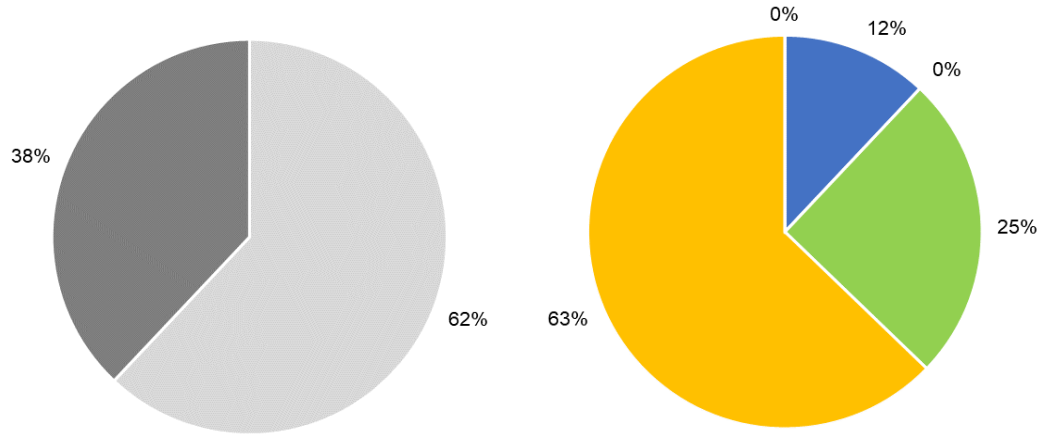
- Das bei Selbstbohr-Mikropfählen und -Ankern mit Gewinde-Hohlstäben am häufigsten eingesetzte Korrosionsschutz-System besteht aus einer Duplex-Beschichtung.
- Ebenfalls eine wichtige Rolle spielen Gewinde-Hohlstäbe aus nichtrostendem Stahl.
- Etwa ähnlich häufig wie Gewindestäbe aus nichtrostendem Stahl werden vermutlich Gewindestäbe eingesetzt, bei welchen als Korrosionsschutz nur die Zementumhüllung vorhanden ist (v.a. für Mikropfähle und bei geringer Korrosionsgefährdung).
- Im Bohrloch injizierte Hüllrohre und Verzinkung spielen für Gewinde-Hohlstäbe eine vernachlässigbare Rolle, organische Beschichtungen werden praktisch nicht eingesetzt.

Bei den folgenden Pfahltypen erfolgt der Korrosionsschutz gemäss Erfahrungen der Forschungsstelle sowie der Angaben aus der Unternehmerumfrage ausschliesslich über die Zementüberdeckung, wobei bei der Bemessung dieser Pfähle teilweise ein Korrosionszuschlag berücksichtigt wird:

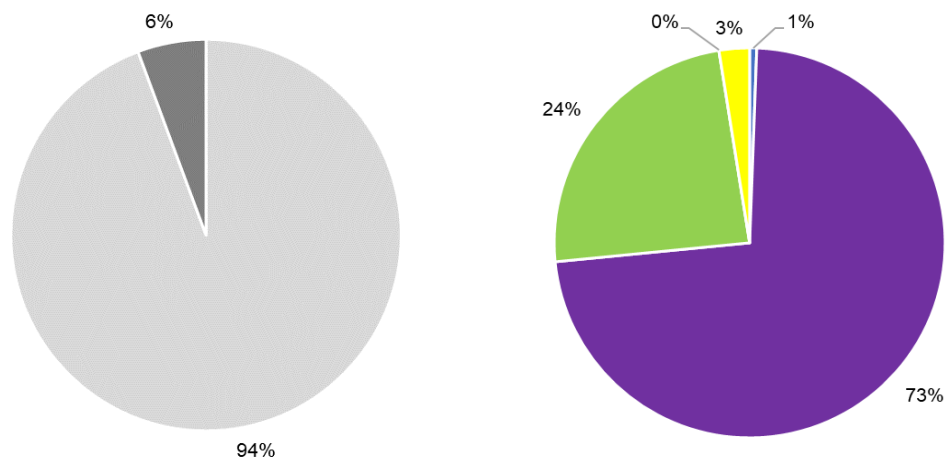
- in verrohrte oder unverrohrte Bohrungen eingebaute glattwandige Stahlrohre oder kleine Profilstahl-Träger
- als Selbstbohrpfähle eingebaute glattwandige Stahlrohre
- Injektionsrammpfähle mit kleinen Profilstahl-Trägern
- Injektionsrammpfähle mit duktilen Gussrohren

Rammpfähle mit kleinen Profilstahlträgern, Stahlrohren sowie duktilen Gussrohren ohne Mantelinjektion aus Zement werden gemäss Erfahrungen der Forschungsstelle sowie der Angaben aus der Unternehmerumfrage nur selten als permanente Mikropfähle verwendet. Wo dies der Fall ist, wird bei der Bemessung oft ein Korrosionszuschlag berücksichtigt.

Gewindestäbe (für gebohrte Mikropfähle und ungespannte Anker)



Gewinde-Hohlstäbe (für Selbstbohr-Mikropfähle und ungespannte Selbstbohr-Anker)



- Stäbe aus unlegiertem/niedriglegiertem Stahl ohne besondere Korrosionsschutzmassnahmen
- Stäbe mit besonderen Korrosionsschutzmassnahmen
- Verzinkung
- Duplex-Beschichtung (Verzinkung + Epoxy)
- nichtrostender Stahl
- Hüllrohr PE/PVC mit Zementinjektion im Werk
- Hüllrohr Stahl, mit Zementinjektion am Bau

a) Gesamtheit der gelieferten Stäbe

b) Gelieferte Stäbe mit besonderen Korrosionsschutzmassnahmen

Abb. 28 Anteile spezieller Korrosionsschutzmassnahmen für Gewindestäbe und Gewinde-Hohlstäbe gemäss Datenerhebung bei Lieferanten.

5.4.2 Zementumhüllung (GCP)

Die Zementumhüllung des Tragglieds gewährleistet bei allen Mikropfahl- und Ankersystemen mit Ausnahme der Rammpfähle ohne Mantelinjektion den Verbund zwischen Tragglied und Baugrund. Gleichzeitig dient sie auch als Korrosionsschutz. Die erforderliche Stärke der Zementumhüllung soll dabei je nach Pfahl- bzw. Ankertyp mit folgenden Massnahmen gewährleistet werden:

- Gebohrte Mikropfähle und Anker: Wahl eines ausreichenden Bohrdurchmessers, Stützung des Bohrlochs mit Verrohrung (im Lockergestein), Abstandhalter aus PVC.

- Selbstbohr-Mikropfähle und Anker: Wahl einer ausreichenden Bohrkronen-Grösse, Stützung des Bohrlochs mit Zementmörtel während dem Bohren, Abstandhalter aus Stahl.
- Rammpfähle mit Mantelinjektion: Wahl eines ausreichend grossen Rammshuhs (Überschnitt), Stützung des Ringspalts beim Rammen durch die laufende Verfüllung mit Zementinjektion.

Die Sollstärke der Zementumhüllung richtet sich nach den jeweiligen Normvorgaben und liegt in der Regel zwischen 20 und 40 mm. Zu beachten ist, dass bei gekoppelten Traggliedern die Sollstärke auch im Bereich der Muffen eingehalten werden sollte.

In der Praxis ignoriert wird der Einfluss von allfälligen, am Tragglied befestigten Injektions- bzw. Nachinjektionsleitungen auf die Zementumhüllung. Ebenso wird in der Schweiz die Frage der Rissbildung in der Zementumhüllung infolge der Beanspruchung der Tragglieder durch Zugkräfte oder Querbiegung kaum diskutiert. Dies im Gegensatz zu Deutschland und Österreich, wo die Rissbildung im Zementmörtel im Rahmen von länderspezifischen Zulassungen bzw. europäischen technischen Bewertungen in Anlehnung an EN 1537 [44] und/oder EN 14490 [38] geprüft wird.

Angaben zu den verwendeten Zementmörteln finden sich in Kapitel 5.3.3

5.4.3 Verzinkung (ZCP)

Die Verzinkung wird praktisch nur für Gewindestäbe und Gewinde-Hohlstäbe sowie für Seilanker eingesetzt. Bei den Stäben orientiert sie sich meist an den Anforderungsklassen nach SIA 2022 für atmosphärische Korrosion. Gemäss Angaben in den Produkt-Dokumentationen typisch ist Feuerverzinkung mit einer Schichtdicke $> 85 \mu\text{m}$, entsprechend der Anforderungsklasse C3.

Bei Mikropfählen und ungespannten Ankern, welche keine einbetonierten Pfahl- bzw. Ankerköpfe aufweisen, werden teilweise nur der vorderste Bereich des Tragglieds sowie die Kopf- bzw. Ankerplatte und die Muttern verzinkt. In Österreich wird eine derartige Verzinkung des luftseitigen Stabendes und der Kopfausbildung gemäss ÖNORM B4456 für permanente Anwendungen generell verlangt.

Für Seilanker mit Stahlseilen aus verzinkten Drähten liegt eine europäische technische Bewertung (ETA) vor. Darin wird die erwartete Nutzungsdauer dieser Anker mit 25 Jahren angegeben.

5.4.4 Organische Beschichtungen und Duplex-Beschichtung (CCP+ZCP)

Organische Beschichtungen allein werden in der Schweiz praktisch nicht eingesetzt und werden daher nicht weiter behandelt.

Duplex-Beschichtungen sind insbesondere für Gewinde-Hohlstäbe von Selbstbohrsystemen ein sehr häufige angewendetes Korrosionsschutz-System. Je nach Hersteller ist die Beschichtung etwas anders aufgebaut, besteht jedoch in der Regel aus einer Feuerverzinkung mit einer anschliessenden Epoxy-Pulverbeschichtung mit einer Schichtstärke von rund 60 bis 80 μm .

Aus Sicht des Korrosionsschutzes wird mit der organischen Beschichtung die elektrochemisch aktive Oberfläche reduziert, indem das Metall vom Medium (Zement, Boden) getrennt wird. Dadurch verringert sich die aktive Oberfläche des galvanischen Elements. Insbesondere, wenn die Verankerung vom Fundament galvanisch getrennt ist, kann dies einen positiven Effekt auf die Dauerhaftigkeit des Systems haben, solange die Trennwirkung der Beschichtung vorhanden ist. In der Regel wird für Epoxidharz-Beschichtungen eine Lebensdauer von 15 bis 40 Jahren angenommen. Inwiefern dies auch unter den Bedingungen im Boden und im Zement der Fall ist, kann aus den bisher gemachten Erfahrungen nicht abgeleitet werden.

Beim Transport, dem Lagern auf der Baustelle und beim Einbau der Selbstbohrsysteme besteht die Gefahr, dass die Beschichtung verletzt wird. Dies hat zur Folge, dass Stellenweise die verzinkte Oberfläche in direktem Kontakt mit der Zementumhüllung ist. Aus Sicht des Korrosionsschutzes sind solche kleinflächigen Verletzungen nicht als schwerwiegend zu betrachten, da dadurch die Reduktion der aktiven Fläche im galvanischen Element nur unwesentlich beeinträchtigt wird.

In der Regel sind die verwendeten Beschichtungssysteme nicht gegen UV-Licht beständig und können durch eine längere Exposition an der Sonne beschädigt werden. Dies gilt es zu beachten, wenn das Material vor dem Einbau längere Zeit an der Sonne gelagert wird oder wenn Bauteile teilweise ausserhalb des Bodens ohne zusätzlichen Schutz verbaut werden.

5.4.5 Kunststoff-Hüllrohre (DCP)

Für Gewindestäbe sind im Werk injizierte Kunststoff-Hüllrohre (oft als sogenannter doppelter Korrosionsschutz bezeichnet) das häufigste Korrosionsschutz-System.

Die Hüllrohre bestehen in der Regel aus einem gerippten bzw. gewellten PE- oder PVC-Rohr mit einer minimalen Wandstärke von 1 mm. Dieses wird am unteren Pfahl- bzw. Ankerende mit einer Verpresskappe aus Kunststoff abgeschlossen, über welche der Ringraum zwischen Gewindestab und Hüllrohr ausinjiziert werden kann. Der Ringraum zwischen Gewindestab und Hüllrohr ist in der Regel mindestens 5 mm breit und wird über Abstandhalter bzw. eine spiralförmig um das Tragglied gewickelte Kunststoff-Schnur mit entsprechenden Abmessungen sichergestellt.

Bei gekoppelten Stäben ist das Hüllrohr im Bereich der Muffen unterbrochen. Nach dem Kuppeln der Stäbe wird der Muffenbereich mit einem Schrumpfschlauch abgedichtet, welcher die Hüllrohre beidseitig überlappt. Je nach Hersteller wird vor dem Aufbringen des Schrumpfschlauches der Muffenbereich noch mit einem Schmelzband umwickelt oder mit einer Korrosionsschutzmasse bestrichen.

Erst auf der Baustelle bzw. im Bohrloch injizierte Hüllrohre aus Kunststoff werden nur selten eingesetzt und deshalb hier nicht weiter behandelt.

5.4.6 Hüllrohre aus Stahl (DCP)

Als Nischenprodukt wird von einem Schweizer Hersteller von Selbstbohr-Systemen ein Selbstbohr-Mikropfahl mit einem Schutzrohr aus Stahl angeboten. Das Schutzrohr aus Stahlblech wird dabei wie das aus einem Gewinde-Hohlstab bestehende Tragglied stückweise eingebaut und jeweils im Bereich der Muffen gekuppelt. Während dem Bohrvorgang tritt die Zementsuspension an der Bohrkronen nur ausserhalb des Hüllrohres aus. Nach Fertigstellung der Bohrung kann dann durch einen speziellen Mechanismus auch der Bereich zwischen Tragglied und Hüllrohr mit Injektionsmörtel ausinjiziert werden.

Andere Systeme mit erst auf der Baustelle bzw. im Bohrloch injizierten Hüllrohren aus Stahl werden nur selten eingesetzt und deshalb hier nicht vertieft behandelt.

5.4.7 Nichtrostender Stahl (MCP)

Der Einsatz von nichtrostenden Stählen hat sich in den letzten Jahren sowohl für Gewindestäbe wie auch für Gewinde-Hohlstäbe (Selbstbohrsysteme) stark verbreitet. Im Vergleich zu den Stäben aus nicht bzw. niedriglegierten Stählen stehen in rostfreiem Stahl jedoch nur eine eingeschränkte Zahl von Durchmesser zur Verfügung (vgl. auch Tabellen im Kapitel 5.3.2).

Die angebotenen nichtrostenden Stäbe weisen gemäss Produkt-Dokumentationen sehr unterschiedliche Korrosions-Widerstandsklassen auf (von I bis IV).

5.4.8 Korrosionszuschlag (STA)

Das Konzept des Korrosionszuschlags ist in der Schweiz zumindest für auf Zug belastete Mikropfähle und für ungespannte Anker nicht etabliert und wird von der Norm SIA 267 sogar explizit ausgeschlossen.

Grund für den Verzicht auf den Korrosionsschutz mit einem Materialzuschlag ist, dass dieses Konzept nur Erfolg hat, wenn die Korrosion flächig auftritt. Die Erfahrung zeigt jedoch, dass in den meisten Fällen die Korrosion auf einzelne Bereiche konzentriert, ist bzw. muldenförmige Angriffe angetroffen werden. Es ist nicht möglich, diese Bereiche in der Projektierungsphase einzugrenzen, um entsprechende Bauteilverstärkungen vorzusehen. Ein weiteres Problem stellt die Korrosion im Bereich von Kupplungen und Gewinden dar. Im Bereich von Spalten sind die Korrosionsbedingungen deutlich verschärft, und es ist in diesen Bereichen eine erhöhter Korrosionsabtrag zu erwarten. Obwohl im Bereich der Kupplungen die Materialstärke im Vergleich zum Tragglied erhöht ist, kann Korrosion im Bereich der Gewinde zu einer Beeinträchtigung der Tragsicherheit führen, selbst wenn der Korrosionsabtrag vergleichsweise gering ist.

In Deutschland, Österreich und Frankreich ist das Konzept des Korrosionszuschlags hingegen zumindest für gewisse Anwendungen etabliert und in entsprechenden Normen oder technischen Zulassungen festgelegt.

5.5 Bewertung des Korrosionsschutzes der Mikropfahlsysteme

Im Folgenden wird versucht, verschiedene Mikropfahl- und Ankersysteme bezüglich ihres Korrosionsschutzes zu bewerten. Dabei beschränkt sich die Bewertung auf die üblichen Systeme (vgl. Kapitel 5.4.1, Tab. 21) sowie auf ausgewählte zusätzliche, aus technischer Sicht besonders interessante Systeme.

Die Bewertung beschränkt sich auf die qualitative Beurteilung der Vor- und Nachteile der verschiedenen Systeme bezüglich Korrosionsschutz. Andere Vor- und Nachteile, wie z.B. eine einfachere Ausführung durch geringere Bohrdurchmesser oder wirtschaftliche Aspekte, werden im Folgenden nicht betrachtet.

Tab. 22 Bewertung Korrosionsschutz für gebohrte Mikropfähle und ungespannte Anker

Pfahl- / Ankersystem	Vorteile	Nachteile
gebohrter Mikropfahl mit Gewindestab ²⁾		
Zementumhüllung (GCP)	<ul style="list-style-type: none"> - bei verrohrter Bohrung: Bohrdurchmesser / Stärke ZU durch Verrohrung gewährleistet - Injektionsgut wird nicht mit Boden vermischt 	<ul style="list-style-type: none"> - Qualität ZU hängt von sorgfältiger Ausführung ab - Systematische Schwachstelle in ZU durch Injektionsröhrchen - bei Nachinjektion: Gefahr von nicht vollständig verfüllten Rissen in ZU - Risse in ZU infolge Zug- oder Querbelastung beeinträchtigen KS
Verzinkung (ZCP) ¹⁾	<ul style="list-style-type: none"> - analog GCP - guter KS für Stabüberstand an der Luft (v.a. für ungespannte Anker). 	<ul style="list-style-type: none"> - analog GCP - Verzinkung im erdberührten dauerfeuchten Bereich langfristig ohne zusätzliche Schutzwirkung
Kunststoffhüllrohr, im Werk vorinjiziert (DCP) ¹⁾	<ul style="list-style-type: none"> - analog GCP - guter KS durch innere ZU mit kontrollierter Stärke/Qualität + diffusionshemmender Hülle - Schwachstellen in äusserer ZU durch Injektionsröhrchen/Nachinjektionen für KS nicht relevant. - Risse in ZU infolge Zug- oder Querbelastung für KS nicht relevant - Integritätskontrolle Hüllrohr mit ERM möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Schwachstelle bei Kupplungen (keine innere ZU im Bereich der Kupplungen, Qualität KS bei Kupplungen abhängig von Ausführungsqualität) - bei unsorgfältiger Arbeit Beschädigung Hüllrohr möglich (Transport, Lagerung, Einbau)
nichtrostender Stahl (MCP)	<ul style="list-style-type: none"> - Wirkung KS prakt. unabhängig von ZU bzw. sorgfältiger Ausführung - Risse in ZU infolge von Zug- oder Querbelastung für KS nicht relevant 	<ul style="list-style-type: none"> - rostfreie Stähle teilweise mit (zu) geringer Duktilität
gebohrter Mikropfahl mit Stahlrohr		
Zementumhüllung (GCP)	<ul style="list-style-type: none"> - analog GCP - bei Injektion/Nachinjektion über Stahlrohr keine Schwachstellen in ZU durch Injektionsröhrchen ³⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> - Qualität ZU hängt von sorgfältiger Ausführung ab - bei Nachinjektion über Stahlrohr: Gefahr von Abplatzung ZU vom Stahlrohr und nicht vollständiger Wiederverfüllung der Risse ³⁾ - Risse in ZU infolge Zug- oder Querbelastung beeinträchtigen KS
gebohrter Mikropfahl mit Stahlprofil		
Zementumhüllung (GCP)	- analog GCP	- analog GCP
Abkürzungen: ZU Zementumhüllung KS Korrosionsschutz ERM elektrische Widerstandsmessung		
¹⁾ zusätzlich GCP		
²⁾ gilt analog für ungespannte Anker		
³⁾ erfolgen Primär- oder Nachinjektion nicht über das Stahlrohr, sondern über separate Injektionsröhrchen, gelten die gleichen Vor- und Nachteile wie beim gebohrten Mikropfahl mit Gewindestab.		

Tab. 23 Bewertung Korrosionsschutz für Selbstbohr-Mikropfähle und -Anker.

Pfahl- / Ankersystem	Vorteile	Nachteile
Selbstbohr-Mikropfahl mit Gewinde-Hohlstab ²⁾		
Zementumhüllung (GCP)	<ul style="list-style-type: none"> - keine Schwächung von ZU durch Injektionsröhrchen - keine Nachinjektion, daher keine Gefahr von aufgesprengten und nicht mehr voll verfüllten Rissen 	<ul style="list-style-type: none"> - Qualität ZU hängt von Bodenart, gewähltem Bohrkronendurchmesser und Injektionsvorgang ab - Qualität ZU hängt stark von sorgfältiger Ausführung ab: kein zu schnelles Bohren (Abdriften der Bohrung), kontinuierliche Injektion während dem Bohren (Bohrlochstützung), genügend langes Injizieren nach dem Bohren (Ausspülen Bodenmaterial) - Risse in ZU infolge Zug- oder Querbelastung beeinträchtigen KS
Duplex-Beschichtung (CCP+ZCP) ¹⁾	<ul style="list-style-type: none"> - analog GCP - KS ist gegenüber dem verzinkten Stahl verbessert, weil durch die Beschichtung die Metalloberfläche mit Kontakt zur Umgebung verringert wird. Das Zink wird nur in den Fehlstellen abgebaut. 	<ul style="list-style-type: none"> - analog GCP - Schäden an Beschichtung infolge Einbau zu erwarten
Stahl-Hüllrohr, im Bohrloch injiziert (DCP) ¹⁾	<ul style="list-style-type: none"> - analog GCP - guter KS durch innere ZU mit kontrollierter Stärke/Qualität + diffusionsdichtes Stahl-Hüllrohr - Risse in ZU infolge Zug- oder Querbelastung für KS nicht relevant 	<ul style="list-style-type: none"> - keine Integritätskontrolle von Hüllrohr und innerer Injektion möglich
nichtrostender Stahl (MCP)	<ul style="list-style-type: none"> - analog GCP - Wirkung KS prakt. unabhängig von ZU bzw. sorgfältiger Ausführung - Risse in ZU infolge von Zug- oder Querbelastung für KS nicht relevant 	<ul style="list-style-type: none"> - rostfreie Stähle teilweise mit (zu) geringer Duktilität
Selbstbohr-Mikropfahl mit Stahlrohr		
Zementumhüllung (GCP)	<ul style="list-style-type: none"> - keine Schwächung von ZU durch Injektionsröhrchen 	<ul style="list-style-type: none"> - Qualität ZU hängt von Bodenart, gewähltem Bohrkronendurchmesser und Injektionsvorgang ab - Qualität ZU hängt stark von sorgfältiger Ausführung ab: kein zu schnelles Bohren (Abdriften der Bohrung), kontinuierliche Injektion während dem Bohren (Bohrlochstützung), genügend langes Injizieren nach dem Bohren (Ausspülen Bodenmaterial) - bei Nachinjektion über Stahlrohr: Gefahr von nicht vollständig verfüllten Rissen in ZU - Risse in ZU infolge Zug- oder Querbelastung beeinträchtigen KS
Abkürzungen: ZU Zementumhüllung KS Korrosionsschutz		
¹⁾ zusätzlich GCP ²⁾ gilt analog für ungespannte Anker		

Tab. 24 Bewertung Korrosionsschutz für gebohrte ungespannte Seilanker

Pfahl- / Ankersystem	Vorteile	Nachteile
gebohrter ungespannter Seilanker (mit Stahlseil aus hochfesten Drähten)		
Verzinkung(ZCP) ¹⁾	<ul style="list-style-type: none"> - bei verrohrter Bohrung: Bohrdurchmesser / Stärke ZU durch Verrohrung gewährleistet - Injektionsgut wird nicht mit Boden vermischt - guter KS für Überstand an der Luft 	<ul style="list-style-type: none"> - Qualität ZU hängt von sorgfältiger Ausführung ab - Systematische Schwachstelle in ZU durch Injektionsröhrchen - bei Nachinjektion: Gefahr von nicht vollständig verfüllten Rissen in ZU - Risse in ZU infolge Zug- oder Querbelastung beeinträchtigen KS - Verzinkung im erdberührten dauerfeuchten Bereich langfristig ohne zusätzliche Schutzwirkung ⁴⁾ - Gefahr von Spannungsrisskorrosion ⁵⁾
Abkürzungen:	ZU Zementumhüllung KS Korrosionsschutz	
¹⁾ zusätzlich GCP ⁴⁾ Für die gemäss Herstellerangaben bei Seilankern im Steinschlagverbau anzusetzende Nutzungsdauer von 25 Jahren in der Regel ausreichend ⁵⁾ Bei der typischen Anwendung im Steinschlagverbau nicht relevant, da dort die Seilanker im normalen Nutzungszustand kaum belastet sind und nur im Ereignisfall stark beansprucht werden. Bei permanenter Belastung wie z.B. im Lawinenverbau wird dies jedoch relevant.		

Tab. 25 Bewertung Korrosionsschutz für gerammte Pfähle

Pfahlsystem	Vorteile	Nachteile
Injektionsrammpfahl (Stahlprofil)		
Zementumhüllung (GCP)	<ul style="list-style-type: none"> - keine Schwächung von ZU durch Injektionsröhrchen - keine Nachinjektion, daher keine Gefahr von aufgesprengten und nicht mehr voll verfüllten Rissen - bei HEA und HEB Profilen sehr grosse ZU auf Innenseite der Profile 	<ul style="list-style-type: none"> - Qualität/Stärke ZU abhängig von Boden und sorgfältiger Ausführung und kaum zuverlässig zu gewährleisten. - Bei Kupplungen z.T. reduzierte ZU (aufgeschweisste Bleche) - Keine Distanzhalter, direkte Bodenberührung Pfahl bei seitlichem Abweichen von der Achse (z.B. bei Hindernissen) - Risse in ZU infolge Zug- oder Querbelastung beeinträchtigen KS
Korrosionszuschlag (STA)	- bei ausreichend dimensioniertem Korrosionszuschlag Wirkung KS prakt. unabhängig von ZU bzw. sorgfältiger Ausführung	- Korrosionszuschlag muss sehr konservativ gewählt werden, da Einfluss lokaler Korrosion (Lochfrass) kaum quantifizierbar
Korrosionszuschlag +GCP	- analog GCP und STA	- analog GCP und STA
gerammter Dukttilpfahl (Rohr aus duktilem Gusseisen)		
Zementumhüllung (GCP)	Analog Injektionsrammpfahl. Korrosionswiderstand Gusseisen im Vergleich zu Baustahl leicht erhöht.	
Korrosionszuschlag + GCP		
Korrosionszuschlag (STA)		
Abkürzungen:	ZU Zementumhüllung KS Korrosionsschutz	

Bei der Beurteilung in den Tabellen der Tab. 22 bis Tab. 25 handelt es sich um eine Einschätzung aufgrund der Erfahrungen und Erkenntnissen der Forschungsstelle. Diese kann als Grundlage für die Weiterentwicklung der Normierung hilfreich sein. Sie ist aber in dieser Form nicht als Anweisung oder Empfehlung für eine direkte Umsetzung in Projekten zu verstehen, da dabei immer auch noch zahlreiche anwendungs- und objektspezifischen Einflüsse zu berücksichtigen sind.

6 Qualitätssicherung und Überwachung

6.1 Fehlerquellen und Ausführungsmängel

Im Folgenden werden mögliche Fehlerquellen und Ausführungsmängel beschrieben. Die Zusammenstellung basiert primär auf den Erfahrungen der Forschungsstelle, der Fachliteratur sowie Rückmeldungen aus der Datenerhebung bei Unternehmen.

Es werden nur die für die Fragen der Dauerhaftigkeit relevanten Fehlerquellen und Ausführungsmängel behandelt. Die Häufigkeit solcher Ausführungsmängel lässt sich aufgrund der Datenlage nicht quantifizieren.

6.1.1 Zementumhüllung

Die Zementumhüllung ist bei vielen der untersuchten Systeme als Korrosionsschutz vorgesehen, entweder für sich alleine oder in Kombination mit anderen Massnahmen. Für eine ungenügende Schutzwirkung der Zementumhüllung können die folgenden Ursachen verantwortlich sein:

- Fehlstellen bzw. ungenügende Abmessungen / Stärke
 - ungenügende Mörtelqualität
 - Beschädigungen der Zementumhüllung im eingebauten Zustand
- Im Folgenden sind differenziert nach Einbaumethode die wichtigsten Punkte aufgeführt, welche bei der Erstellung der Pfähle oder Anker zu Fehlstellen oder einer ungenügenden Stärke der Zementumhüllung führen können:
- a) bei gebohrten Systemen:
- Bohrdurchmesser bzw. Verrohrung zu klein gewählt (generell oder z.B., weil Muffen und Injektionsrohre nicht berücksichtigt werden)
 - fehlende Distanzhalter
 - instabiles Bohrloch (bei unverrohrter Bohrung)
 - Fehlstellen und Wassereinschlüsse, wenn Primärinjektion von oben statt vom Bohrlochtiefsten Punkt ausgeführt wird
 - Rückzug der Verrohrung vor der Injektion (Zeitgewinn, Rohre müssen nicht gewaschen werden)
 - Injektionsgutverluste bei sehr durchlässigem Boden / Klüften (bei Einbau ohne Gewebestrumpf bzw. -sack).
- b) bei Selbstbohr-Systemen
- Bohrdurchmesser bzw. Bohrkronen zu klein (generell oder z.B., weil Muffen nicht berücksichtigt oder Aufweitung durch Bohrvorgang / Injektion überschätzt wurde)
 - instabiles Bohrloch (fehlende oder zu geringe Injektion während dem Bohren)
 - fehlende Distanzhalter
 - Abweichung von Bohrachse bei Hindernissen / zu raschem Vortrieb. Dadurch wird das Tragglied seitlich an den Baugrund gedrückt.
 - Injektionsgutverluste bei sehr durchlässigem Boden / Klüften
- c) Bei Rammspfählen
- Rammschuh zu klein (generell oder z.B., weil Muffen / Kupplungen nicht berücksichtigt)
 - instabiles Rammloch (fehlende oder zu geringe Injektion während dem Rammen)
 - Abweichungen von der theoretischen Achse. Dadurch kann der Pfahl seitlich an den Baugrund gedrückt werden.
 - Fehlstellen in der Injektion, falls diese nicht über den Pfahlfuss, sondern nur durch Auffüllen des Rammspalts von oben erfolgt.

Häufig stellt auch der Übergang der Pfähle oder Anker zum Tragwerk eine Schwachstelle bezüglich der Zementumhüllung dar:

- Bei mehr oder weniger vertikalen Pfählen besteht die Gefahr, dass die Zementumhüllung beim Aushub bzw. dem Freilegen des Pfahlkopfs beschädigt wird. Fehlt die Zementumhüllung im Bereich der Sauberkeitsschicht (Kieskoffer oder Magerbeton), kann dort ein konzentrierter Korrosionsangriff stattfinden. Eine zweckmässige Massnahme, um dies zu verhindern, sind sogenannte Pfahlhals-Schutzrohre (Abb. 29). Gemäss Angaben aus der Datenerhebung bei Unternehmern werden solche Schutzrohre jedoch in weniger als einem Drittel der Projekte mit permanenten Mikropfählen ausgeführt.

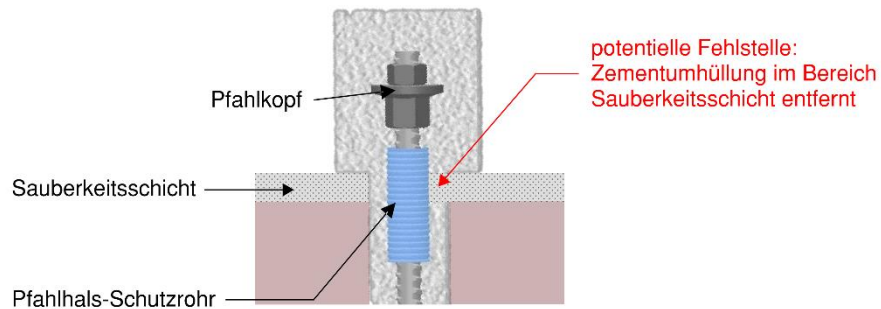


Abb. 29 Pfahlkopf mit Pfahlhals-Schutzrohr

- Bei ungespannten Anker oder stark geneigten Pfählen besteht vor allem die Gefahr, dass im Bereich hinter der Ankerplatte eine Hohlstelle entsteht. Der Zementmörtel der Ankerinjektion bildet einen horizontalen Spiegel auf Höhe des unteren Bohrlochrands (Abb. 30). Der Bereich oberhalb davon bleibt bei der Injektion frei und muss für eine fachgerechte Ausführung vor der Montage der Ankerplatte mit Mörtel ausgestopft/ausgespritzt werden. Wird dies unterlassen, kann es zu konzentrierter Korrosion direkt hinter der Ankerplatte kommen. In [66] wird über eine Fallstudie in Japan berichtet, bei welcher an 7 verschiedenen Bauwerken jeweils nach 10 Jahren ein ungespannter Anker freigelegt wurde. Bei 4 von diesen 7 Anker wurden dabei auf den ersten 20 cm hinter dem Ankerkopf bedeutende Korrosionsschäden (Querschnittsverluste von 38 bis 95%) festgestellt, welche auf eine Hohlstelle bzw. ungenügende Zementumhüllung zurückgeführt wurden.

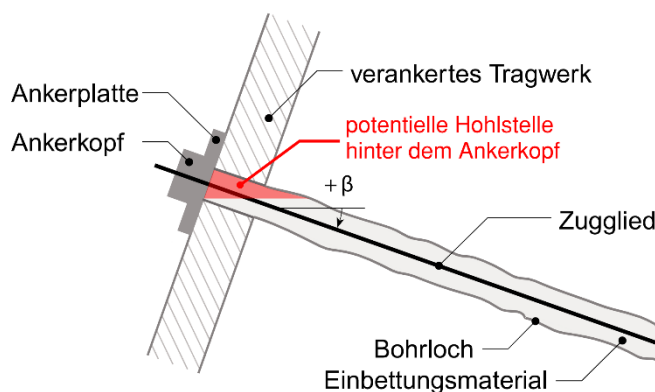


Abb. 30 Hohlstellen hinter Ankerkopf.

Die folgenden Ausführungsfehler können zu einer ungenügenden Qualität des Injektionsmörtels führen:

- falsche Einstellung des W/Z-Wertes
- starke Vermischung mit dem Baugrund (bei Selbstbohrankern)
- Verwendung ungeeigneter Produkte / Zemente
- Verwendung ungeeigneter Geräte (Mischer), so dass gewisse Zusatzmittel nicht aktiviert werden
- Bei Chargenmischern: zu grosser Zeitabstand zwischen Mischen und Einbau des Mörtels
- Arbeiten bei extremen Witterungs- und Temperaturverhältnissen (z.B. bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt)
- Auch im eingebauten Zustand kann die Zementumhüllung unter gewissen Umständen beschädigt werden, nämlich durch:
 - Risse bei Schwachstellen (z.B. entlang von Injektionsröhrchen oder bei Muffen)
 - Biege- und/oder Zugrisse durch Beanspruchungen und Zwangsverformungen

Eine lückenlose, genügend starke Zementumhüllung mit der erforderlichen Qualität des Mörtels bedingt eine entsprechende Planung (u.a. Wahl ausreichender Bohrdurchmesser) und eine sehr sorgfältige Ausführung. Beides ist in der aktuellen Praxis aufgrund des grossen Kosten- und Termindrucks auf den heutigen Baustellen leider nur bedingt gewährleistet.

6.1.2 Verzinkung und Beschichtungen

Zu allfälligen Produktionsfehlern bei der Verzinkung bzw. der Duplex-Beschichtung von Traggliedern für Mikropfähle und ungespannte Anker ist der Forschungsstelle nichts bekannt. Die grösste Gefahr für Fehlstellen geht bei diesen Systemen wohl von einer Beschädigung der Beschichtung beim Transport, der Lagerung auf der Baustelle und dem Einbau aus, insbesondere bei Selbstbohr-Systemen.

Teilweise werden Beschichtungsstoffe verwendet, welche nicht UV-Beständig sind. Dies kann dazu führen, dass bei längerer Lagerung vor dem Einbau die Beschichtung durch das Sonnenlicht beschädigt wird.

6.1.3 Kunststoff-Hüllrohre

Hauptursache für Fehlstellen im Korrosionsschutz bei Traggliedern mit vorinjizierten Kunststoff-Hüllrohren dürften mechanische Beschädigungen der Hüllrohre sein:

- bei der Herstellung
- beim Transport und der Lagerung (z.B. beim Anheben oder bei der Lagerung auf Untergrund mit scharfkantigen oder spitzen Objekten)
- Beim Einbau (grosse Durchbiegung beim Anheben, Schleifen über den Boden, bei nicht verrohrter Bohrung durch scharfkantige Bohrlochwand)

Eine weitere Schwachstelle stellen die Kupplungen dar, welche bei den heute eingesetzten Systemen mit Schrumpfschläuchen geschützt und abgedichtet werden. Die Qualität des Korrosionsschutzes im Kupplungsbereich hängt daher in hohem Masse von einer sorgfältigen Ausführung ab.

6.2 Schadensbild und Schadenshäufigkeit

Bisher sind der Forschungsstelle keine Schadenfälle bekannt, bei welchen die Korrosion von Mikropfählen oder ungespannten Ankern direkt zu einem Bauwerksversagen geführt hat. Dies könnte dahingehend interpretiert werden, dass in der Praxis gar keine relevanten Korrosionsschäden auftreten. Aufgrund der Tatsache, dass teilweise Pfahl- und Ankersysteme mit einem nur beschränkt wirksamen Korrosionsschutz eingesetzt werden und dass die unter Kapitel 6.1 beschriebenen Ausführungsmängel in der Praxis immer wieder beobachtet werden, scheint dies jedoch zu kurz gedacht. Vielmehr dürfte der

Umstand, dass nur wenig Schadenfälle beobachtet werden, zumindest teilweise auch auf folgende Ursachen zurückzuführen sein:

- Mikropfähle und ungespannte Anker sind in der Regel nicht zugänglich / sichtbar. Korrosionsschäden bleiben deshalb in der Regel unentdeckt, solange sie nicht zu deutlichen Verformungen / Verschiebungen des Bauwerks führen. Damit korrosionsbedingte Querschnittsverluste zu deutlichen Verformungen führen, müssen diese aufgrund der Bemessungsvorgaben der Normen aber schon ein erhebliches Ausmass erreichen.
- Mikropfähle werden in der Schweiz erst seit Anfang der 1970er Jahre eingesetzt. Der überwiegende Teil der Mikropfähle ist daher deutlich weniger als 50 Jahre alt. Bei den ältesten Anwendungen dürfte es sich zudem primär um Druckpfähle handeln, bei welchen sich Korrosionsschäden wegen der Mitwirkung der Zementumhüllung und der Flachfundation weniger rasch zu Deformationen führen, als bei Zugpfählen oder ungespannten Ankern.
- Ungespannte Anker werden in der Schweiz seit Beginn der 1990er Jahre verbreitet eingesetzt, zunächst allerdings primär für temporäre Bauwerke. Der überwiegende Anteil der permanenten ungespannten Anker dürfte daher deutlich weniger alt sein als 25 Jahre. Bei den ältesten Anwendungen dürfte es sich zudem vor allem um Nagelwände handeln, welche in sich eine grosse Redundanz aufweisen.
- Wo Mikropfähle oder ungespannten Anker nur eingesetzt werden, um aussergewöhnliche Bemessungssituationen abzudecken, z.B. bei der Verankerung von Lawingalerien oder Steinschlag-Schutznetzen, sind diese im Normalzustand praktisch nicht belastet. Korrosionsschäden würden sich dort erst im Ereignisfall bemerkbar machen.

6.3 Massnahmen zur Qualitätssicherung

6.3.1 Qualitätssicherung durch den Hersteller

Nur einzelne Hersteller haben für ihre Pfahl- oder Ankersysteme länderspezifische Zulassungen oder eine ETA (Europäische Technische Zulassung) und müssen in diesem Rahmen sowohl werkseigene Produktionskontrollen wie auch Audits durch einen Fremdüberwacher durchführen. Bei anderen Herstellern erfolgt die Qualitätssicherung auf freiwilliger Basis und ist nicht offengelegt.

Der Einbau der Pfahl- oder Ankersysteme, welcher für die Dauerhaftigkeit oft entscheidend ist, erfolgt durch verschiedene Bohrunternehmer. Die Qualitätsüberwachung durch den Hersteller beschränkt sich daher zwangsläufig auf die mechanischen Eigenschaften von Traggliedern, Kupplungen und Verankerungen sowie auf allfällige Beschichtungen bzw. die Produktion der werkseitig injizierten Kunststoff-Hüllrohre.

6.3.2 Qualitätssicherung auf der Baustelle

In der heutigen Situation fehlt der Bauleitung in der Regel die Zeit und/oder die Kompetenz, um eine sorgfältige und fachgerechte Herstellung von Mikropfählen und Ankern durch eine engmaschige Begleitung der Arbeiten vor Ort durchzusetzen. Eine effektive Qualitätssicherung müsste sich deshalb auf aussagekräftigen Prüfungen oder Messungen abstützen können.

Statische Prüfungen

Die Zementumhüllung ist bei allen untersuchten Systemen ausser bei gerammten Pfählen ohne Mantelinjektion erforderlich, um den Verbund zwischen Pfahl bzw. Anker und Baugrund herzustellen. Zug- und Druckprüfungen an den Ankern bzw. Pfählen könnten demzufolge als eine Art indirekte Prüfung der Zementumhüllung betrachtet werden. Bezüglich der Dauerhaftigkeit sind solche Prüfungen aber leider nicht aussagekräftig, da einzelne Fehlstellen in der Zementumhüllung keinen grossen Einfluss auf den Tragwiderstand, aber einen grossen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit haben.

Prüfung der Zementumhüllung

Die Firma Ghelma Spezialtiefbau AG hat im Rahmen des Innosuisse-Projekts 29490.1 mit der Hochschule Rapperswil, der Marmota Engineering AG und der ETH Zürich Versuche durchgeführt, um die Stärke der Zementumhüllung von Mikropfählen zu bestimmen. Dazu wurde die beim Abbinden des Zements entstehende Hydratationswärme mit entlang des Pfahlschafts angeordneten Glasfasersensoren gemessen. Gemäss Angaben von Projektbeteiligten hat sich aber gezeigt, dass diese Methode nur bei genauer vorgängiger Kalibrierung zuverlässige Resultate liefert und für einen systematischen Praxiseinsatz auf Baustellen noch nicht geeignet ist (eine Publikation der Forschungsergebnisse liegt noch nicht vor).

Zurzeit gibt es somit keine praxistaugliche Methode, mit welcher die Integrität der Zementumhüllung (Stärke, Fehlstellen) direkt geprüft werden kann. Es ist auch nicht zu erwarten, dass demnächst eine entsprechende Methode zur Verfügung stehen wird.

Gewisse moderne Mischer und Injektionspumpen erlauben eine automatische Registrierung der Mengen und Drücke bei der Injektion. Diese Möglichkeiten werden aber aktuell noch nicht systematisch für die Qualitätssicherung des Injektionsprozesses verwendet.

Mörtelprüfungen

Für die Qualitätsüberwachung des für die Injektionen verwendeten Zementmörtels stehen grundsätzlich zwei Methoden zur Verfügung:

- Überwachung und Dokumentation des Mischprozesses
- Stichproben-Prüfungen des gemischten Mörtels

Als Grundlage für Qualitätsprüfungen auf der Baustelle muss dabei eine Eignungsprüfung des verwendeten Mörtels vorliegen. Der Mischertyp und der Mischvorgang bei der Eignungsprüfung und auf der Baustelle müssen dabei zwingend identisch sein, da die Mörtel Eigenschaften stark vom Mischvorgang abhängen können.

Je nach Mischertyp lässt sich die Mischung des Mörtels (Dosierung von Zement und Zusatzmitteln oder einer Fertigmörtelmischung sowie des Zugabewassers) automatisch steuern und dokumentieren. Diese Möglichkeiten werden aber aktuell noch nicht systematisch für die Qualitätssicherung der Mörtelherstellung verwendet.

Analog zu Frischbetonkontrollen auf der Baustelle können auch die Eigenschaften des Zementmörtels mit Baustellenprüfungen kontrolliert werden. Auch die Herstellung von Prüfkörpern und die anschliessende Prüfung im Labor ist möglich. Gemäss Rückmeldungen der Unternehmer und den Erfahrungen der Forschungsstelle werden solche Mörtelprüfungen aber nur selten durchgeführt. Eine Ausnahme sind subventionierte Projekte im Lawinen- und Steinschlagverbau, wo diese systematisch verlangt werden.

Die aktuell gültigen Normen für Zementmörtel (SN EN 445 [67] und SN EN 447 [48]) beziehen sich eigentlich auf den Injektionsmörtel für Spannglieder mit nachträglichem Verbund im Spannbetonbau. Sie zielen deshalb primär auf die Eigenschaften ab, welche für eine vollständige Verfüllung der Hüllrohre im Spannbetonbau erforderlich sind. Oft ist nicht klar und wird kontrovers diskutiert, wie weit einzelne der in diesen Normen definierten Kriterien und Prüfungen für Mikropfähle und Anker wirklich relevant und aussagekräftig sind, und ob andererseits nicht wichtige Kriterien fehlen.

Elektr. Widerstandsmessung bei Hüllrohren

In der Schweiz hat sich – ausgehend von der Praxis bei den vorgespannten Ankern - in den letzten Jahren auch für Mikropfählen und ungespannten Ankern die Prüfung der Integrität des Kunststoff-Hüllrohres nach dem Einbau mit einer elektrischen Widerstandsmessung zunehmend etabliert. Wie bei den vorgespannten Ankern auch hat sich diese Praxis aber bisher nicht über die Schweiz hinaus ausgedehnt.

Gemäss den Rückmeldungen aus der Unternehmerumfrage werden etwa bei der Hälfte der Projekte systematische Messungen an allen Pfählen bzw. ungespannten Ankern durchgeführt. Die Anzahl der Mikropfähle und Anker mit ungenügendem elektrischem

Widerstand liegt dabei nach Angabe der Unternehmer in der Regel unter 10%. Gehäuft treten ungenügende Werte vor allem bei gekuppelten Pfählen auf.

Eine Schwierigkeit bei der elektrischen Widerstandsmessung liegt gemäss Rückmeldung der Unternehmer und den Erfahrungen der Forschungsstelle aber darin, dass vor den Messungen oft nicht klar definiert wird, wie im Falle von ungenügenden Resultaten vorzugehen ist (müssen ungenügenden Pfähle immer ersetzt werden, oder nur, wenn diese eine gewisse Anzahl überschreiten?). Dies führt dann zu unnötigen Diskussionen und Verzögerungen.

Elektrische Trennung von Mikropfählen und Bewehrung

Eine der wichtigsten Korrosionsschutzmassnahmen besteht in der elektrischen Trennung der Mikropfähle bzw. Anker und der Tragwerksbewehrung. Grundsätzlich lässt sich bei der Bewehrungsabnahme visuell gut überprüfen, ob sich Mikropfahl- bzw. Ankerköpfe und die Bewehrung nicht berühren. Bei permanenten Nagelwänden, wo der Aushub, der Einbau der Bewehrung und das Aufbringen des Spritzbetons in vielen kleinen Etappen erfolgen, ist eine vollständige Kontrolle durch die Bauleitung in der Regel aber illusorisch.

6.3.3 SIA-Register

Für vorgespannte Anker führt der SIA ein Register, in welchem die Hersteller ihre Systeme eingetragen lassen können, sofern diese die Normanforderungen sowie gewisse Vorgaben bezüglich Qualitätssicherung erfüllen. Damit steht für Bauherrschaften und Planer ein einfaches Mittel für die Wahl bzw. für die Beurteilung von Ankersystemen für vorgespannte Anker zur Verfügung.

Für Mikropfähle und ungespannte Anker existiert zurzeit kein solches Register und es ist momentan auch nicht vorgesehen, ein solches Register einzuführen. Aufgrund der grossen Vielfalt an Systemen dürfte der Aufbau eines entsprechenden Registers recht aufwändig sein.

Einzelne Gewindestäbe, die für Mikropfähle und ungespannte Anker verwendet werden, sind aktuell im SIA-Register der normkonformen Bewehrungsstähle aufgeführt. Zurzeit steht zur Diskussion, auch weitere Traggliedtypen wie Gewinde-Hohlstäbe in dieses Register aufzunehmen. Das Register der Bewehrungsstähle bezieht sich aber nur auf die (mechanischen) Eigenschaften der Tragglieder selbst, nicht auf ganze Mikropfahl- oder Ankersysteme.

6.4 Möglichkeiten zur Überwachung

Eine direkte Erfassung des Zustands von Mikropfählen und ungespannten Ankern während der Nutzungsdauer ist in der Regel nicht möglich, da diese meistens nicht zugänglich sind (einbetonierte Köpfe) und da wegen dem Vollverbund auch bei zugänglichen Köpfen keine aussagekräftigen Prüfungen möglich sind (im Gegensatz zu vorgespannten Freispiel-Ankern).

Teilweise ist eine indirekte Überwachung möglich, indem die Deformationen des Bauwerks oder des Baugrunds erfasst werden und aus dem Tragwerksverhalten auf den Zustand der Mikropfähle oder Anker geschlossen werden kann. Dies ist jedoch nur dann möglich, wenn die Mikropfähle / Anker auch unter ständigen Lasten erforderlich sind und das Versagen einzelner Mikropfähle oder Anker bereits zu einer feststellbaren Zunahme der Verformungen führt, bevor es zum Versagen des Tragwerks kommt.

7 Diskussion

7.1 Gefährdungen und Risiken bei Mikropfählen und ungespannten Ankern

Die Sachlage bezüglich Gefährdungen und Risiken bei Mikropfählen und ungespannten Ankern lässt sich wie folgt zusammenfassen:

1. Die Korrosionsgefährdung von Stahl im Boden ist bei völlig homogenen Verhältnissen theoretisch kaum relevant. In der Praxis treten aber praktisch immer Inhomogenitäten auf (z.B. baugrundbedingt oder durch Fehlstellen in der Zementumhüllung), welche zu einer Elementbildung führen. Es ist daher immer von einer integritätsrelevanten Korrosionsgefährdung auszugehen.
2. Die Wirkung von Korrosionsschutzsystemen, die auf dem Schutz durch die Zementumhüllung beruhen, hängt sehr stark von einer sorgfältigen Bauausführung ab. Zurzeit gibt es keine Methoden, um die Integrität der Zementumhüllung durch Baustellenprüfungen zu kontrollieren.
3. Eine direkte Beurteilung des Zustands von Mikropfählen und ungespannten Ankern während der Nutzungsdauer ist in der Regel nicht möglich, da die Pfahl- bzw. Ankerköpfe meist nicht zugänglich sind und es auch bei zugänglichen Köpfen keine zuverlässige Methode gibt, um den Zustand des Tragglieds zu erfassen.
4. Eine indirekte Beurteilung des Zustands von Mikropfählen und ungespannten Ankern aufgrund von Verschiebungen und Deformationen des Bauwerks oder des Baugrunds ist nur in gewissen Fällen möglich und erst dann, wenn bereits erhebliche (tragsicherheitsrelevante) Schäden aufgetreten sind.
5. Die Wirksamkeit, der heute angewendeten Korrosionsschutzmassnahmen bei Mikropfählen und ungespannten Ankern lässt sich zurzeit nicht quantifizieren. Einerseits sind zwar keine Fälle bekannt, die zu einem Bauwerksversagen geführt haben. Andererseits dürften aber einige Korrosionsschäden bisher noch unbemerkt geblieben sein, da sie sich nicht direkt im Bauwerksverhalten anzeigen oder noch nicht genügend weit fortgeschritten sind. Dabei ist zu beachten, dass Mikropfähle und ungespannte Anker, und dabei insbesondere die Selbstbohrsysteme, im Vergleich zu einer angestrebten Nutzungsdauer von 100 Jahren noch nicht sehr lange in grosser Zahl für permanente Anwendungen eingesetzt werden.
6. Korrosionsschäden können zum Verlust der Tragwirkung von Mikropfählen und ungespannten Ankern führen. Das von Korrosionsschäden ausgehende Risiko hängt von der Wahrscheinlichkeit ab, dass es überhaupt zu einem relevanten Korrosionsangriff kommt, von der Wahrscheinlichkeit, dass dieser zu einem (unangekündigten) Tragwerksversagen führt, und von den mit Tragwerksversagen einhergehenden Konsequenzen. Somit spielen für das Risiko folgende Punkte eine Rolle:
 - Intensität des Korrosionsangriffs
 - Zweck der Pfähle / Anker (Gewährleistung der Tragsicherheit oder nur der Gebrauchstauglichkeit?)
 - Art der massgebenden Einwirkung (Massgebende Beanspruchung durch ständige Einwirkung oder nur bei aussergewöhnlichem Ereignis?)
 - Redundanz des Tragwerks (Wie viele Pfähle dürfen ausfallen, ohne dass es zu einem Versagen kommt?)
 - Ankündigung des Versagens durch vorgängige Deformationen (Duktiler oder nicht duktiler Bruchverhalten des Bauwerks bei Versagen der Mikropfähle / Anker?)
 - Konsequenzen beim Versagen des Bauwerks (bezogen auf das Bauwerk selbst und auf gefährdete Drittobjekte)

Mit dem Ziel, ein ausreichendes Schutzniveau zu gewährleisten und gleichzeitig einen möglichst ressourcenschonenden und wirtschaftlichen Einsatz der Mittel zu gewährleisten, sollten die Korrosionsschutzmassnahmen auf das von der Korrosionsgefährdung ausgehende Risiko abgestimmt werden. Schematisch sind diese Überlegungen in *Abb. 31*

dargestellt. Darin nimmt in der Horizontalen von links nach rechts die Wahrscheinlichkeit von Korrosionsschäden bzw. einem daraus folgenden Tragwerksversagen zu, und in der Vertikalen von oben nach unten das Ausmass der Schadenfolgen.





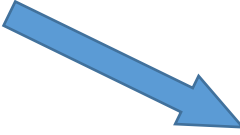
Anforderungen Korrosionsschutz	Korrosionsangriff (Baugrund und Grundwasser)		
	schwach		stark
	massgebende Einwirkung		
	ständig		plötzlich, aussergewöhnlich
Tragwerk			
redundant oder angekündigtes Versagen		nicht redundant oder unangekündigtes Versagen	
Nutzungsdauer			
kurz (10 Jahre)		lang (100 Jahre)	
Schadenfolge klein			
Schadenfolge mittel			
Schadenfolge gross			hoher Schutzgrad erforderlich
geringer Schutzgrad erforderlich			

Abb. 31 Risikobasierte Wahl des erforderlichen Schutzgrades, qualitativ

7.2 Empfehlungen für Anpassungen und Ergänzungen der Normvorschriften

Die Sachlage bezüglich der aktuellen Normvorschriften lässt sich wie folgt zusammenfassen:

1. Die Regelungen in den aktuellen SIA-Normen sind:
 - teilweise unscharf formuliert (z.B. Korrosivität des Baugrunds usw.)
 - teilweise unverbindlich (z.B. ist die Berücksichtigung eines Korrosionszuschlags für Druckpfähle zugelassen, es wird aber nicht definiert, wie gross dieser sein muss)
 - teilweise technisch schlecht nachvollziehbar (z.B. müsste bei Kunststoffhüllrohren zur Erhöhung der Schutzwirkung eher die Stärke der Zementumhüllung zwischen Tragglied und Hüllrohr erhöht werden, nicht wie in der Norm vorgegeben zwischen Hüllrohr und Bohrlochwand)
 - unvollständig (häufig eingesetzte Systeme wie z.B. die Selbstbohrsysteme werden nicht explizit behandelt)
 - teilweise nicht konsistent mit den europäischen Ausführungsnormen
2. Die Regelungen in den europäischen Ausführungsnormen bieten bezüglich des Korrosionsschutzes teilweise verschiedene Auswahlmöglichkeiten und die Vorgaben an den Korrosionsschutz sind teilweise nur als Empfehlungen / Richtwerte definiert. Zudem sind die Regelungen in den verschiedenen Normen (Mikropfähle, Verdrängungspfähle, Bodenvernagelung) zum Teil untereinander nicht konsistent.
3. Die Anforderungen an den Korrosionsschutz sind sowohl in den aktuellen Normen des SIA wie auch in den europäischen Ausführungsnormen systembezogen definiert, das heisst es werden für konkrete Ausführungsvarianten minimale konstruktive Anforderungen (Bauteilabmessungen und Eigenschaften) definiert. Für rein anforderungsbezogene Vorgaben, welche sich theoretisch auf alle möglichen Systeme anwenden lassen würden, fehlen die entsprechenden Grundlagen.

4. Die Tragwerksnormen des SIA und damit auch die Norm SIA 267 [27] werden in den nächsten Jahren durch die zweite Generation der Eurocodes abgelöst. Die Anforderungen an den Korrosionsschutz, welche heute in der Norm SIA 267 geregelt sind, müssen dann auf Basis der europäischen Ausführungsnormen neu geregelt werden. Entweder als separate nationale Anhänge oder als Bauweisen übergreifende nationale Ergänzungsnorm nach Vorbild der ÖNORM B4456 [68].

Im Hinblick auf die Neuregelung der Anforderungen an den Korrosionsschutz im Rahmen der Einführung des Eurocodes können die folgenden Empfehlungen formuliert werden:

- Klärung der Begriffe und Definitionen
- Konsistente Regelung für alle Systeme (gebohrte Mikropfähle, gerammte Pfähle, ungespannte Anker)
- Erarbeitung einer einfachen, praxistauglichen Wegleitung für die Klassierung des Baugrunds (Korrosivität)
- Erarbeitung von einfachen, praxistauglichen Vorgaben für eine risikobasierte Wahl des erforderlichen Schutzgrades, abhängig von:
 - Korrosivität des Baugrunds
 - Art der Einwirkungen (ständig oder aussergewöhnlich)
 - Art des Tragwerks (Redundanz und Bruchverhalten)
 - Nutzungsdauer
 - Schadensfolgen
- Beschreibung und Klassierung der am häufigsten angewendeten Systeme für Mikropfähle und ungespannte Anker bezüglich ihres Korrosionsschutzgrads (Berücksichtigung der Selbstbohrsysteme), unter Berücksichtigung der Abhängigkeit der Schutzwirkung von der Ausführungsqualität
- Genauere Definition der geforderten bzw. zugelassenen Stahlqualitäten, Hinterfragung der anzuwendenden Kriterien (sind allenfalls gewisse Kriterien nur für Betonstahl relevant, für Tragglieder von Mikropfählen und ungespannten Ankern aber nicht?)
- Hinterfragen der unterschiedlichen Anforderungen für Druck- und Zugpfähle

Ein erster Vorschlag für eine möglich Einteilung der verschiedenen Systeme bezüglich Schutzgrad ist in Tab. 26 gegeben. Dies ist aber lediglich als Diskussionsvorschlag in Hinblick auf eine kommende normative Neuregelung im Rahmen der Einführung der EC-Normen gedacht und nicht für die praktische Anwendung in aktuellen Projekten.

Tab. 26 Vorschlag für eine Einteilung der Anker- und Pfahlsysteme bezüglich dem Korrosionsschutzgrad

	Schutzwirkung stark abhängig von Ausführungsqualität	Schutzwirkung wenig abhängig von Ausführungsqualität oder mit Messungen bei der Ausführung überprüfbar
geringer Schutzgrad	-gebohrte Pfähle mit ZÜ ¹⁾ -Selbstbohrpfähle mit ZÜ ¹⁾	- roher Stahl mit Korrosionszuschlag ²⁾
mittlerer Schutzgrad	-gebohrte Pfähle mit Duplexbeschichtung und ZÜ ¹⁾ -Selbstbohrpfähle mit Duplexbeschichtung und ZÜ ¹⁾ -Stahlhüllrohre am Bau injiziert ³⁾	- roher Stahl mit Korrosionszuschlag ²⁾ - Kunststoffhüllrohre vorinjiziert ^{3) 4)} - Kunststoffhüllrohre am Bau injiziert ^{3) 4)} - nichtrostender Stahl KWK 1
hoher Schutzgrad	-Stahlhüllrohre am Bau injiziert ³⁾	- Kunststoffhüllrohre vorinjiziert ^{3) 4)} - Kunststoffhüllrohre am Bau injiziert ^{3) 4)} - nichtrostender Stahl KWK 3

¹⁾ Schutzgrad je nach Stärke der Zementüberdeckung
²⁾ Schutzgrad je nach Grösse des Korrosionszuschlags
³⁾ Schutzgrad je nach Stärke der Zementumhüllung zwischen Tragglied und Hüllrohr
⁴⁾ Integritätskontrolle mit EMR notwendig
 ZÜ Zementüberdeckung
 KWK Korrosionswiderstandsklasse

7.3 Offene Fragen und Forschungsbedarf

Im Rahmen der Erarbeitung des vorliegenden Sachstandsberichts hat sich bei verschiedenen Fragestellungen gezeigt, dass für die Festlegung der Anforderungen an die Anker- und Pfahlssysteme die notwendigen Grundlagen fehlen oder nur teilweise vorhanden sind. Die folgende Aufzählung soll aufzeigen, bei welchen Themen für die Ausarbeitung von Normierungstexten und die praktische Anwendung aus der Sicht der Forschungsstelle ein Forschungsbedarf besteht:

- Die Grundlagen für die Festlegung der Anforderungen an den Korrosionsschutz von Anker- und Pfahlssystemen sind nur teilweise vorhanden. Insbesondere im Bereich der Zementumhüllung stellt sich die Frage, welche minimalen Zementumhüllung aus Sicht des Korrosionsschutzes tatsächlich notwendig ist, und mit welchen Sollwerten diese in der Praxis mit den verschiedenen Einbaumethoden erreicht werden kann. Dabei gilt es zu beachten, dass sich die Umgebungsbedingungen und die Transportprozesse im Boden von den Bedingungen bei Stahlbetonbauten an der Atmosphäre unterscheiden.
- Die Überlegungen zum Korrosionsschutz mit einer Zementumhüllung haben aufgezeigt, dass eine lückenlose Zementumhüllung des Stahles entscheidend ist. In der Praxis werden jedoch Injektionsschläuche in diesem Bereich verlegt und es werden bei einigen Systemen Nachinjektionen durchgeführt, wo die Zementumhüllung absichtlich aufgesprengt wird, um anschliessend diese Bereiche wieder mit Zementinjektion zu verfüllen. Ebenfalls ist davon auszugehen, dass sich durch Zug- und Biegebeanspruchungen Risse in der Zementumhüllung bilden. Aus Sicht der Dauerhaftigkeit stellt sich die Frage, wie diese Abweichungen vom theoretischen Korrosionsschutz einzuordnen sind und welche Anforderungen gegebenenfalls definiert werden müssen, um den benötigten Korrosionsschutz in der praktischen Anwendung sicherzustellen.
- Aus Nachhaltigkeitsgründen wird es künftig notwendig sein, die zurzeit verwendeten Zementsorten zu ersetzen. Dabei stellt sich die Frage, wie sich die neuen Zementsorten im Boden verhalten und wie mit diesen Zementsorten der Korrosionsschutz sichergestellt werden kann. Insbesondere stellt sich die Frage, welche Anforderungen angepasst werden müssen, um einen gleichwertigen Korrosionsschutz wie mit den heute verwendeten Zementen sicherzustellen.
- Wie in Kapitel 6.3 beschrieben sind die Möglichkeiten bzw. die in der praktischen Anwendung tatsächlich durchgeführten Massnahmen zur Qualitätssicherung zurzeit sehr begrenzt. Hier stellt sich die Frage, wie die Daten von den Sensoren, welche in modernen Maschinen eingebaut sind, genutzt werden können, um eine Verbesserung der Qualitätsüberwachung auf der Baustelle zu erreichen. Ebenfalls werden künftig messtechnische Methoden zur Überwachung der Qualität der Zementinjektion und Mörtel benötigt, welche auf der Baustelle ohne grossen Aufwand und besondere Fachkenntnisse durchgeführt werden können. Dabei gilt es insbesondere abzuklären, welche Parameter relevant sind und tatsächlich gemessen werden müssen, um die gewünschte Qualität nach dem Einbau auf der Baustelle sicherzustellen.

Diese Aufzählung ist nicht abschliessend und soll als Anregung für künftige Forschungsvorhaben verstanden werden.

Anhänge

I	Tabellen mit Zusammenstellung von Bestimmungen in den Normen	102
I.1	Allgemeine Bestimmungen zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit in verschiedenen Normen	102
I.2	Bestimmungen zur Untersuchung des Baugrunds und zur Beurteilung der Korrosivität in verschiedenen Normen	103
I.3	Bestimmungen zu konstruktiven Aspekten in verschiedenen Normen.....	104
I.4	Bestimmungen zu Verpressmörtel, Mörtel und Beton in verschiedenen Normen	105
I.5	Bestimmungen zur Überdeckung in verschiedenen Normen	106
I.6	Prüfung des Korrosionsschutzes in verschiedenen Normen	107

I Tabellen mit Zusammenstellung von Bestimmungen in den Normen

I.1 Allgemeine Bestimmungen zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit in verschiedenen Normen

Gewährleistung der Dauerhaftigkeit	
SIA 262:2013 Betonbau	Massnahmen abhängig von Nutzungsdauer und Exposition 0.1.7: Die Norm ist anwendbar für alle provisorischen und definitiven Tragwerke des Grundbaus sowie für alle Typen von Fundationen aus Beton.
Korrigenda SIA 262-C1:2017	Liste grundsätzlich möglicher Massnahmen (2.4.3, 2.4.1.2), insbesondere: Dichter Überdeckungsbeton (6.4.2), genügende Bewehrungsüberdeckung (5.2.2)
SN EN 206:2013, plus A1:2016-C1 Beton	NA.5.3.4: In Abhängigkeit von der Exposition und vom Verwendungszweck (Hoch- und Tiefbau sowie Pfähle und Schlitzwände) werden Betonsorten definiert und Anforderungen festgelegt (Tabellen NA.5 bis NA.11).
SIA 267:2013 Allgemeine Bestimmungen	5.6.1/5.6.3: Falls keine Bemessungsmodelle verfügbar sind, darf der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit mittels konstruktiven Massnahmen geführt werden.
SIA 269/7:2011 Erhaltung von Tragwerken Geotechnik	7.1.7: Verankerte Bauwerke sind während der Restnutzungsdauer gemäss Norm SIA 267 und messtechnisch zu überwachen.
SIA 267:2013 Kapitel 9: (Mikro-)Pfähle	Auf Zug oder auf namhafte Querkraft beanspruchte Pfähle sind wie ungespannte Anker zu behandeln (Korrosionsschutz: Schutzstufen), Berücksichtigung der Rissbildung 9.6: Konstruktive Massnahmen 9.6.1.1.1: Baustoffe gemäss SIA 262, 263 9.6.1.1.2: Für Pfähle in aggressivem Medium sind, abgestimmt auf den Pfahlbaustoff, besondere Schutzmassnahmen erforderlich. 9.6.1.5.3: In aggressiven Medien und bei Streuströmen sind spezielle Korrosionsschutzmassnahmen zu treffen. 9.6.1.6: Gefährdung durch chemisch aggressive Medien: Schutzmassnahmen gemäss SIA 262
SIA 267/1:2013 Pfähle	4.2: Anforderungen an Pfahlbeton gemäss SN EN 206 unter Berücksichtigung von Nutzungsdauer und Zusammensetzung Boden/Grundwasser
SIA 118/267:2019 (Pfähle, Anhang B)	---
EN 14199:2015 Mikropfähle	7.6: Korrosionsschutz berücksichtigt die Aggressivität der Umgebung, Streuströme, Zug- oder Druckbeanspruchung, Lebensdauer, Typ Pfahl, Typ Stahl 7.6.2: Korrosionsschutz muss bestehen aus Überdeckung aus Verpress- oder Zementmörtel oder Beton, einer Kompensation von Querschnittsverlusten (Verweis auf Tab. 4-1 in EN 1993-5 für die Korrosionsgeschwindigkeit) und/oder besonderen Vorkehrungen zum Korrosionsschutz, wie z.B. Zement-, Stahlsorte, dauerhafte Verrohrung, Beschichtungen) 7.6.8: Beim Einsatz von Spannstählen müssen die Rissbreiten berücksichtigt werden.
SIA 267:2013 Kapitel 11: ungespannte Anker	11.2.2.5: Nachweis der Dauerhaftigkeit für den Anker als Ganzes und für jeden eingesetzten Werkstoff 11.6.3: Schutzstufen 0, 1, 2a/2b und 3a/3b Tabelle 6: Bestimmung der Schutzstufe für ungespannte Anker, abhängig von der Korrosionsgefährdung, der Bauwerksklasse und der Nutzungsdauer 11.6.3.2.4/5: Korrosionszugabe, Verzinkung und Beschichtung sind nicht erlaubt
SIA 267/1:2013 Ungespannte Anker	---
SIA 118/267:2019 (Ungespannte Anker, Anhang D und G)	G.1.2: i.d.R. sind nur Stähle mit ausgeprägtem Fließplateau zulässig
SN EN 14490:2010 (SIA 267.153) Bodenvernagelung	4.2.1: Festlegung der geotechnischen Kategorie und der Nutzungsdauer 5.2.5: Beurteilung der Aggressivität des Baugrunds und des Grundwassers 6.2.2.2.5: beim Einsatz von Spannstahl (> 600 N/mm ²): Korrosionsschutz gemäss EN 1537 (Anker) Anhang B.3.4.3: Massnahmen sind: Korrosionszugabe, Umhüllung mit Mörtel etc., Beschichtung, geripptes Hüllrohr mit Einpressmittel, Stahlqualität
ÖNORM B 4456:2021 Dauerhaftigkeit von Verankerungen	4: Planung unter Berücksichtigung von geplanter Nutzungsdauer, Überwachbarkeit, Schadensfolgeklasse, Exposition etc. 5.2: einfacher, doppelter und materialbedingter Korrosionsschutz, deren Anwendbarkeit ist generell abhängig von der Korrosionsbelastung, der Nutzungsdauer, der Schadensfolgeklasse und der Beanspruchung.
ÖNORM B 4456:2021 Kapitel 6.1 Verpressanker	Ergänzend zur EN 1537 Anwendbarkeit von Massnahmen ist abhängig von der Nutzungsdauer und der Korrosionsbelastung
ÖNORM B 4456:2021 Kapitel 6.2 Verpress-/Mikropfähle	Ergänzend zur EN 14199 Anwendbarkeit von Massnahmen ist abhängig von der Korrosionsbelastung, der Nutzungsdauer, der Schadensfolgeklasse und der Beanspruchung
ÖNORM B 4456:2021 Kapitel 6.3 Bodennägel	Ergänzend zur EN 14490 Anwendbarkeit von Massnahmen ist abhängig von der Korrosionsbelastung, der Nutzungsdauer und der Schadensfolgeklasse
SN EN 1993-5:2007 Stahlbauten - Teil 5 Pfähle, Spundwände	4.1: Korrosionsreserve (Angabe von Abtragsraten) Korrosionsschutz (Beschichtungen, Verzinkung, Verpressmörtel) Kathodischer Korrosionsschutz

I.2 Bestimmungen zur Untersuchung des Baugrunds und zur Beurteilung der Korrosivität in verschiedenen Normen

Baugrunduntersuchung, Umgebung	Bewertung der Korrosivität
SIA 262:2013 Betonbau Korrigenda SIA 262-C1:2017	Expositionsklassen XD, XF und XA (Verweis auf SN EN 206 für die Beurteilung von Böden und Grundwässern)
SN EN 206:2013, plus A1:2016-C1 Beton	4.1: Definition von Expositionsklassen, Klasse XA für chemischen Angriff in Böden und Grundwässern NA.4.1: Expositionsklasse XA: die CH unterscheidet zwischen Sulfat- und lösendem Angriff (XAs bzw. XAc) Expositionsklasse XD2: die CH unterscheidet zwischen "Süss-" und Salzwasser (XD2a bzw. XD2b)
prEN 1997-1:2022 (E) EC 7 Geotechnical Design - Part 1 General Rules	6.2: Die Anwesenheit, Menge und Art von im Grundwasser gelösten Stoffen ist zu bestimmen. 6.2: Die Exposition ist gemäss EN 206, prEN 1992-1-1, prEN 1993-1-1, prEN 1996-1-1 ... festzulegen
prEN 1997-2:2022 (E) EC 7 Geotechnical Design - Part 2 Ground properties	7.3.1: Chemische Eigenschaften von Boden und Grundwasser müssen untersucht werden. ---
SIA 267:2013 Allgemeine Bestimmungen	3.4.4: Bei Bedarf ist die Wasserqualität abzuklären (Aggressivität, Chemismus). ---
SIA 267:2013 Kapitel 9: (Mikro-)Pfähle	9.3.1: Abklärungen betreffend Stoffen im Boden und Grundwasser, welche die Dauerhaftigkeit der Baustoffe beeinträchtigen können. 9.6.1.5/9.6.1.6: schwammige Umschreibungen aggressive Medien, schwach aggressives Medium, sowie unabhängig vom Chemismus: Streustromgefährdung
SIA 267/1:2013 Pfähle	---
SIA 118/267:2019 Pfähle, Anhang B	---
DIN EN 14199:2015 Mikropfähle	5.1.1: Baugrunderkundung gemäss SN EN 1997, alle Teile 5.2.4 f: Chemische Aggressivität von Grundwasser, Boden und Fels, die die Eigenschaften und Beschaffenheit des Mörtels des Betons und des Stahls beeinträchtigen kann. ---
SIA 267:2013 Kapitel 11: ungespannte Anker	11.2.1: Verweis auf 10.2 (Anker) 11.3: Verweis auf 10.3 (Anker): Abklärung von Medien im Baugrund, im Wasser und in der Luft, welche die Dauerhaftigkeit der verwendeten Baustoffe gefährden können 10.2.1.4 (Anker): Abklärung der Streustrombelastung 11.6.3, Tabelle 6: 3 Stufen der Korrosionsgefährdung gering - mittlere (z.B. Tausalz, feinkörnige Böden, organische Stoffe im Boden) - hohe (z.B. kritische Streuströme, Altlasten)
SIA 267/1:2013 Ungespannte Anker	---
SIA 118/267:2019 Ungespannte Anker, Anhänge D und G	---
SN EN 14490:2010 Bodenvernagelung	4.1.2.a und 5.1: Baugrunderkundung gemäss SN EN 1997, Teile 1 und -2 7.2.3 a und c: Durchlässigkeit, chemische, elektrochemische und biologische Eigenschaften des Baugrunds und des Grundwassers Anhang B, 3.4.2: Bewertung der Korrosivität, Tabellen B.1 und B.2, Kriterien: Bodenart, Bodenwiderstand, Feuchtegehalt, pH-Wert Stufen I bis IV: hoch korrosiv ... leicht korrosiv (falls keine Untersuchungen durchgeführt werden: immer korrosiv/hoch korrosiv) Tabelle B.3: Abtragsraten zur Bestimmung des Korrosionszuschlags, abhängig von der Korrosivität und der Nutzungsdauer
SN EN 12501-1:2003 Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe - Korrosionswahrscheinlichkeit in Böden, Teil 1: Allgemeines	3 Klassen für die Korrosionswahrscheinlichkeit: niedrig - mittel - hoch
SN EN 12501-2:2003 Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe - Korrosionswahrscheinlichkeit in Böden, Teil 2: Niedrig- und unlegierte Eisenwerkstoffe	Tabelle 2: Beurteilung der Korrosionsbelastung bei Vorliegen von Bodenproben, abhängig von pH und kleinstem Bodenwiderstand 3 Stufen: niedrig - mittel - hoch (falls keine Untersuchung erfolgt: hoch)
DIN 50929-3:2018 Korrosionswahrscheinlichkeit metallischer Werkstoffe bei äusserer Korrosionsbelastung - Teil 3	6/7: Abschätzung der Korrosionswahrscheinlichkeit in Böden und Wässern (un-, niedrig- und hochlegierte sowie verzinkte Stähle, Kupferwerkstoffe). Bodenanalysen → Tabellen zur Bestimmung der Bewertungszahlen 5, Tabelle 1: Richtwerte zur Abschätzung der Korrosionsgeschwindigkeit, basierend auf den Bewertungszahlen zur Korrosivität 6.1: Tabellen zur Abschätzung der Korrosionsbelastung und der Korrosionswahrscheinlichkeit
DIN 50929-3 Beiblatt 1:2014	Beurteilung der Korrosivität von Wässern unter Berücksichtigung der Sauerstoffsättigung
SN EN 1993-5:2007 Stahlbauten - Teil 5 Pfähle, Spundwände	4.4 (Tabellen 4-1 und 4-2): Angabe für Korrosionsraten in Böden und in Süss- bzw. Salzwasser für die rechnerische Berücksichtigung von Materialverlusten. Haupteinflüsse: Bodenart, Änderung Grundwasserspiegel, Sauerstoffangebot, vorhandene Verunreinigungen
SN EN ISO 12944-2:2017 Beschichtungssysteme - Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme, Teil 2: Einteilung der Umgebungsbedingungen	5.1.1: atmosphärische Korrosivität: 6 Kategorien (C1 ... C5, CX), basierend auf dem Massenverlust nach einem Jahr aus Auslagerungsversuchen 5.2: Wasser und Erdreich: 4 Kategorien (Im1 ... Im4) ohne weitere Angaben. Es werden nur Beispiele gegeben für die Klassen. Verweis auf 12501 - 1
SIA 179: 2019 Befestigungen in Beton und Mauerwerk	Tabelle 1: Korrosivitätskategorien gemäss SN EN ISO 12944-2 2.3.1.1.4/2.3.1.2.4/2.3.1.2.5: Das Mikroklima ist von grösster Relevanz, Hinweis auf SN EN ISO 12944-2
ÖNORM B 4456:2021 Dauerhaftigkeit von Verankerungen	Anhang A: Untersuchung von Bodenart/-beschaffenheit, spezifischem Bodenwiderstand, natürlichem Wassergehalt und pH-Wert, sowie allfällig vorhandene Streuströme Anhang A: Klassifizierung des Baugrunds, Verfahren gemäss der EN 14490:2010: Bestimmung von Bewertungszahlen

I.3 Bestimmungen zu konstruktiven Aspekten in verschiedenen Normen

	konstruktive Aspekte	Hüllrohr
SIA 267:2013 Kapitel 9: (Mikro-)Pfähle	9.6.1.5.2: Korrosionszuschlag bei schwach aggressiven Verhältnissen 9.6.6.5: Überdeckung: Distanzhalter erforderlich 9.6.6.3/9.6.5.3: Trennung Pfahl-/Bauwerksbewehrung 9.6.6.7: bei Zug oder signifikanter Querkraft: Anforderungen wie bei ungespannten Ankern (11.6.3, 11.7.5)	
SIA 267/1:2013 Pfähle	---	
SIA 118/267:2019 (Pfähle, Anhang B)	B.2.6/B.3.2: Bewehrungskörbe: Abstandhalter mit maximalem Längsabstand 3.0 m	
EN 14199:2015 Mikropfähle	6.6/7.6: Abstandhalter 8.7.3.2: maximaler Längsabstand Abstandhalter: 3 m oder an jedem Teilstück	
ÖNORM B 4456:2021 Kapitel 6.2 Verpress-/Mikropfähle	6.2.4, 6.2.5: Detailausbildung, insbesondere des Pfahlkopfs 6.2.5.2: Elektrische Trennung	
SIA 267:2013 Kapitel 11: ungespannte Anker	11.6.1.1: Verweise auf 267/1 bzw. SIA 118/267, SN EN 14490 11.6.3.2.2: Distanzhalter erforderlich 11.6.3.2.5: Korrosionszuschlag ist nicht erlaubt 11.6.3.2.6: Hüllrohr mindestens 100 mm in Konstruktionsbeton führen (Schutzstufen 2a und 3a) 11.6.3.3.2: Ankerkopf einbetonieren: > 50 mm Beton o.g. 11.6.3.3.4: elektrische Trennung von der Bauwerksbewehrung	11.6.3.2.1: geripptes/gewelltes Kunststoffhüllrohr (Schutzstufen 2a und 3a) 11.6.3.4.1: chemisch beständig und ausreichend diffusionsdicht, robust (keine Beschädigung) 11.6.3.4.2: bei Kupplungen grössere Durchmesser um Überdeckung zu gewährleisten.
SIA 267/1:2013 Ungespannte Anker	---	---
SIA 118/267:2019 (Ungespannte Anker, Anhang D und G)	D.2.2.5: Abstandhalter	---
SN EN 14490:2010 Bodenvernagelung	B.3.4.4 Tabelle B.3: Korrosionszugabe, abhängig von Nutzungsdauer B.3.4.6: Oberflächenbeschichtung B.3.4.8: nicht rostender Stahl 8.4.3.1.4/5: Sicherstellung der Überdeckung mit Abstandhaltern: zwingend, falls Teil des Korrosionsschutzsystems	B.3.4.7: geripptes Hüllrohr mit Einpressmittel
ÖNORM B 4456:2021 Kapitel 6.3 Bodennägel	6.3.2, 6.3.3: Detailausbildung, insbesondere des Pfahlkopfs 6.3.3.2: Elektrische Trennung	
SIA 267:2013 Kapitel 10: vorgespannte Anker	10.6.1.1: Verweisungen und Hinweise in SIA 267/1 bzw. SIA 118/267 sowie SN EN 1537 10.6.1.3: Es sind nur zugelassene Systeme zulässig. 10.6.2: Zugglied und Ankerkopf gemäss SIA 262 und 262/1 Die Bestimmungen für Spannsysteme sind sinngemäss anzuwenden (SIA 262 und 262/1)	10.6.3.2.2: chemisch beständig, ausreichend diffusionsdicht, elektrisch isolierend und robust (keine Beschädigung)
SIA 267/1:2013 Vorgespannte Anker	4.3: Korrosionsschutz gemäss EN 1537 (Verankerungslänge, freie Ankerlänge, Schutzhauben)	
SIA 118/267:2019 (Vorgespannte Anker, Anhang D)	D.2.2.8: Abstandhalter ausserhalb der Korrosionsschutzumhüllung aus korrosionsbeständigem Material	
SN EN 1537:2013 Vorgespannte Anker	6.2: Korrosionsschutzte Ankerenteile 6.3: Korrosionsschutz des Stahlzugglieds Weitere Komponenten und Materialien für den Korrosionsschutz 6.5.2: Schrumpfschlauch (> 1 mm, Überlappung 50 mm) 6.5.4: Korrosionsschutzmassen 6.5.5: Beschichtungen mit Opfermetallen 6.5.6: andere Beschichtungen	Hüllrohre 6.5.1.4 bis 6: Mindestwandstärken, innen (1 mm), aussen, abhängig von Durchmesser und Oberfläche (1 bis 2.5 mm) 6.5.1.1 bis 3: Beständig, wasserundurchlässig, keine freien Chloride erzeugend (PVC)
ÖNORM B 4456:2021 Kapitel 6.1 Verpressanker	6.1.2 bis 6.1.7: Detailausbildung 6.1.4: Verankerungen permanenter Anker müssen über die ganze Nutzungsdauer zugänglich, überprüfbar, nachspannbar inkl. erforderlichem Korrosionsschutz sein	

I.4 Bestimmungen zu Verpressmörtel, Mörtel und Beton in verschiedenen Normen

	Beton, Mörtel	Verpressmörtel
SIA 262:2013 Betonbau Korrigenda SIA 262-C1:2017	Beton gemäss SN EN 206 Zementart gemäss SIA-Register freigegebener Zemente (wird permanent aktualisiert)	Injektionsgut auf Zementbasis (Spannglieder im Verbund) Spannglieder ohne Verbund: geeignete Fette, Wachse Anforderungen und Prüfverfahren: Norm SIA 262/1
SN EN 206:2013, plus A1:2016-C1 Beton	Tabellen NA.8 und NA.9: Grundlegende und zusätzliche Anforderungen an Betone für Bohrpfähle und Schlitzwände (Betonarten P1 bis P4) Tabelle NA.10: Bei Expositionsklassen XA muss immer P2 eingesetzt werden: w/z-Wert ≤ 0.50 , ≥ 380 kg/m ³ Zement (ohne Zusatzstoffe), Grösstkorn 16 bis 32 mm	---
prEN 1997-1:2022 (E) EC 7 Geotechnical Design - Part 1 General Rules	5.5: Anforderungen gemäss prEN 1992-1-1:2021 und EN 206:2013	5.4: Anforderungen gemäss EN 1537, EN197-1, 12715, 12716, 445 bis 447, 14199 Exposition und Festigkeit gemäss EN 206, im Boden minimal C25/30, im Fels minimal C35/45
SIA 267:2013 Kapitel 9: (Mikro-)Pfähle	9.6.1.1/9.6.1.1.3: Anforderungen und Prüfung gemäss SIA 262, Qualitätsanforderungen gemäss SIA 267/1 bzw. SIA 118/267, SN EN 14199 Anforderungen an den Pfahlbeton gemäss SIA 262 (9.6.2.1 Vorfabrikation), gemäss SIA 267/1 (9.6.3.1.2 Ortbeton) 9.6.6: Mikropfähle: ≥ 450 kg/m ³ CEM I oder gleichwertig Injektionsmörtel ist dem Baugrund anzupassen, Anforderungen und Prüfung gemäss 262/1. Nachinjektion muss möglich sein	9.6.5: Pfahlmantelinjektion genügt i.d.R. nicht als Korrosionsschutz
SIA 267/1:2013 Pfähle	4.2: Anforderungen an Pfahlbeton gemäss SN EN 206 unter Berücksichtigung von Nutzungsdauer und Zusammensetzung von Boden und Grundwasser	---
SIA 118/267:2019 (Pfähle, Anhang B)	B.1.2: Mörtel muss fliessfähig sein. Zementgehalt mindestens 450 kg/1000 Liter Mörtel. B.2.7/B.3.3: Beton gemäss SN EN 206 plus A1	---
EN 14199:2015 Mikropfähle	6.3.1: Zement gemäss EN 206:2013 (Anhang D), nur CEM I in Kombination mit Spannstählen 6.3.1.2: Bei der Auswahl der Zemente ist der möglichen chemischen Aggressivität der Umwelt Rechnung zu tragen (Expositionsklasse gemäss EN 206:2013). 6.5: Zementmörtel und -beton nach EN 206:2013 mindestens C25/30, Grösstkorn maximal 4 mm 7.6.5/6: Berücksichtigung der Expositionsklassen nach EN 206:2013, inkl. allfälliger zukünftiger Veränderung	6.4: Verpressmörtel w/z ≤ 0.55 , mindestens C25/30, Prüfung gemäss EN 12390-3 6.4.5 bis 6.4.8: Feldversuche nach EN 445, Wasserverlust nach EN 447 zu minimieren
SIA 267:2013 Kapitel 11: ungespannte Anker	11.6.3.2.1/11.6.6.1.1: Zementmörtel 11.6.3.2.3: Nachweis der Korrosionsschutzwirkung beim Einsatz von Kunstharzmörtel. 11.6.6.2: Anforderungen gemäss SIA 262 und 262/1. 11.6.6.2.4: Anforderungen gemäss SIA 267/1	Bestimmungen für Spannsysteme sind sinngemäss anzuwenden (SIA 262 und 262/1)
SIA 267/1:2013 Ungespannte Anker SIA 118/267:2019 (Ungespannte Anker, Anhang D und G)	7.1.3: Anforderungen an Mörtel bzw. Injektionsgut auf Zementbasis und deren Prüfung gemäss Norm SIA 262/1.	---
SN EN 14490:2010 Bodenvernagelung	---	6.2.3: Zement gemäss EN 197-1, abhängig von Expositionsklasse gemäss EN 206, w/z ≤ 0.55 , fcw28 ≥ 25 N/mm ² B.3.4.5: Mörtelummhüllung, pH > 9.5 , Rissbreiten ≤ 0.1 mm
SIA 267:2013 Kapitel 10: vorgespannte Anker SIA 267/1:2013 Vorgespannte Anker SIA 118/267:2019 (Vorgespannte Anker, Anhang D)	---	10.6.3.2.2: Zementsuspension oder anderes geeignetes Injektionsgut (Verankerungslänge), dauerplastische, beständige Masse (freie Ankerlänge)
SN EN 1537:2013 Vorgespannte Anker	---	6.4: Verpressmörtel für Korrosionsschutz und Kraftübertragung, gemäss EN 447 (6.4.1.4) 6.4.1.1/2: Zementtyp abhängig von Umgebung: Durchlässigkeit, Sulfate, Kohlensäure, Aggressivität/Exposition gemäss EN 206 6.4.1.6 bis 8: Zusatzmittel gemäss EN 934-2, < 0.1 % Chloride, Sulfide, Nitrate 6.4.4: Kunstharzmörtel zulässig, falls Brauchbarkeit nachgewiesen

I.5 Bestimmungen zur Überdeckung in verschiedenen Normen

Überdeckung	
SIA 262:2013 Betonbau	5.2.2: Überdeckung: c_{nom} gemäss Tab. 18, abhängig von der Exposition gegen Erdreich: $c_{nom} \geq 90$ mm, +/- 30 mm bei vorbereitetem Untergrund ≥ 50 mm, +/-20 mm (Verweis auf SIA 267).
Korrigenda SIA 262-C1:2017	
prEN 1997-1:2022 (E) EC 7 Geotechnical Design - Part 1 General Rules	5.5: Anforderungen gemäss prEN 1992-1-1:2021 (keine Hinweise für den Umgang mit den Expositionsklassen XA1 bis XA3)
SIA 267:2013 Kapitel 9: (Mikro-)Pfähle	9.6.2.2.5: Vorgefertigte Betonpfähle: Überdeckung gemäss SIA 262 9.6.3.2.6: Ortbetonpfähle gemäss SIA 262, aber: mindestens: 60 mm (verrohrt oder im Fels) bzw. 75mm (unverrohrt im nicht standfesten Boden) 9.6.6.4: permanente Mikropfähle (> 5 Jahre): mind. 40 mm "lückenlose" Überdeckung
SIA 267/1:2013 Pfähle	---
SIA 118/267:2019 (Pfähle, Anhang B)	Abstand zu Bohrlochwand/Verrohrung ausreichend
EN 14199:2015 Mikropfähle	7.6.3/4: Überdeckung, Nennwerte: mit zeitweiliger Verrohrung: 50 mm nach dem Betonieren eingebaut: 75 mm dauerhafte Verrohrung: 25 mm (Mindestwert 10 mm) Anhang B (Tabelle B.1): Überdeckung, abhängig von der Expositionsklasse, teilweise im Widerspruch zur EN 206 und SIA 262, XA-Klassen fehlen.
SIA 267:2013 Kapitel 11: ungespannte Anker	Ohne Hüllrohr: Stufen 1, 2b, 3b: ≥ 20 mm zwischen Stahl/Bohrlochwand (Stufen 2b und 3b: Einsatz von nichtrostendem Stahl) Mit Hüllrohr: zwischen Hüllrohr/Bohrlochwand: Stufe 2a: ≥ 20 mm Stufe 3a: ≥ 40 mm Mit Hüllrohr: Hüllrohr/Stahl Stufe 2a und 3a: ≥ 20 mm (auf Baustelle) Stufe 2a und 3a: ≥ 5 mm (im Werk gefertigt)
SIA 267/1:2013 Ungespannte Anker	---
SIA 118/267:2019 (Ungespannte Anker, Anhang D und G)	D.2.2.5: ≥ 10 mm zur Bohrlochwand
SN EN 14490:2010 Bodenvernagelung	Überdeckungen gemäss Tabelle B.4 , abhängig von Korrosivität und Nutzungsdauer: in der Regel 10 bis 75 mm
SIA 267:2013 Kapitel 10: vorgespannte Anker	---
SIA 267/1:2013 Vorgespannte Anker	---
SIA 118/267:2019 (Vorgespannte Anker, Anhang D)	D.2.2.5: ≥ 10 mm zur Bohrlochwand (Stahlzugglieder und Korrosionsschutzumhüllungen)
SN EN 1537:2013 Vorgespannte Anker	6.3.1.3: Verpressmörtelumhüllung > 10 mm in der Verankerungslänge (temporäre Anker, direkt Bohrloch verfüllt) 6.4.2.4: > 5 mm (im Hüllrohr, im Werk hergestellt)

I.6 Prüfung des Korrosionsschutzes in verschiedenen Normen

Prüfung Korrosionsschutz	
SIA 267:2013 Kapitel 9: (Mikro-)Pfähle	
SIA 267/1:2013 Pfähle	5.2.3.5: Prüfung des Korrosionsschutzes von Mikropfählen der Korrosionsschutzstufen 2a und 3a: Widerstandsmessung (Messungen I bzw. II) gemäss 6.2.5
SIA 118/267:2019 (Pfähle, Anhang B)	
EN 14199:2015 Mikropfähle	6.4.9: Verpressmörtel: Ständige Qualitätskontrolle während Injektionsarbeiten, "Frischbetonkontrollen" und Herstellung von Rückstellproben
SIA 267:2013 Kapitel 11: ungespannte Anker	11.7.1.3: Prüfung Korrosionsschutz gemäss mitgeltenden Bestimmungen in SIA 267/1 bzw. SIA 118/267 und SN EN 14490. 11.7.5: Elektrische Widerstandsmessung I (alle Anker) und II (10 % der Anker) gemäss SIA 267/1 (Überprüfung des Hüllrohrs, Schutzstufen 2a und 3a)
SIA 267/1:2013 Ungespannte Anker	7.2.4: Prüfung des Korrosionsschutzes von Mikropfählen der Korrosionsschutzstufen 2a und 3a: Widerstandsmessung (Messungen I bzw. II) gemäss 6.2.5 4.3.3: Überprüfbarkeit der Wirksamkeit des umfassenden Korrosionsschutzes von Kontrollankern während der gesamten Nutzungsdauer
SIA 118/267:2019 (Ungespannte Anker, Anhang D und G)	---
SN EN 14490:2010 Bodenvernagelung	9.3.3: Prüfung der Einpressmittel gemäss SN EN 445/446/447
SIA 267:2013 Kapitel 10: vorgespannte Anker	10.6.3.2.1: Praktisch immer ist umfassender (überprüfbarer) Schutz erforderlich. 10.7.4: Elektrische Widerstandsmessung I (alle Anker) und II (5 bis 10 % der Anker) gemäss SIA 267/1 (Überprüfung der elektrischen Trennung Spannstahl - Bauwerk)
SIA 267/1:2013 Vorgespannte Anker	6.2.5: Prüfung des Korrosionsschutzes (Widerstandsmessung) 6.2.5.1: Durchführung der Messung I 6.2.5.2: Durchführung der Messung II
SIA 118/267:2019 (Vorgespannte Anker, Anhang D)	---
SN EN 1537:2013 Vorgespannte Anker	6.5.1.12/13: Hüllrohr muss in situ geprüft werden können
ÖNORM B 4456:2021 Kapitel 6.1 Verpressanker	7.3: Überprüfung der Verfüllung der freien Ankerlänge im Ankerkopfbereich von 30 % der Anker, Endoskopie
ÖNORM B 4456:2021 Dauerhaftigkeit von Verankerungen	7: Qualitätssicherung, Verantwortlichkeiten (Planung bzw. Ausführung)
SIA 269/7:2011 Erhaltung von Tragwerken Geotechnik	7.1.7: Überwachung verankerter Bauwerke während Restnutzungsdauer gemäss SIA 267 und messtechnisch. Anhang C: Spezielle Spannprobe für die Prüfung bestehender Anker

Glossar

Begriff	Bedeutung
ASTRA	Bundesamt für Strassen (ASTRA)
CCP	Beschichtung (CCP, coating corrosion protection)
CEN	Europäisches Komitee für Normung (CEN)
DCP	doppelter Korrosionsschutz (DCP, en: double corrosion protection)
DIN	Deutsches Institut für Normung (DIN)
EC	Euro Code, Europäisches Normenwerk
EN	Europäische Norm (EN)
GCP	Zementumhüllung (GCP, en: grout cover protection)
IEEE	The institute of electrical and electronics engineers (IEEE)
ISO	Internationale Organisation für Normung (ISO)
KS	Korrosionsschutz
KWK	Korrosionswiderstandsklasse nach Merkblatt SIA 2029
MCP	materialbedingter Korrosionsschutz (MCP, en: material related corrosion protection)
SCP	einfacher Korrosionsschutz (SCP, en: single corrosion protection)
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA)
SN	Schweizer Norm (SN)
SNV	Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV)
STA	Korrosionsszuschlag STA, en: sacrificial thickness allowance)
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)
ZCP	Verzinkung (ZCP, en zinc corrosion protection)
ZÜ	Zementüberdeckung (GCP)

Literaturverzeichnis

Normen

- | | |
|------|---|
| [1] | Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2015), „ Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Mikropfähle “, SN EN 14199 |
| [2] | Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2015), „ Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Bohrpfähle “, SN EN 1536 |
| [17] | Schweizerische Normen-Vereinigung SNV (2003), „ Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe - Korrosionswahrscheinlichkeit in Böden - Teil 2: Niedrig- und unlegierte Eisenwerkstoffe “, SN EN 12501-2 |
| [19] | Deutsches Institut für Normung DIN (2018), „ Korrosion der Metalle - Korrosionswahrscheinlichkeit metallener Werkstoffe bei äußerer Korrosionsbelastung - Teil 3: Rohrleitungen und Bauteile in Böden und Wässern “, DIN 50929-3 |
| [27] | Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2013), „ Geotechnik “, Norm SIA 267 |
| [28] | Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2019), „ Befestigungen in Beton und Mauerwerk “, Norm SIA 179 |
| [30] | Schweizerische Normen-Vereinigung SNV (2020), „ Grundlagen des kathodischen Korrosionsschutzes von metallenen Anlagen in Böden und Wässern “, |
| [31] | Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2019), „ Allgemeine Bedingungen für geotechnische Arbeiten “, Norm SIA 118/267 |
| [32] | Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2013), „ Betonbau “, Norm SIA 262 |
| [33] | Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2018), „ Allgemeine Bedingungen für Betonbau “, Norm SIA 118/262 |
| [34] | Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2013), „ Stahlbau “, Norm SIA 263 |
| [35] | Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2020), „ Stahlbau - Ergänzende Festlegungen “, Norm SIA 263/1 |
| [36] | Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2018), „ Allgemeine Bedingungen für Stahlbau “, Norm SIA 118/263 |
| [37] | Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2021), „ Beton-Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Komformität “, SN EN 206 |
| [38] | Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2010), „ Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Bodenvernagelung “, SN EN 14490 |
| [40] | Electrosuisse (2004), „ Schutz gegen Korrosion durch Streuströme aus Gleichstromanlagen “, SN EN 50162 |
| [41] | Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2019), „ Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden - Teil 1: Benennung und Beschreibung (ISO 14688-1:2017) “, SN EN ISO 14688-1 |
| [42] | Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2019), „ Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden - Teil 2: Grundlagen für Bodenklassifizierungen (ISO 14688-2:2017) “, SN EN ISO 14688-2 |
| [43] | Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2013), „ Grundlagen der Projektierung von Tragwerken “, Norm SIA 260 |
| [44] | Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2013), „ Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Verpressanker “, SN EN 1537 |
| [45] | Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2022), „ Vorbeugung von Schäden durch die Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) bei Betonbauten “, SIA 2042 |
| [46] | Schweizerische Normen-Vereinigung SNV (2018), „ Beschichtungsstoffe - Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme - Teil 2: Einteilung der Umgebungsbedingungen (ISO 12944-2:2017) “, SN EN ISO 12944-2 |
| [47] | Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2007), „ Eurocode 3 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 5: Pfähle und Spundwände “, SN EN 1993-5 |
| [48] | Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2007), „ Einpressmörtel für Spannglieder - Allgemeine Anforderungen “, SN EN 447 |

[52]	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2004), „ Eurocode 7 - Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln “, SN EN 1997-1
[53]	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2015), „ Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Verdrängungspfähle “, SN EN 12699
[64]	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2001), „ Ungespannte Boden- und Felsanker (Nägel) mit Vollverbund “, SIA V191/1
[67]	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2007), „ Einpressmörtel für Spannglieder - Prüfverfahren “, SN EN 445
[68]	Austrian Standards International (2021), „ Geotechnik - Dauerhaftigkeit von Verankerungen “, ÖNORM B4456

Richtlinien

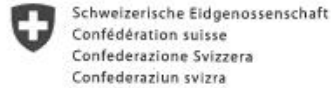
[18]	American Water Works Association (1999), „ American Water Works Association, Standards for Determining Corrosivity of Soil “, AWWA Specification C-105
[29]	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2013), „ Nichtrostender Betonstahl “, Merkblatt 2029
[39]	C. French National Research Project (1993), „ Recommendations Clouterre 1991 : soil nailing recommendations 1991, for designing, calculating, constructing and inspecting earth support systems using soil nailing “. (Federal Highway Administration, Washington D.C).
[50]	P. J. Sabatini, I. National Highway, R. B. Ryan, Associates, C. Association of Drilled Shaft (2005), „ Micropile design and construction guidelines : reference manual “. (U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, National Highway Institute, Washington, D.C).
[61]	C. Institut Pour Le Recherche Et L'Experimentation En Genie, C. Institut Pour Le Recherche Et L'Experimentation En Genie, Clouterre, Irex (2002), „ Additif 2002 aux recommandations Clouterre 1991: pour la conception, le calcul, l'execution et le controle des soutènements realises par clouage des sols “. (Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussees, Paris).
[62]	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (1995), „ Ungespannte Boden- und Felsanker “, Merkblatt SIA 2010
[65]	Bundesamt für Umwelt (BAFU) (2019), „ Typenliste Ankermörtel “,

Dokumentationen

[3]	M. Stefanoni, U. Angst, B. Elsener (2019), „ Electrochemistry and capillary condensation theory reveal the mechanism of corrosion in dense porous media “, Nature Materials, 18,
[4]	G. Carnitz, T.-G. Vinka (1988), „ Corrosion of steel and metal-coated steel in Swedish soils - effects of soil parameters. I: Effects of soil characteristics on corrosion “, in STP19708S, J. D. Palmer, Editor. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
[5]	F. Fontenay, A. Hildebrand, L. Nielsen, A. J. Olesen (2022), „ Soil corrosivity – What the standards say and what can be actually measured “, in CEOCOR international Congress 2022 Zürich, CEOCOR, c/o SYNERGRID, Brussels, Belgium.
[6]	W. Schwenk (1983), „ Bemerkungen zur alkalischen Korrosion von Eisen und zu den damit verbundenen Grundlagenfragen “, Werkstoffe und Korrosion, 34/83.
[7]	F. Martinelli-Orlando, W. Shi, U. Angst (2020), „ Corrosion Behavior of Carbon Steel in Alkaline, Deaerated Solutions: Influence of Carbonate Ions “, ECS Journal of The Electrochemical Society, 167 / 061503,
[8]	F. Kajiyama (2022), „ The role of HCO₃ and iron bacteria in the tubercle formation on ductile iron pipelines in aerobic alkaline soil “, in CEOCOR international Congress 2022 Zürich, CEOCOR, c/o SYNERGRID, Brussels, Belgium.
[9]	M. Büchler (2021), „ Bakteriell beeinflusste Korrosion an Rohrleitungen: Einflussfaktoren und Konsequenzen für die betriebliche Bewertung der Korrosionsgefährdung “, 3R, 06/2021.
[10]	W. v. Baeckmann, W. Schwenk (1999), „ Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes “. (Wiley-VCH, Weinheim).
[11]	U. Angst <i>et al.</i> (2016), „ Cathodic protection of soil buried steel pipelines – a critical discussion of protection criteria and threshold values “, Materials and Corrosion, 11, 67.
[12]	(2017), „ Cathodic Protection Effectiveness: A Review of Protection Criteria, Threshold Values, and Evaluation of Alternative Methods “, E. P. R. I. EPRI,
[13]	M. Romanoff (1957), „ Underground Corrosion of Steel, NBS Circular 579 “. (NBS Circular).
[14]	S. Grobe, W. Prinz, H.-G. Schöneich, J. Wingender (1996), „ Einfluss sulfatreduzierender Bakterien auf den kathodischen Korrosionsschutz “, Materials and Corrosion, 47.
[15]	U. R. Evans (1923), „ The electrochemical character of corrosion “, in Annual Autumn Meeting, Manchester,
[16]	M. Pourbaix (1974), „ Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions “. (NACE, Houston, TX).

-
- [20] M. Büchler (2020), „**On the mechanism of cathodic protection and its implications on criteria including AC and DC interference conditions**”, Corrosion, 76,
-
- [21] U. Angst, B. Elsener, C. K. Larsen, Ø. Vennesland (2009), „**Critical chloride content in reinforced concrete - A review**”, Cement and Concrete Research, 39,
-
- [22] J. C. Scully (1980), „**The interaction of strain-rate and repassivation rate in stress corrosion crack propagation**”, Corrosion Science, 20,
-
- [23] R. R. Fessler, K. Krist (2000), „**Research Challenges Regarding Stress-Corrosion Cracking of Pipelines**”, in Corrosion 2000, NACE, Houston, TX, USA.
-
- [24] R. N. Parkins (2000), „**A review of stress corrosion cracking of high pressure gas pipeline**”, in Corrosion 2000, NACE, Houston, TX, USA.
-
- [25] J. Engblom, B. Sandberg (2019), „**Investigations of necking of pilings**”, in CEOCOR international Congress 2018 Copenhagen, CEOCOR, c/o SYNERGRID, Brussels, Belgium.
-
- [26] C.-H. Voûte, M. Büchler (2022), „**Wasserqualität in Fernwärmesystemen**”, Aqua & Gas, 2/2022,
-
- [49] C. A. Lazarte *et al.* (2015), „**SOIL NAIL WALLS - REFERENCE MANUAL**”, FHWA-NHI-14-007, U. S. D. o. Transportation, F. H. Administration,
-
- [51] V. Elias, K. L. Fishman, B. R. Christopher, R. R. Berg (2009), „**Corrosion/Degradation of Soil Reinforcements for Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes**”, FHWA-NHI-09-087, U. S. D. o. Transportation, F. H. Administration, Washington, D.C.
-
- [54] L. Wichter, W. Meininger (2022), „**Verankerungen, Vernagelungen und Mikropfähle in der Geotechnik**”. Bauingenieur-Praxis (Ernst & Sohn, Weinheim, Germany, ed. 2. aktualisierte Auflage.).
-
- [55] M. Blandenier (1978), „**Le micropieu et ses applications**”, Mitteilungen der Schweizerische Gesellschaft für Boden und Felsmechanik, 99,
-
- [56] H.-W. Koreck (1978), „**Diskussionsbeitrag zum Thema "Kleinbohrpfähle"**”, Mitteilungen der Schweizerische Gesellschaft für Boden und Felsmechanik, 99,
-
- [57] A. De-Berti (1979), „**Pfahlgründung im Inneren des Altbaues des Theater-Casinos Zug**”, Schweizer Ingenieur und Architekt, 97, 9.
-
- [58] A. Müller (1961), „**Der MV-Pfahl**”, Schweizer Bauzeitung, 79, 33.
-
- [59] J.-C. OTT (1965), „**Les ancrages en rochers ou dans le sol et les effets de la précontrainte**”, Schweizerische Gesellschaft für Bodenmechanik und Foundationstechnik, 62,
-
- [60] M. Ladner (1966), „**Erfahrungen aus den Versuchen an Felsankern**”, Schweizerische Bauzeitung, 84, 40.
-
- [63] M. d. S. G. f. B.-u. Felsmechanik (1999), „**Bodenverbesserung: Vernagelung, Jetting und Geogitter**”, in Frühjahrstagung 23.04.1999, 138, Mitteilungen der Schweizerischen Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik.
-
- [66] Y. K. Shiu, W.M.Cheung (2003), „**Long-term durability of steel soil nails**”, GEO Special Project Report No. SPR 3/2002, G. E. OFFICE, HONG KONG.
-

Projektabschluss



Eidgenössisches Département 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: 10.07.2023

Grunddaten

Projekt-Nr.: AGB 2018/004
Projekttitel: Sachstandsbericht zur Dauerhaftigkeit von Mikropfählen und permanenten ungespannten Ankern
Enddatum: 31.08.2023

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Ziel des vorliegenden Projektes war es, einen Sachstandsbericht zur Dauerhaftigkeit von Mikropfahl-Systemen zu erarbeiten, welcher die aktuelle Problematik in der Umsetzung des Korrosionsschutzes beschreibt, analysiert, bewertet und Empfehlungen für Normen und Anwendungen erarbeitet sowie die offenen Fragen und den Forschungsbedarf formuliert.

Die folgenden Themengebiete sind Bestandteil des Berichts:

- Grundlagen der Korrosionsprozesse von Mikropfählen und permanenten ungespannten Ankern im Boden
- Übersicht über die verschiedenen, bei Mikropfählen und permanenten ungespannten Ankern eingesetzten Korrosionsschutzsysteme
- Übersicht über die nationalen und internationalen Normvorschriften zu Mikropfählen und permanenten ungespannten Ankern
- Beschreibung der verschiedenen, am Markt erhältlichen und dem Stand der Technik entsprechenden Systeme für Mikropfähle und permanente ungespannte Anker
- Beschreibung der praktischen Ausführung (Einbau) der verschiedenen Systeme
- Beschreibung und Beurteilung möglicher Fehlerquellen, Ausführungsmängel, Ausführungskontrollen und Massnahmen zur Qualitätssicherung
- Empfehlungen für Anpassungen und Ergänzungen der Normvorschriften
- Offene Fragen und Empfehlungen für zukünftige Forschungsarbeiten



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Zielerreichung:

Die im Projektantrag formulierten Ziele wurden erreicht.

- Die aktuelle Problematik in der Umsetzung des Korrosionsschutzes von Mikropfählen und permanenten ungespannten Ankern wird beschrieben, analysiert und bewertet.
- Es werden die offenen Fragen und der Forschungsbedarf dargelegt.
- Die Erkenntnisse liefern wichtige Grundlagen für die Festlegung von Anforderungen in Normen und Richtlinien.

Folgerungen und Empfehlungen:

Die Sachlage bezüglich Gefährdungen und Risiken bei Mikropfählen und ungespannten Ankern wird beschrieben. Für die Erarbeitung von Normen und Richtlinien werden die folgenden Empfehlungen gemacht:

- Klärung der Begriffe und Definitionen
- Konsistente Regelung für alle Systeme (gebohrte Mikropfähle, gerammte Pfähle, ungespannte Anker)
- Erarbeitung einer einfachen, praxistauglichen Wegleitung für die Klassierung des Baugrunds (Korrosivität)
- Erarbeitung von einfachen, praxistauglichen Vorgaben für eine risikobasierte Wahl des erforderlichen Schutzgrades, abhängig von der Korrosivität des Baugrunds, der Art der Einwirkungen, der Art des Tragwerks, Nutzungsdauer und Schadensfolgen.
- Beschreibung und Klassierung der am häufigsten angewendeten Systeme für Mikropfähle und ungespannte Anker bezüglich ihres Korrosionsschutzgrads, unter Berücksichtigung der Abhängigkeit der Schutzwirkung von der Ausführungsqualität
- Genauere Definition der geforderten bzw. zugelassenen Stahlqualitäten, Hinterfragung der anzuwendenden Kriterien
- Hinterfragen der unterschiedlichen Anforderungen für Druck- und Zugpfähle

Im Rahmen der Erarbeitung des Berichts hat sich bei verschiedenen Fragestellungen gezeigt, dass für die Festlegung der Anforderungen an die Anker- und Pfahlsysteme die notwendigen Grundlagen fehlen oder nur teilweise vorhanden sind. Daraus wird ein entsprechender Forschungsbedarf abgeleitet.

Publikationen:

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Brem

Vorname: Martin

Amt, Firma, Institut: SGK Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



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:

Das Dokument gibt einen breiten und umfassenden Überblick über den Sachstand der Dauerhaftigkeit von Mikropfählen und permanenten ungespannten Ankern im deutschsprachigen Raum. Der Bericht ist sorgfältig erarbeitet worden und deckt die wesentlichen Fragestellungen sehr gut ab. Es wird klar, dass die Themen der Dauerhaftigkeit und des Korrosionsschutzes sehr komplex sind und deshalb diesbezüglich ein weiterer Forschungsbedarf besteht.

Umsetzung:

Der Bericht beschreibt die Grundlagen des Korrosionsschutzes von Mikropfählen und permanenten ungespannten Ankern. Eine Übersicht über die nationalen und internationalen Normvorschriften zu Mikropfählen und permanenten ungespannten Ankern (Systemanforderungen, Korrosionsschutz, Ausführungsbestimmungen, Widersprüche, Mängel) wurde erarbeitet. Eine Analyse der am Markt erhältlichen und dem Stand der Technik entsprechenden Systeme für Mikropfähle und permanente ungespannte Anker wurde durchgeführt. Mittels einer Umfrage bei Unternehmern und Lieferanten wurden Daten zu Anwendungsgebiet und Häufigkeit ermittelt. Die Probleme in Bezug auf die Dauerhaftigkeit bei der praktischen Ausführung und der verfügbaren Verfahren zur Sicherstellung der Qualität wurden analysiert. Die Sachlage bezüglich Gefährdungen und Risiken bei Mikropfählen und ungespannten Ankern wurde beschrieben und es wurden Empfehlungen für Anpassungen und Ergänzungen der Normvorschriften gegeben.

weitergehender Forschungsbedarf:

- Bestimmung der minimal notwendigen Zementsteinumhüllung für einen ausreichenden Korrosionsschutz
- Auswirkung von Rissen in der Zementsteinumhüllung durch Zug- und Biegebeanspruchungen und durch Nachinjektionen
- Dauerhaftigkeit von Pfahl-Systemen mit einer Zementsteinumhüllung aus auf Nachhaltigkeit optimierten Zementsorten
- Nutzung von Maschinendaten für die Qualitätsüberwachung beim Einbau von Mikropfählen

Einfluss auf Normenwerk:

Der Bericht macht Empfehlungen für die Neuregelung der Anforderungen an den Korrosionsschutz, welche im Rahmen der Einführung des Eurocodes der 2. Generation in der Schweiz umgesetzt werden sollen.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Käser

Vorname: Martin

Amt, Firma, Institut: Bundesamt für Strassen ASTRA

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission: