

**Tragverhalten von Verpressankern
unter kalklösender CO₂-Belastung.
Nachfolgeprojekt**

T 3167

T 3167

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2008

ISBN 978-3-8167-7650-5

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

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

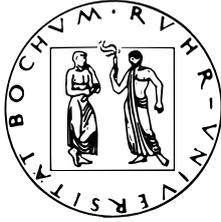
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

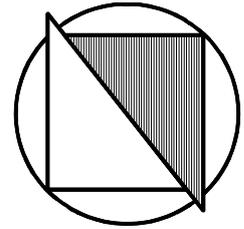
E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de



RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM

Fakultät für Bauingenieurwesen
Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik
Prof. Dr.-Ing. habil. Th. Triantafyllidis



**Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben
Nachfolgeprojekt**

„Tragverhalten von Verpressankern unter kalk- lösender CO₂-Belastung“

gefördert durch das Deutsche Institut für Bautechnik

Aktenzeichen P 32-5-11.51-1002/01

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Th. Triantafyllidis
Bearbeiter: Dipl.-Ing. Verena Schreiner

Dezember 2007 ©

1 Einleitung

Durch die Anwesenheit von kalklösender Kohlensäure im anstehenden Baugrund bzw. Grundwasser kommt es zu einer chemischen Reaktion mit dem Zementkörper des Verpressankers. Die Oberfläche des Zementes wird durch die kalklösende Kohlensäure angegriffen und verändert sich, wobei das gebildete Calciumhydroxid gelöst wird. Dies hat einen Einfluss auf die Tragfähigkeit des Verpresskörpers und somit des gesamten Ankers. In der DIN 4125 [1] wurde der Einsatz von Verpressankern in aggressivem Baugrund bzw. Grundwasser stark eingeschränkt. Laut der vorliegenden aber noch nicht bauaufsichtlich zugelassenen DIN 1537 [2] soll bei der Auswahl des Zementes das Vorhandensein von aggressiven Substanzen wie z.B. kalklösende Kohlensäure im umgebenden Baugrund berücksichtigt werden.

Versuchsergebnisse von Manns [9] zeigen eine Abnahme der Ankertragfähigkeit infolge des lösenden Angriffes der Kohlensäure. Weitergehende Untersuchungen bei Variation der relevanten Versuchsrandbedingungen zur genaueren Beschreibung der Problematik des Tragkraftverlusts und deren Ursachen wurden bislang jedoch nicht durchgeführt.

Der Tragkraftverlust kann im Wesentlichen auf zwei Faktoren zurückgeführt werden. Die Ausbildung der korrodierten Randzone führt zum einen zu einer Reduzierung des Reibungswiderstandes in der Scherfuge (Herabsetzung des Reibungswinkels) und zum anderen zu einem Verspannungsverlust des Ankers im umgebenden Boden durch Massenverlust und Eindringen von Bodenmaterial in das Silicatgel der korrodierten Randzone.

Im Rahmen der ersten Antragsphase dieses Vorhabens wurde die Abhängigkeit der Korrosionstiefe von der CO_2 -Konzentration (30, 60 und 90 mg kalklösende Kohlensäure/l Wasser), vom anstehenden Boden und von der Korrosionsdauer (bis zu 12 Monate lang andauernder Angriff) im Rahmen von Umströmungsversuchen bestimmt. Dabei wurden 3 Böden mit unterschiedlichen Durchlässigkeitsbeiwerten ausgewählt. Bei gleichbleibendem hydraulischen Gefälle ergaben sich daraus unterschiedliche Grundwasserfließgeschwindigkeiten. Deutlich konnten die Einflüsse von Grundwasserfließgeschwindigkeit, CO_2 -Gehalt und Korrosionsdauer auf die Korrosionstiefe gezeigt werden. Weiterhin wurden Rahmenscherversuche zur Bestimmung des Reibungswinkels zwischen korrodiertem Zementkörperoberfläche und Boden durchgeführt und die Ergebnisse mit denjenigen von unbeeinflussten Nullversuchen (also ohne CO_2 -Angriff) verglichen. Die durchgeführten Scherversuche haben ergeben, dass sich der Reibungswinkel infolge der Ausbildung einer korrodierten Randzone nur geringfügig verringert. Der Peakreibungswinkel verringert sich dabei auf minimal 92 % der Werte ohne CO_2 -Angriff, und der Restreibungswinkel nimmt um maximal 3 % gegenüber den unkorrodierten Ausgangswerten ab. Für nähere Erläuterungen der bisher durchgeführten Versuche wird auf die angegebenen Veröffentlichungen verwiesen [3], [4], [5], [6], [7], [8].

Die Abnahme des Verspannungszustandes um einen zylindrischen Anker infolge der Ausbildung einer korrodierten Randzone konnte durch die Scherversuche nicht erfasst werden, da dieser Effekt am ebenen System nicht auftritt. Daher sollen in der zweiten Antragsphase zusätzlich Ausziehversuche an korrodierten Betonankern durchgeführt werden und so der Ver-

lust der Tragfähigkeit bestimmt werden. Ziel der zweiten Antragsphase ist es, den zeitlichen Verlauf des Verlustes der Ankertragfähigkeit unter Korrosion zu bestimmen und zu Reduktionsfaktoren hinsichtlich der Ankertragkraft gegebenenfalls in Abhängigkeit von der Korrosionsdauer, dem anstehenden Boden und der Ankergeometrie zu kommen. Zu diesem Zwecke wird in Kapitel 2 kurz auf die bereits im Vorfeld von Manns durchgeführten Ausziehversuche [9] und die kleinmaßstäblichen Ausziehversuche von Hof [5] eingegangen. In Abschnitt 3 werden die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten großmaßstäblichen Ausziehversuche, die in Anlehnung an den Versuchsaufbau von Manns [9] durchgeführt wurden, ausführlich beschrieben und die Ergebnisse präsentiert. Die Resultate werden in Kapitel 4 mit denen der kleinmaßstäblichen Ausziehversuche und den von Manns durchgeführten Versuchen verglichen und bewertet sowie ein Fazit bezüglich des Tragkraftverlustes von Verpressankern unter kalklösendem Kohlensäureangriff abgeleitet.

2 Bisherige Resultate

Im Folgenden sind alle Versuche und Überlegungen zusammengestellt, die nicht im Rahmen dieses Forschungsprojektes durchgeführt wurden aber trotzdem in die Bewertung der Versuchsergebnisse aus den Großversuchen einfließen.

2.1 Ausziehversuche von Manns

Bereits von Manns wurden im Rahmen einer vom DIBt geförderten Studie [9] Ausziehversuche an Ankerkörpern zur Bestimmung des Einflusses aggressiver Wässer und Böden auf das Langzeitverhalten von Verpressankern durchgeführt.

Der Versuchsaufbau war prinzipiell dem in Abschnitt 3 beschriebenen Versuchsaufbau bei den Großversuchen ähnlich. Daher soll hier lediglich auf die Unterschiede im Versuchsaufbau und der Durchführung eingegangen werden.

Die von Manns eingesetzte CO_2 Konzentration war mit 100 mg/l etwas höher als bei den im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Versuchen (90 mg/l), der Durchmesser der Anker betrug 110 mm, hier werden Durchmesser von 80 und 130 mm eingesetzt. Der verwendete Versuchsboden war ein Mittelsand. Die Sieblinie des von Manns eingesetzten Mittelsandes mit einem mittleren Korndurchmesser d_{50} von 0,44 mm liegt zwischen der der hier eingesetzten Bodenarten, nämlich eines Mittel- bis Grobsandes (Boden 1) und eines Fein- bis Mittelsandes (Boden 2) (s. Bild 3.1). Die Durchlässigkeit des Versuchsbodens betrug $3,9 \times 10^{-4}$ m/s.

In beiden Fällen wurden die Modellanker aus zylindrischen Bodenproben (\varnothing Manns ≈ 70 cm, \varnothing Großversuche = 100 cm) in einem Versuchsbehälter mit starrer Außenwandung herausgezogen. Während der Durchströmungsphase mit dem mit CO_2 angereicherten Wasser blieb die freie Oberfläche der Bodenprobe unbelastet. Beim Ausziehversuch wurde die Oberfläche belastet. Manns brachte die Auflast über eine starre Lastplatte, die über Zugstangen mit dem Behälterboden verspannt wurde, auf. Der Zugversuch selber erfolgte durch stufenweise Belastung des Ankers mit Laststufen von jeweils 1 kN. Nach Abklingen der Ankerkopfver-

schiebung wurde die nächste Laststufe aufgebracht. Die maximal aufnehmbare Ankerkraft war erreicht, wenn die Verschiebung des Ankers nicht mehr zur Ruhe kam.

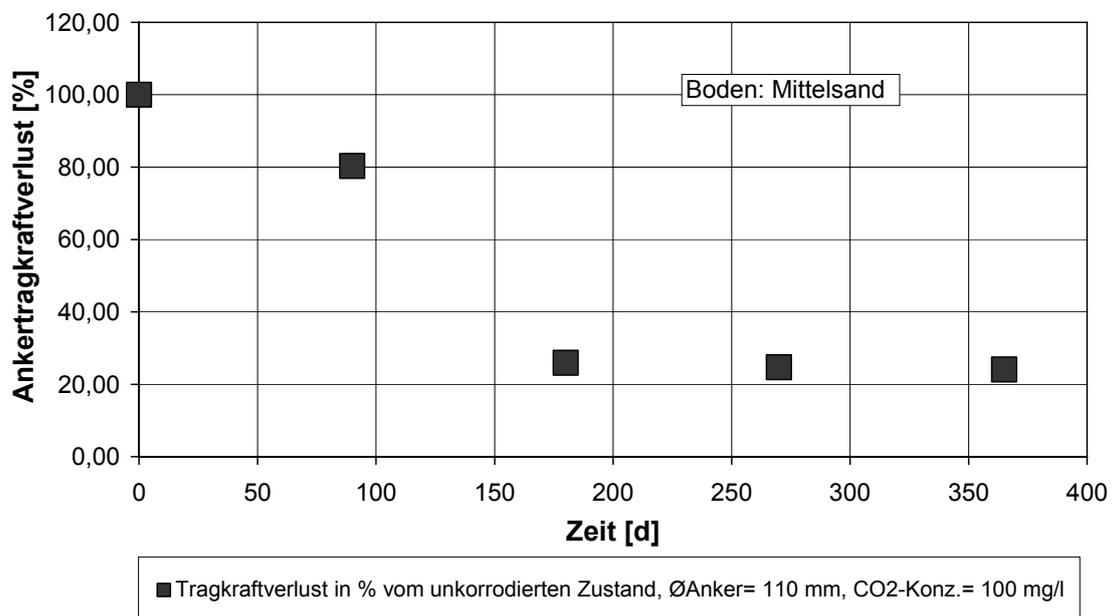


Bild 2.1 Übersicht Ergebnisse Ausziehversuche Manns [9]

Die von Manns gemessenen maximalen Ausziehkräfte bezogen auf den Mittelwert der Zugkräfte der unkorrodierten Versuche sind über den Korrosionszeitraum in Bild 2.1 aufgetragen. Bereits nach einer Korrosionsdauer von 3 Monaten sinkt die maximale Ankertragkraft auf 80 % des Wertes vom Ausgangszustand. Nach einem halben Jahr liegt die Tragfähigkeit des Ankers nur noch bei 25 % des Wertes vom Ausgangszustand. Längere Korrosionszeiträume haben keinen Einfluss mehr auf die Tragfähigkeit des Ankers, die Messwerte bleiben konstant.

2.2 Kleinmaßstäbliche Ausziehversuche

Ausziehversuche an Ankerkörpern wurden unter der gleichen Fragestellung bereits auch an kleinmaßstäblichen Versuchsgeometrien durchgeführt. Diese werden hier kurz beschrieben, da die daraus resultierenden Ergebnisse mit den Ergebnissen aus den Großversuchen verglichen werden sollen. Hier soll allerdings nur auf diejenigen Versuche eingegangen werden, die unter mit den Großversuchen vergleichbaren Randbedingungen durchgeführt wurden. Ein Überblick über alle in diesem Rahmen durchgeführten Versuche und deren Ergebnisse ist in [5] gegeben.

2.2.1 Versuchsrandbedingungen

Neben unkorrodierten Vergleichsversuchen wurden kleinmaßstäbliche Ausziehversuche an korrodierten Ankerkörpern nach unterschiedlicher Durchströmungsdauer des Versuchsaufbaus mit CO₂-haltigem Wasser (3, 6 und 12 Monate) durchgeführt. Die CO₂-Konzentrationen hierfür betragen 30, 60 und 90 mg/l. Für einen Vergleich dieser Ergebnisse mit denjenigen

der Großversuche sind nur die Versuche mit 90 mg/l CO₂-Belastung relevant. Die Ausziehversuche wurden in drei Versuchsböden mit unterschiedlichen Durchlässigkeiten durchgeführt, wobei hier nur die Versuche in Boden 1 und Boden 2 von Interesse sind, da diese Böden auch in den Großversuchen verwendet werden.

Die Anker waren in ihrem Aufbau ähnlich den bei den Großversuchen verwendeten Ankern und auch die Messtechnik war analog angebracht, allerdings hatten die Ankerkörper nur einen Durchmesser von 4 cm und eine Länge von 20 cm.

2.2.2 Versuchsaufbau

Die hier betrachteten kleinmaßstäblichen Ausziehversuche wurden im Unterschied zu den Großversuchen in einer modifizierten Triaxialzelle durchgeführt (s. Bild 2.2). Die zylinderförmige Bodenprobe, umschlossen von einer flexiblen Membran, besaß einen Durchmesser von 30 cm und eine Höhe von 40 cm. Der Anker wurde während des Einrieselns des Versuchsbodens mittels eines Zentrierkreuzes in der Triaxialzelle gehalten so dass er sich später mittig im Bodenkörper befand. Das Zentrierkreuz wurde am Kopf der Zelle montiert. Der Bodenkörper wurde durch Anschlüsse im Probenboden und –deckel von unten nach oben durchströmt.

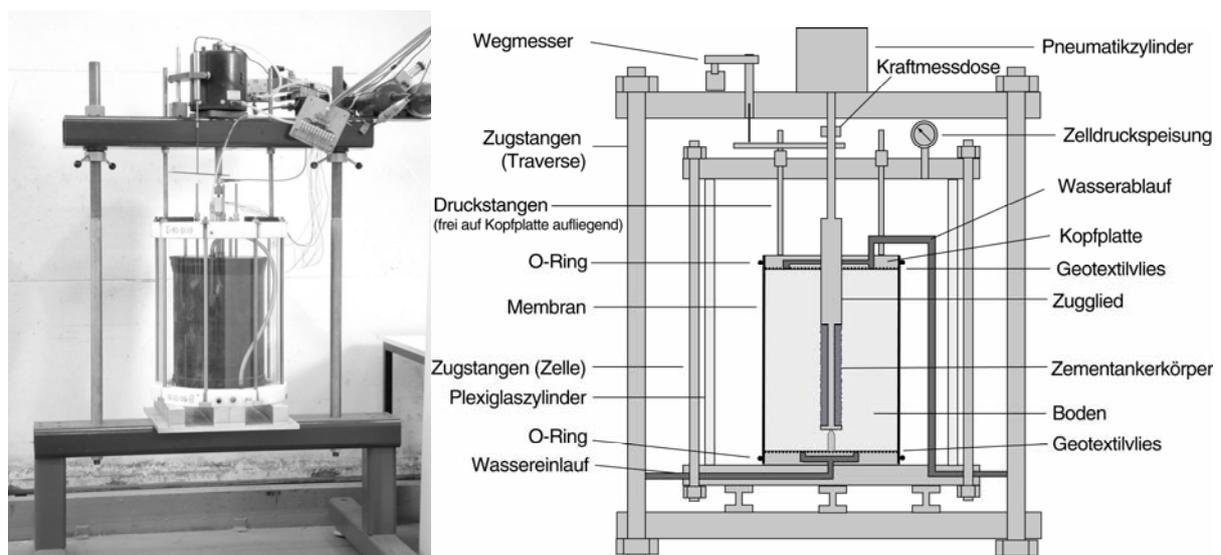


Bild 2.2 Versuchsaufbau kleinmaßstäbliche Ausziehversuche in Triaxialzelle

Über einen Druckluftanschluss wurde der Zelldruck von 1 bar auf das System aufgegeben. Dieser isotrope Druck wurde über den gesamten Korrosionszeitraum und über die Dauer des Ausziehversuchs konstant gehalten. Der Ausziehvorgang erfolgte kraftgesteuert mit einer Rate von 0,55 N/s.

Die unkorrodierten Vorversuche wurden trocken (d.h. ohne Durchströmung des Bodenkörpers) durchgeführt.

2.2.3 Versuchsergebnisse

Während des Ausziehversuches wurden die Ausziehkraft an der Kraftmessdose und den Messbolzen und zusätzlich der zurückgelegte vertikale Weg des Ankers gemessen. Die an der Kraftmessdose gemessene Ausziehkraft wurde über die Zeit aufgetragen und aus diesem Verlauf dann die maximale Ausziehkraft für den Versuch ermittelt. Bei den kleinmaßstäblichen Ausziehversuchen war ein Verlauf der Ankertragkraft über die Zeit analog zu dem in Bild 3.6 dargestellten Verlauf bei den Großversuchen zu beobachten.

In den folgenden Tabellen sind die maximalen, an der Kraftmessdose gemessenen Ausziehkraft für die unkorrodierten und korrodierten Anker für Boden 1 und Boden 2 aufgelistet.

Tabelle 2.1 Übersicht kleinmaßstäbliche Versuche Boden 1

Korrosion	Korrosionsdauer [d]	Trockendichte ρ_d [g/cm ³]	CO ₂ -Konzentration [mg/l]	$\varnothing_{\text{Anker}}$ [mm]	maximale Ausziehkraft [kN]
unkorrodiert	0	1,74	90	40	7,73
	0	1,74	90	40	7,77
	0	1,74	90	40	7,34
	0	1,74	90	40	7,56
	0	1,73	90	40	7,13
	0	1,74	90	40	7,68
90 Tage	90	1,72	90	40	6,64
193 Tage	193	1,74	90	40	7,47
365 Tage	365	1,73	90	40	6,81

Tabelle 2.2 Übersicht kleinmaßstäbliche Versuche Boden 2

Korrosion	Korrosionsdauer [d]	Trockendichte ρ_d [g/cm ³]	CO ₂ -Konzentration [mg/l]	$\varnothing_{\text{Anker}}$ [mm]	maximale Ausziehkraft [kN]
unkorrodiert	0	1,64	90	40	6,54
	0	1,63	90	40	6,46
	0	1,65	90	40	6,69
	0	1,66	90	40	6,38
	0	1,65	90	40	6,52
79 Tage	79	1,66	90	40	6,51
183 Tage	183	1,64	90	40	5,99
365 Tage	365	1,63	90	40	5,50

In Bild 2.3 ist die in den Versuchen im Boden 1 (enggestufter Mittel- bis Grobsand) gemessene maximale Ankertragkraft über die Korrosionsdauer aufgetragen. Für die Zeit $t = 0$ ist die Bandbreite und der Mittelwert der Versuche ohne CO₂-Beanspruchung dargestellt. Der Mittelwert beträgt etwa 7,5 kN. Die nach 90, 193 und 365 Tagen Korrosionsdauer gemessenen Ausziehkraft zeigen eine leicht abfallende Tendenz, wobei die nach 365 Tagen gemessene Ausziehkraft noch am unteren Rand der Streubreite der Zugversuche am unkorrodierten Ankerkörper liegt.

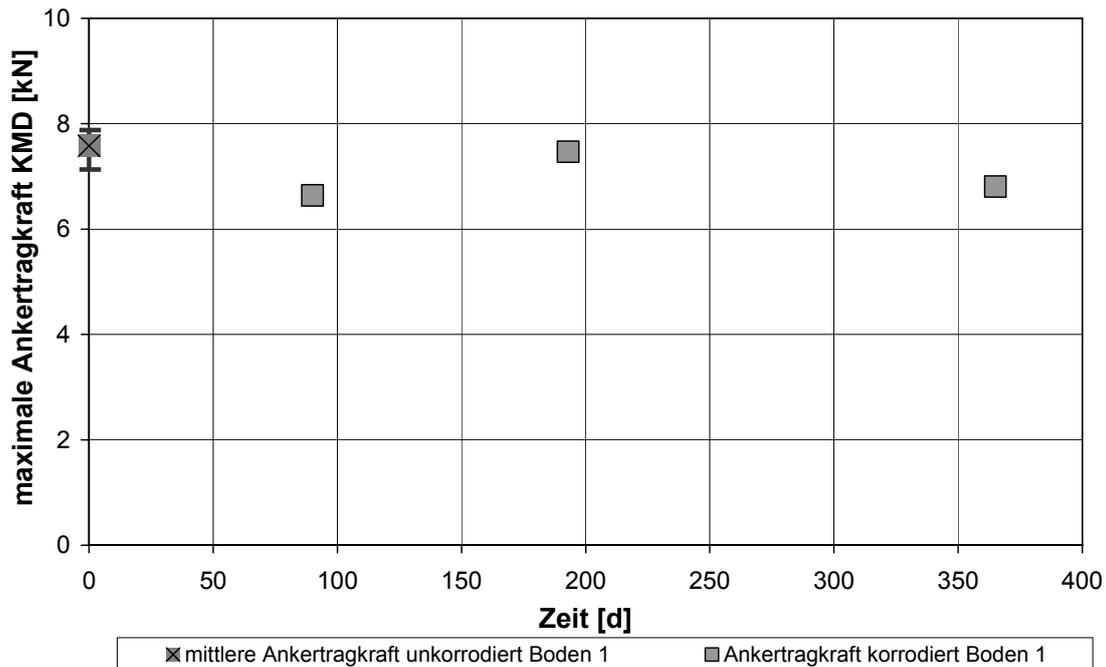


Bild 2.3 maximale Ankertragkraft aller Versuche (Boden 1, $\varnothing_{\text{Anker}} = 40 \text{ mm}$)

Im Boden 2 (enggestufter Fein- bis Mittelsand) liegt im unkorrodierten Zustand die Ausziehkraft für die Anker im Mittel bei 6,5 kN, die Bandbreite ist sehr gering. In Bild 2.4 ist zu erkennen, dass unter Korrosionseinfluss die Ankertragkraft kontinuierlich absinkt bis sie nach einem Jahr unter CO_2 -Korrosion bis auf 5,5 kN gefallen ist.

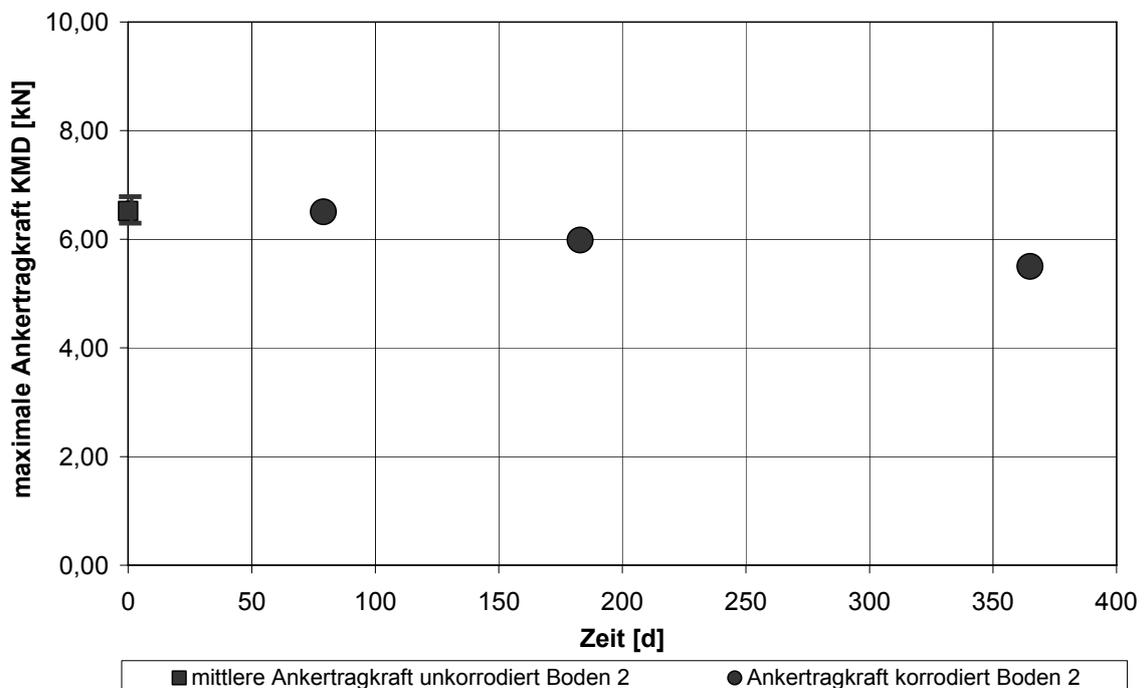


Bild 2.4 maximale Ankertragkraft aller Versuche (Boden 2, $\varnothing_{\text{Anker}} = 40 \text{ mm}$)

In Bild 2.5 ist der prozentuale Abfall der Ankertragkraft unter Korrosion, bezogen auf die mittlere Ausziehkraft der unkorrodierten Anker, dargestellt.

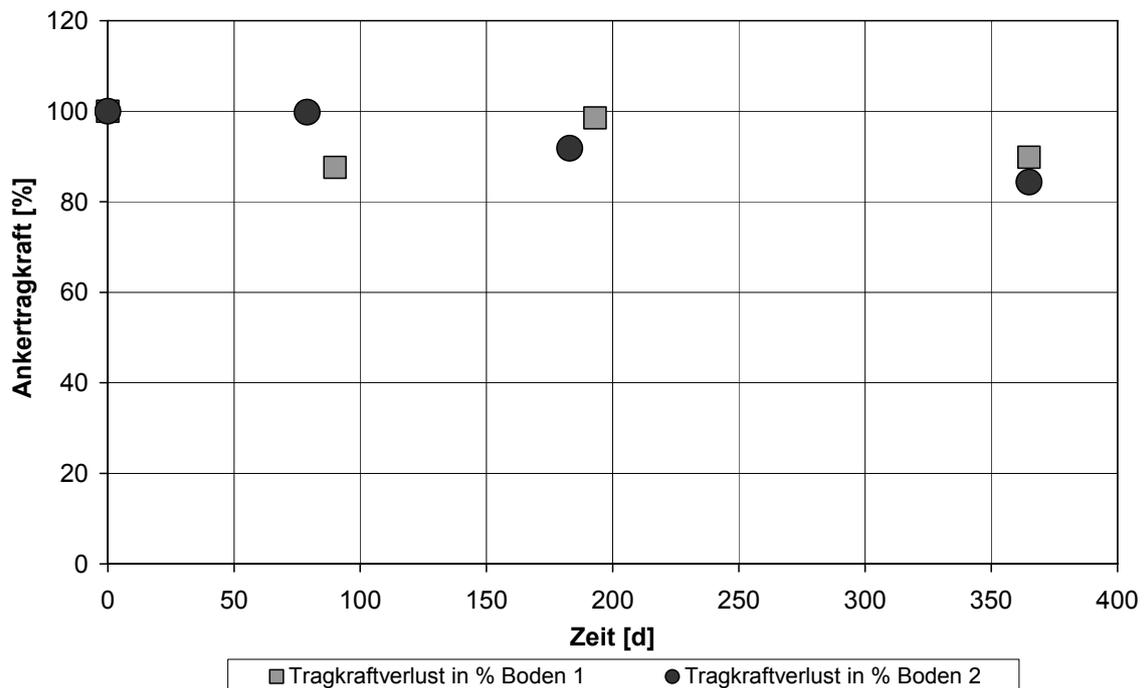


Bild 2.5 Verlauf der Ankertragkraft in Prozent vom unkorrodierten Zustand

Generell kann über die Versuchsergebnisse der kleinmaßstäblichen Ausziehversuche gesagt werden, dass in beiden Böden ein Abfall der Ankertragfähigkeit mit fortschreitender Korrosionsdauer zu beobachten ist. Im gröberen Boden 1 ist der Tragfähigkeitsverlust wenig ausgeprägt, nach einem Jahr Korrosionsdauer ist der Tragfähigkeit des Ankers auf 91 % des unkorrodierten Referenzwertes abgesunken. Unter Einbeziehung der Streubreite der Versuchsergebnisse ist diese Abnahme aber wenig signifikant. Im feineren Boden 2 (enggestufter Fein- bis Mittelsand) sinkt die Ankertragkraft über ein Jahr Korrosion kontinuierlich auf 84 % ab. Da die Streubreite bei diesen Versuchen sehr gering ist, ist hier eine deutliche Tragfähigkeitsabnahme festzustellen.

2.3 Korrosionstiefe

Im Rahmen der ersten Projektphase wurden Korrosionsversuche an Zementkörpern durchgeführt. Hierzu wurden Zementkörper entweder in Wasser gelagert oder in einen der drei Versuchsböden eingebaut und für unterschiedlich lange Zeiträume unter dem Einfluss von kalklösender Kohlensäure gelagert. Nach Ablauf der Korrosionsdauer wurde die Dicke der korrodierten Schicht unter einem Stereomikroskop bestimmt. Diese Versuche sind in [4] detailliert beschrieben.

Aus theoretischen Überlegungen zur rechnerischen Abschätzung der Korrosionstiefe wurden anhand bereits vorhandener Modelle aus der Literatur und anhand der Messdaten für Boden 1

und Boden 2 folgende Bestimmungsgleichungen zur Berechnung der Korrosionstiefe in Abhängigkeit von der Zeit und der Konzentration an kalklösender Kohlensäure abgeleitet:

$$d_{\text{Boden1}} = 0,0022 \cdot c^{0,6686} \cdot t^{0,5} \quad 2-1$$

$$d_{\text{Boden2}} = 0,00135 \cdot c^{0,6686} \cdot t^{0,5} \quad 2-2$$

mit : c : Konzentration an kalklösender Kohlensäure [mg/l]

t : Korrosionszeitraum [d]

In Bild 2.6 sind die in aus den Ergebnissen der Korrosionsversuche ermittelte Trendlinien für die Korrosionstiefe für Boden 1 und Boden 2 bei einer CO₂-Konzentration von 90 mg/l zu sehen.

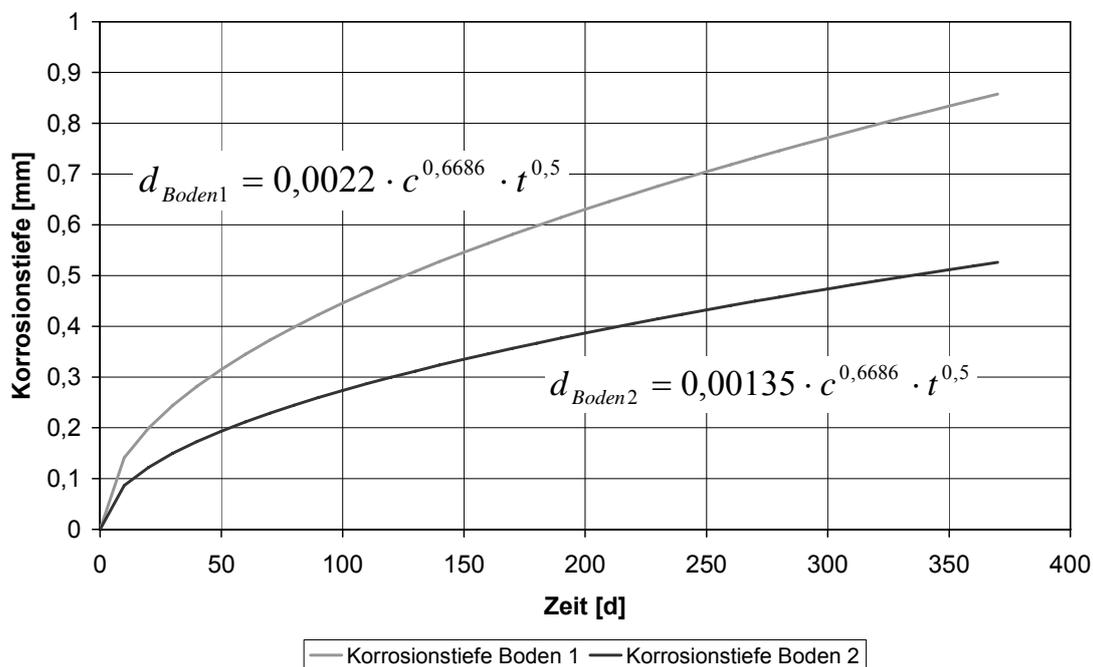


Bild 2.6 Trendlinie für die Korrosionstiefe bei einer CO₂-Konzentration von 90 mg/l

Die Korrosionstiefe für Boden 1 zeigt laut [4] den gleichen Verlauf wie diejenige der Zementkörper bei Wasserlagerung. Das liegt daran, dass aufgrund der hohen Durchlässigkeit von Boden 1 das CO₂ ungehindert an die Oberfläche des Körpers gelangen kann. Im Boden 2 ist die Korrosionstiefe über die Korrosionsdauer niedriger da die Durchlässigkeit des Bodens geringer ist und der Zustrom des CO₂-haltigen Wassers zur Oberfläche des Zementkörpers gehemmt wird.

Beide Kurven flachen im zeitlichen Verlauf ab. Das bedeutet dass es mit einer zunehmenden Korrosionsdauer zu einer Verlangsamung des Korrosionsfortschrittes kommt, da sich der diffusionsgesteuerte Transportprozess der kalklösenden Kohlensäure durch die Silicatgelschicht zur Zementkörperoberfläche mit zunehmender Dicke der Schicht verlangsamt. Im Versuchsboden 3 (entspricht Boden 2, modifiziert durch Zugabe von 5 % Quarzmehl; $k_f = 2,4 \cdot 10^{-7}$ m/s) war die erzielte Korrosionstiefe sehr gering und lag auch nach 9 Monaten Korrosionsdauer bei nur 0,1 mm.

Basierend auf den Ergebnissen der Korrosionsversuche und aufgrund von theoretischen Überlegungen wurde weiterhin von Hof [8] ein theoretischer Ansatz für die Korrosionstiefe unabhängig vom Boden ermittelt, in den die Durchlässigkeit als weiterer Parameter Eingang findet. Der Ansatz basiert auf einer allgemeinen Wurzelfunktion, die sich in der Literatur häufig zur Beschreibung des Korrosionsfortschritts wieder findet:

$$d = a \cdot \sqrt{c \cdot t} \quad 2-3$$

mit : d : Korrosionstiefe [mm]

a : Vorfaktor [-]

c : Konzentration an kalklösender Kohlensäure [mg/l]

t : Korrosionsdauer [d]

Dieser Ansatz wurde aufgrund von statistischer Auswertung der Ergebnisse der Korrosionsversuche in Abhängigkeit von der Durchlässigkeit des Bodens erweitert zu:

$$d = (0,00064 \cdot \ln k + 0,010257) \cdot \sqrt{c \cdot t} \quad 2-4$$

Die Korrosion der Zementoberfläche ist kein linear mit der Zeit fortschreitender Prozess, sondern er wird mit der Zeit immer langsamer, so dass auch die Dicke der korrodierten Randzone und daraus resultierend der Verspannungsverlust des Ankerkörpers im Boden auch nicht linear fortschreitet sondern mit der Zeit langsamer wird. In Böden mit sehr geringer Durchlässigkeit ist der Korrosionsvorgang ein sehr langsam fortschreitender Prozess. Erwähnenswerte Korrosionstiefen werden erst nach sehr langen Korrosionszeiträumen erwartet. Aufgrund der benötigten langen Korrosionsdauer ist dies aber experimentell nicht zu belegen.

2.4 Bisheriges Fazit

Die von Manns durchgeführten Ausziehversuche ergaben einen sehr großen Tragkraftverlust durch Korrosion von etwa 75 %, der bereits nach einer Korrosionsdauer von 6 Monaten auftrat. Nach einer größeren Korrosionsdauer sank die Tragfähigkeit nicht weiter ab.

Bei den kleinmaßstäblichen Versuchen konnte ein solch großer Verlust der Tragfähigkeit nicht beobachtet werden. Im gröberen Boden 1 gab es kaum eine Verminderung der Tragfähigkeit durch Korrosion, im feineren Boden 2 ist der Abfall mit einer um 16 % verminderten Ausziehungskraft nach einer Korrosion von einem Jahr größer.

Aufgrund der deutlich sichtbaren Ausbildung eines Grenzwertes bei den Versuchen von Manns und der unter 2.3 erläuterten Entwicklung der Korrosionstiefe, die der eines Diffusionsprozesses entspricht, wird davon ausgegangen, dass der Korrosionsprozess mit der Zeit durch die selbsthemmende Wirkung der Silicatgelschicht langsamer abläuft und so auch die Abnahme der Ankertragfähigkeit mit der Zeit zur Ruhe kommt.

In einem theoretischen Modell unter zusätzlicher Berücksichtigung konvektiver Transportprozesse durch die Silicatgelschicht würden die abnehmende Durchlässigkeit und die steigende Dicke der korrodierten Schicht mit fortschreitendem Korrosionsprozess den konvektiven Transport von kalklösender Kohlensäure an die Zementsteinoberfläche weiter behindern.

3 Großversuche

Die im Rahmen der zweiten Antragsphase durchgeführten Ausziehversuche sollen unter möglichst großmaßstäblichen Bedingungen durchgeführt werden um die Übertragung der Ergebnisse der kleinmaßstäblichen Versuche mit Ankerdurchmessern von 40 mm auf praxistgerechtere Dimensionen zu ermöglichen. Außerdem werden größere Ankerdurchmesser verwendet, um auch den Einfluss der Ankergeometrie auf die Ausziehkräfte beurteilen zu können und einen Vergleich mit den Versuchsergebnissen von Manns [9] zu ermöglichen.

3.1 Versuchsrandbedingungen

Aufgrund der in Kapitel 2 dargestellten Erkenntnisse sowie den aus den Versuchen von Manns [9] resultierenden Überlegungen zur Stagnation der Korrosion wird die Korrosionsdauer der Ausziehversuche auf maximal 9 Monate beschränkt.

Alle Versuche werden mit einer Konzentration an kalklösender Kohlensäure von 90 mg/l durchgeführt, da die Korrosionsversuche aus der ersten Antragsphase ergeben haben, dass der Einfluss der korrodierten Randzone auf das mechanische Verhalten der Zementkörperoberfläche bzw. deren Zusammensetzung nicht von der CO₂-Konzentration in Kombination mit der Korrosionsdauer abhängig ist, sondern nur von der Korrosionstiefe.

Bei den kleinmaßstäblichen Ausziehversuchen wurden drei unterschiedliche Versuchsböden verwendet. Auf die Untersuchung des feinsten Bodens aus der 1. Antragsphase wird verzichtet, da bei diesem ein Korrosionsfortschritt im Untersuchungszeitraum aufgrund seiner geringen Durchlässigkeit kaum festzustellen war. Daher werden für die Großversuche nur die Böden 1 und 2 verwendet. Damit ist eine Übertragung der bisher gewonnenen Erkenntnisse insbesondere bezüglich des Korrosionsfortschritts und der Abnahme der Reibungswinkel auf die Großausziehversuche möglich. Die Bodenkennwerte der untersuchten Böden sind aus der Tabelle 3.1 zu entnehmen. Ihre Sieblinien sind in Bild 3.1 dargestellt.

Tabelle 3.1 Bodenkennwerte

Bezeichnung	Einheit	Boden 1	Boden 2
Beschreibung		Rheinsand, abgeseibt auf 0,25 - 2 mm, enggestufter Mittel- bis Grobsand	enggestufter Fein- bis Mittelsand
$k_{10^{\circ}\text{C}}$	[m/s]	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$
d_{50}	[mm]	0,58	0,19
d_{10}	[mm]	0,31	0,13
$U = d_{60}/d_{10}$	[-]	2,29	1,62
ρ_s	[g/cm ³]	2,632	2,625
$\rho_{d, \text{min}}$	[g/cm ³]	1,476	1,357
$\rho_{d, \text{max}}$	[g/cm ³]	1,776	1,658

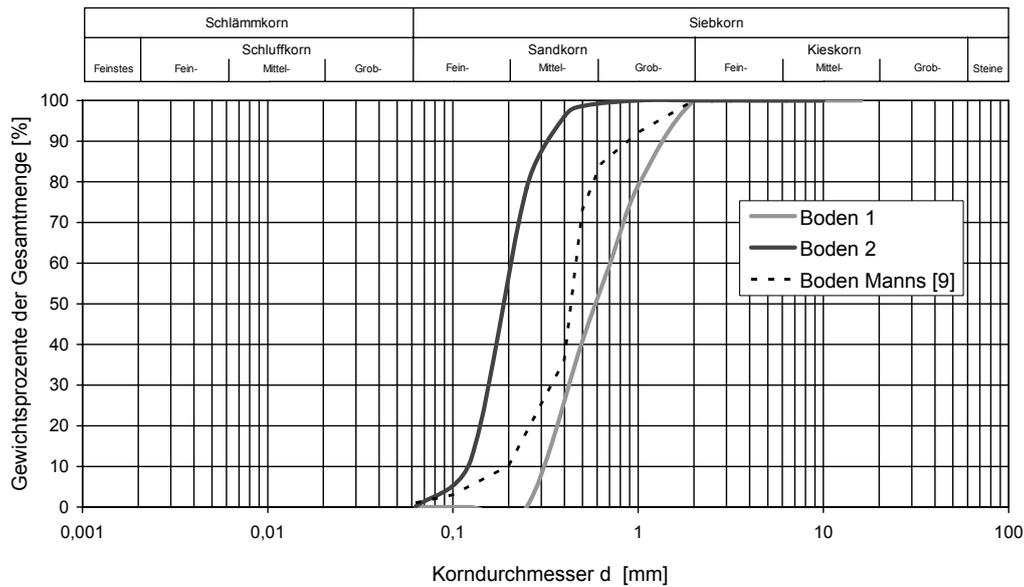


Bild 3.1 Sieblinien der Versuchsböden

Als Ankerdurchmesser werden 8 cm und 13 cm gewählt, im Gegensatz zu den kleinmaßstäblichen Vorversuchen mit einem Durchmesser von 4 cm.

3.2 Versuchsaufbau und -programm

3.2.1 Modellanker

Der Anker besteht aus einem Hohlzylinder aus Zementmörtel (Portlandzement CEM I 42,5 R, $w/z = 0,45$), der über das Stahlzugglied gestülpt wird. Der Außendurchmesser des Zementkörpers beträgt 8 cm bzw. 13 cm. Die Höhe des Verpresskörpers wird im Hinblick auf die Ausziehvorrichtung bzw. den Pneumatikzylinder auf 35 cm festgelegt. Der Lasteintrag erfolgt über eine Druckplatte am Ende des Zuggliedes in Anlehnung an das Prinzip des Druckrohrankers. In das Zugglied sind zwei Messbolzen integriert, mit denen über DMS-Streifen die Zugkraft redundant gemessen wird, die über die Zementkörperoberfläche in Form von Mantelreibung abgetragen wird. Der Vorteil dieses Ankeraufbaus (vgl. Bild 3.2) liegt darin, dass das Zugglied und die integrierte Messtechnik beliebig oft wieder verwendet werden kann und jeweils nur der Zementkörper ausgetauscht wird.

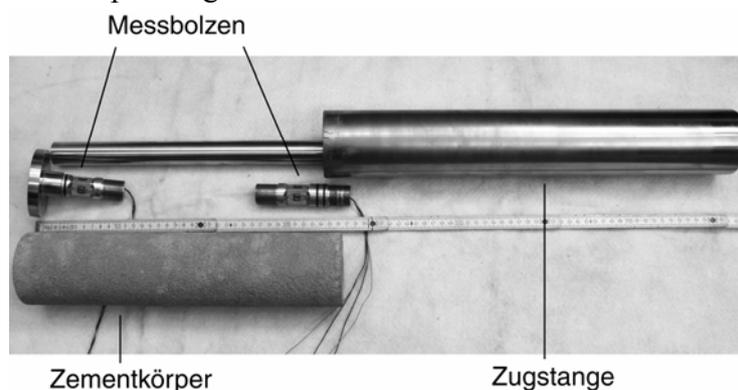


Bild 3.2 Aufbau des Ankers

Die Herstellung der Zementkörper erfolgt in einem wassergesättigten Sandbett als Schalung. Der Modellanker wird für den Einbau in dem Ausziehbehälter zentriert, indem er auf einen mittig auf dem Behälterboden ausgerichteten Zentrierbolzen aufgesetzt und am oberen Ende mit Hilfe eines Zentrierkreuzes vertikal ausgerichtet und gehalten wird. Der Sand wird mit Hilfe der Rieseltechnik eingebracht, so dass ein möglichst homogener Bodenaufbau gewährleistet ist.

3.2.2 Korrosionsphase

3.2.2.1 Belastungszelle

Eine Übersicht über den Versuchsaufbau gibt Bild 3.3. Die Ausziehversuche werden in Behältern mit einem Durchmesser von 1000 mm unter ödometrischen Randbedingungen durchgeführt. Der Behälter besteht aus einem HDPE-Rohr (Außendurchmesser 1000 mm, Wandstärke ca. 33 mm), das einen eingeschweißten Boden besitzt. Einem Kunststoffrohr wird aufgrund der guten Resistenz gegenüber dem Angriff durch die kalklösende Kohlensäure und aus Gewichts bzw. Kostengründen gegenüber einem (Edel)stahl- oder Stahlbetonrohr der Vorzug gegeben.

An der Außenwand der Ausziehzelle befinden sich in Höhe des Ankerkörpers vier Dehnungsmessstreifen, die eine Ausdehnung der Kunststoffwandung messen und ursprünglich zur Kontrolle der in den Bodenkörper eingeleiteten Vertikalspannung bzw. der daraus resultierenden Horizontalspannung auf die Behälteraußenwand dienen sollten.

3.2.2.2 Wasserkreislauf

Die Durchströmung des Bodenkörpers erfolgt von unten nach oben um den Einschluss von Luftblasen zu verhindern. Der Prozesswasserkreislauf wird über einen fest eingestellten hydraulischen Gradienten $i = \Delta h / \Delta l$ (s. Bild 3.3) angetrieben. Das Wasser wird über fünf Eingänge in die untere Drainageschicht eingetragen und dort verteilt. In Höhe der oberen Drainageschicht ist ebenfalls an fünf Stellen ein Überlauf angebracht. Die Fließstrecke Δl , über die der hydraulische Gradient abgebaut wird entspricht der Höhe des Bodenkörpers. Der Anteil der Drainageschicht am Potentialabbau wird hierbei aufgrund der großen Durchlässigkeit im Verhältnis zu derjenigen der untersuchten Böden vernachlässigt. Von den Überläufen aller Zellen wird das Prozesswasser im freien Gefälle in einen gemeinsamen Sammelbehälter geleitet, in dem zur Desinfektion eine Bestrahlung des Wassers mit UV-Licht stattfindet. Von diesem Sammelbehälter wird das Wasser mit Hilfe einer Pumpe in den höher stehenden Regelbehälter gehoben. Über entsprechende Auslässe am Behälterboden werden im freien Gefälle die einzelnen Ausziehzellen mit Prozesswasser versorgt. Ein Überlauf im Regelbehälter sorgt dafür, dass in dem Regelbehälter ein konstantes Wasserhöheniveau gehalten wird. Somit erhält man eine konstante Höhendifferenz Δh zwischen Wasserspiegeloberfläche und Überlauf den Versuchszellen (s. Bild 3.3), die über die Lage des Regelbehälters beliebig eingestellt werden kann. Entsprechend der kleinmaßstäblichen Ausziehversuche in der 1. Antragsphase wird ein hydraulischer Gradient von 1 festgelegt (d.h. $\Delta h = \Delta l$). Eine Regelung von konstanten Durchflüssen durch die Zellen mit Hilfe von mehrkanaligen Schlauchpumpen wie in der ersten Antragsphase ist bei den großmaßstäblichen Versuchen aufgrund der großen Wassermengen nicht mehr möglich.

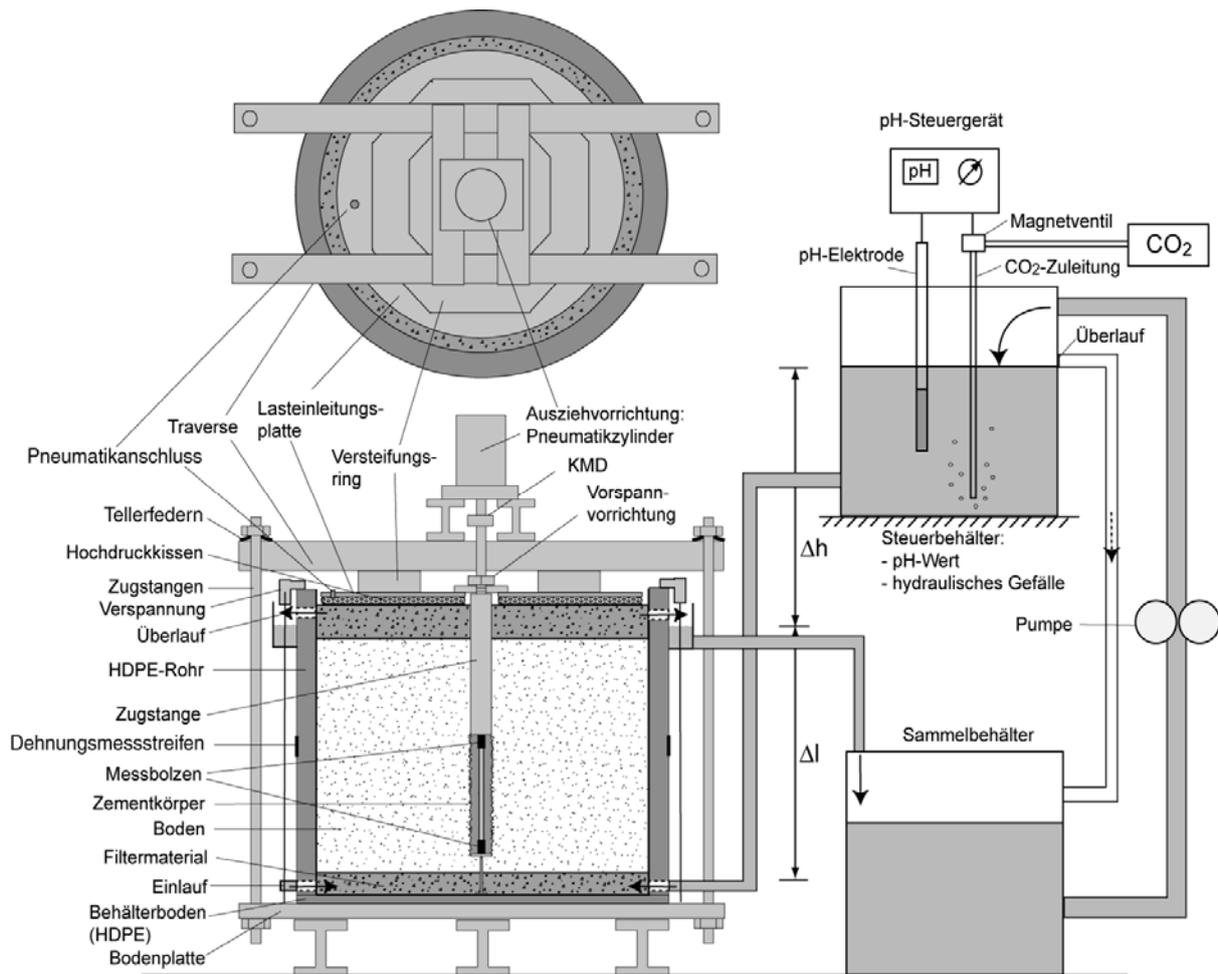


Bild 3.3 Versuchsaufbau der Ausziehversuche mit CO₂-Steuerung und Durchflussregelung

In dem Regelbehälter wird der pH-Wert kontinuierlich gemessen und über die Zudosierung von gasförmigem Kohlendioxid konstant gehalten. Diese Regelung erfolgt mit einem Steuergerät, das den Ist-pH-Wert misst und mit einem eingestellten Sollwert vergleicht und über ein Magnetventil die Zugabe von Kohlendioxid steuert. Die Temperatur wird über einen Kryostaten bei ca. 10 °C konstant gehalten.

3.2.3 Ausziehversuch

3.2.3.1 Spannungszustand

Um während des Ausziehvorgangs ein realitätsnahes Spannungsniveau - d.h. eine gewisse Einbindtiefe des Ankers im Boden - zu erzeugen, reicht das Bodeneigengewicht nicht aus, sondern es muss zusätzlich eine Auflast auf den Bodenkörper aufgebracht werden. Diese wird pneumatisch über ein mit Wasser gefülltes Hochdruckkissen (s. Bild 3.3) auf den Bodenkörper übertragen. Als Gegenlager dienen vier Zugstangen, die die auf dem Hochdruckkissen liegende Quertraverse mit der Bodenplatte des Behälters verbinden. Die durch das Druckkissen auf den Bodenkörper aufgebrachte Vertikalspannung beträgt etwa 250 kPa. Die daraus resultierende Horizontalspannung $\sigma_h = K_0 \cdot \sigma_v$ mit $K_0 = 1 - \sin\varphi$ ergibt sich für Boden 1 zu ca. 90 kPa und für Boden 2 zu ca. 105 kPa. Diese Horizontalspannung entspricht in etwa der in den kleinmaßstäblichen Versuchen aufgebrachten isotropen Anfangsspannung von 100 kPa.

Ursprünglich sollte der Spannungszustand auf den Bodenkörper über vier Zugstangen, die eine auf der Lasteinleitungsplatte aufliegende Quertraverse mit der Stahlplatte auf der gesamte Versuchsaufbau steht verbinden, aufgebracht werden. Durch Anziehen der Muttern an der Zugstange oberhalb der Traverse sollten die Spannungen über die Traverse und horizontal gleichmäßig verteilt über die Lasteinleitungsplatte in den Bodenkörper eingeleitet werden. Zur Kontrolle der eingeleiteten Vertikalspannungen und daraus resultierenden Horizontalspannungen auf die Behälterinnenwand dienten die Dehnungsmessstreifen an der Behälteraußenwand. Anhand von Vorversuchen wurde der Zusammenhang zwischen aufgebrachter Spannung und Dehnung des Behälters bestimmt. Aufgrund dieser Art der Lasteinleitung kam es aber zu einer Schiefstellung der Lasteinleitungsplatte und daraus resultierend zu erheblichen Unterschieden in den maximalen Ausziehkräften bei den Versuchen. Daher wurde auf diese Art der Lasteinleitung verzichtet und der Spannungszustand auf den Bodenkörper wie oben beschrieben mittels eines Druckkissens aufgebracht.

Da Vorversuche an vorgespannten Ankern gezeigt haben, dass eine Vorspannung des Ankers keinen Einfluss auf den Korrosionsfortschritt und die Abnahme der Ausziehkraft hat [5], wird bei den Versuchen auf eine Vorspannung des Ankers und auch des Bodenkörpers während des Korrosionsprozesses verzichtet.

3.2.3.2 Ausziehvorgang

Der Ausziehvorgang erfolgt kraftgesteuert mittels eines Pneumatikzylinders, der über eine zweite Traverse auf die jeweilige Ausziehzelle gesetzt wird und mit dem aus der Bodenprobe herausragenden Ankerzugglied kraftschlüssig verbunden wird. Die konstante Rate, mit der die Ausziehkraft erhöht wird, beträgt etwa 28 N/s. Der Ausziehweg wird mit Hilfe eines Wegaufnehmers gemessen. Die Kraftmessdose unterhalb des Pneumatikzylinders misst die Ausziehkraft inklusive des Anteils, der durch Reibung über das Stahlzugglied abgetragen wird. Durch die in das Zugglied im Bereich des Zementankerkörpers integrierten Messbolzen wird separat die Zugkraft gemessen, die über die Zementkörperoberfläche in den Boden abgetragen wird, aus der dann die Mantelreibung des Zementkörpers ermittelt werden kann.

3.2.4 Versuchsvorbereitung und –durchführung

3.2.4.1 Einbringen des Bodens

Der Boden wird mittels Rieseltechnik in dichter Lagerung in die Behälter eingebracht. Ein Vergleich der erzielten Einbaudichten zeigt übereinstimmende Werte der Großausziehversuche mit den durchgeführten kleinmaßstäblichen Ausziehversuchen. Im Behälter befinden sich oberhalb und unterhalb der eigentlichen Bodenprobe wie in Bild 3.4 dargestellt, Filterschichten. Diese dienen dazu, den Bodenkörper vor Austrag von Feinmaterial zu schützen. Die Filterstabilität nach Terzaghi gegenüber dem Versuchsboden ist durch einen Bodenaufbau nach Bild 3.4 für beide Böden gewährleistet.

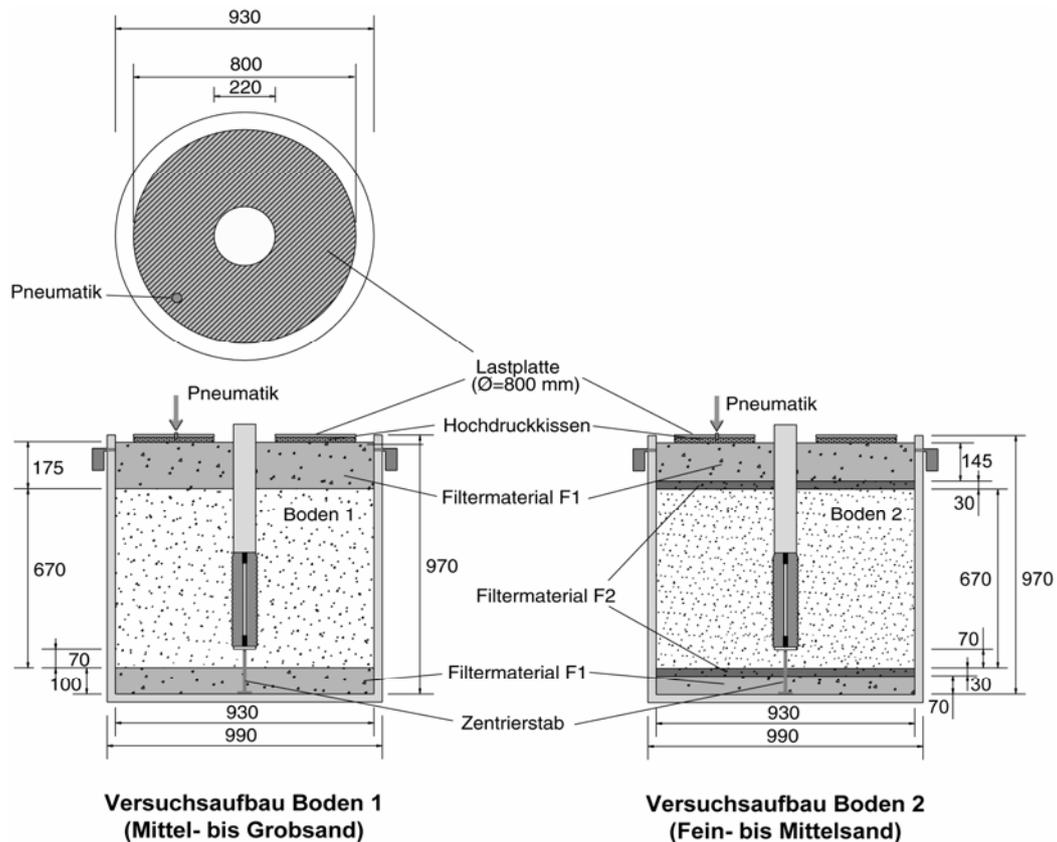


Bild 3.4 Höhen der Boden- und Filterschichten

Die Höhe der Bodenproben beträgt 670 mm. Dabei wird der Zementankerkörper so angeordnet, dass er bei einer Höhe von 350 mm eine Überdeckung von 250 mm aufweist und sich unterhalb des Zementkörpers noch eine 70 mm mächtige Bodenschicht befindet.

3.2.4.2 Anschluss Wasserkreislauf / Wassersättigung

Wenn der Einbau des Sandes abgeschlossen ist, wird zur Beschwerung des Systems eine Lastplatte aus Stahl mit einem Gewicht von etwa 50 kg auf der Oberfläche des Bodenkörpers platziert um dem Bodenkörper eine gewisse Vorspannung zu geben und aus der Durchströmung resultierende Umlagerungen von Bodenpartikeln zu verhindern. Danach wird der Behälter an den Wasserkreislauf angeschlossen und durch die fünf Einlauföffnungen in Höhe der unteren Drainageschicht strömt das CO_2 -haltige Wasser in den Bodenkörper. Nach etwa 1-2 Stunden ist der Bodenkörper vollständig mit Wasser gesättigt und das überschüssige Wasser läuft durch die Überläufe in Höhe der oberen Drainageschicht aus dem Behälter heraus in den Sammelbehälter. Der Bodenkörper wird nun bis zum Versuchsende mit dem CO_2 -haltigen Wasser durchströmt.

3.2.4.3 Ausziehversuch

Nach Ablauf der Korrosionsdauer wird die Lastplatte von der Oberfläche des Bodenkörpers entfernt und die Einrichtung zum Herstellen des geforderten Spannungszustandes im System gemäß Abschnitt 3.2.3.1, bzw. Bild 3.3 aufgebaut. Die Vertikalspannung auf den Boden wird mittels des Druckkissens in drei Stufen aufgebracht. Zuerst wird ein Druck von 0,5 bar auf das System aufgebracht und mit den an der äußeren Behälterwandung angebrachten Dehnungsmessstreifen die Verformung des Behälters beobachtet. Es wird so lange gewartet bis

die Verformungen des Behälters abgeklungen sind. Sind keine maßgeblichen Verformungen mehr zu beobachten, wird die nächste Laststufe von 1,5 bar auf das System aufgebracht und erneut gewartet bis die Vertikalspannung auf 2,5 bar – der Spannungszustand bei dem der Ausziehversuch durchgeführt wird – erhöht wird. Nach Aufbringen jeder einzelnen Laststufe wird zusätzlich mit einem Gummihammer leicht gegen die Außenwand des Behälters geschlagen um evtl. vorhandene Verspannungen zu lösen und einen gleichmäßigen Spannungszustand im Bodenkörper zu gewährleisten. Wenn sich auch bei der letzten Laststufe keine Verformungen mehr verzeichnen lassen, wird der Anker an die Ausziehvorrückung (s. Abschnitt 3.2.3.2 und Bild 3.3) angeschlossen und mit einer Rate von 28 N/s wird die Ausziehkraft bis zum Versagen des Ankers erhöht.

3.2.4.4 Nachbereitung

Nach dem Versuch wird zunächst die Ausziehvorrückung abgebaut und das Wasser aus dem Behälter abgelassen. Der Anker wird aus dem Boden herausgezogen und seine Oberfläche von Bodenresten gereinigt, so dass seine Oberfläche visuell auf Korrosionsspuren untersucht werden kann.



Bild 3.5 Oberfläche der Zementkörper nach dem Ausziehversuch (oben: unkorrodiert; unten: 3 Monate korrodiert)

Bei der visuellen Begutachtung lässt sich, wie in Bild 3.5 dargestellt, ein Unterschied zwischen Zementkörperoberfläche im unkorrodierten und im korrodierten Zustand erkennen. Dieser Unterschied äußerte sich darin, dass die aus der Herstellung der Anker stammenden Sandkörner auf der Ankeroberfläche durch die Korrosion teilweise flächenhaft abgelöst wurden. Die Stellen, an denen sich die Sandkörper abgelöst haben sind im unteren Foto von Bild 3.5 als hellere Flächen zu erkennen. Nähere Untersuchungen der Oberfläche wurden nicht vorgenommen.

3.2.5 Versuchsprogramm

Es werden analog zu den kleinmaßstäblichen Ausziehversuchen sowohl Versuche an unkorrodierten als auch an korrodierten Zementankern in beiden Versuchsböden durchgeführt. Als Korrosionsdauer bei den korrodierten Versuchen werden Zeiträume zwischen 2 und 9 Monaten bei einer CO₂-Konzentration von 90 mg/l gewählt.

In Tabelle 3.2 ist eine Übersicht über alle im Versuchsboden 1 durchgeführten Ausziehversuche mit dem großen Ankerkörpern (Ø = 130 mm) gegeben und in Tabelle 3.3 sind alle im Versuchsboden 2 durchgeführten Ausziehversuche mit den Ankern kleineren Durchmessers (Ø = 80 mm) mit der maximalen an der Kraftmessdose gemessenen Ausziehkraft dargestellt.

Tabelle 3.2 Übersicht Versuche in Boden 1

Korrosion	Korrosionsdauer [d]	Lagerungsdichte ρ_d [g/cm ³]	CO ₂ -Konzentration [mg/l]	Ø _{Anker} [mm]	maximale Ausziehkraft [kN]
unkorrodiert	0	1,76	90	130	20,13
	0	1,78	90	130	22,18
3 Monate	90	1,77	90	130	23,32
3 Monate	90	1,78	90	130	22,77
6 Monate	180	1,77	90	130	22,01
9 Monate	270	1,78	90	130	16,04

Tabelle 3.3 Übersicht Versuche in Boden 2

Korrosion	Korrosionsdauer [d]	Lagerungsdichte ρ_d [g/cm ³]	CO ₂ -Konzentration [mg/l]	Ø _{Anker} [mm]	maximale Ausziehkraft [kN]
unkorrodiert	0	1,64	90	80	11,48
	0	1,64	90	80	12,96
	0	1,63	90	80	11,62
	0	1,63	90	80	11,49
	0	1,64	90	80	13,68
	0	1,65	90	80	14,02
	0	1,65	90	80	12,7
2 Monate,9 Tage	70	1,65	90	80	11,44
3 Monate	90	1,64	90	80	10,7
3 Monate	90	1,65	90	80	11,82
3 Monate	90	1,65	90	80	11,51
7 Monate,1 Woche	217	1,64	90	80	9,23
7 Monate,2 Wochen	225	1,64	90	80	9,04

3.3 Versuchsergebnisse

3.3.1 Bestimmen der maximalen Ausziehkraft

Die aus den Versuchen gewonnenen Daten werden analog zu den kleinmaßstäblichen Versuchen ausgewertet, wobei die während des Ausziehvorganges an der sich unterhalb des Pneumatikzylinders befindlichen KMD gemessene maximale Kraft die Ausziehkraft des Ankers darstellt, d.h. ein Maß für seine Tragfähigkeit liefert. Diese Kraft setzt sich aus der über die Mantelfläche des Zementkörpers in den Boden eingeleitete Kraft und der im Bereich der glatten Zugstange auftretende Reibung zum Boden zusammen. Die an den in das Zugglied integrierten Messbolzen gemessenen Kräfte beinhalten nur den ersten Teil. Die Messwerte der Bolzen liegen allerdings nicht für alle Versuche vor. Deshalb werden für die Auswertung der Ankerversuche hinsichtlich des Tragkraftverlustes unter Korrosion die Messwerte der Kraftmessdose verwendet. Dieses ist zulässig, da der Anteil der Reibung an der Zugstange an der Gesamttragkraft gering ist und darüber hinaus in allen Versuchen die gleiche Größenordnung aufweist.

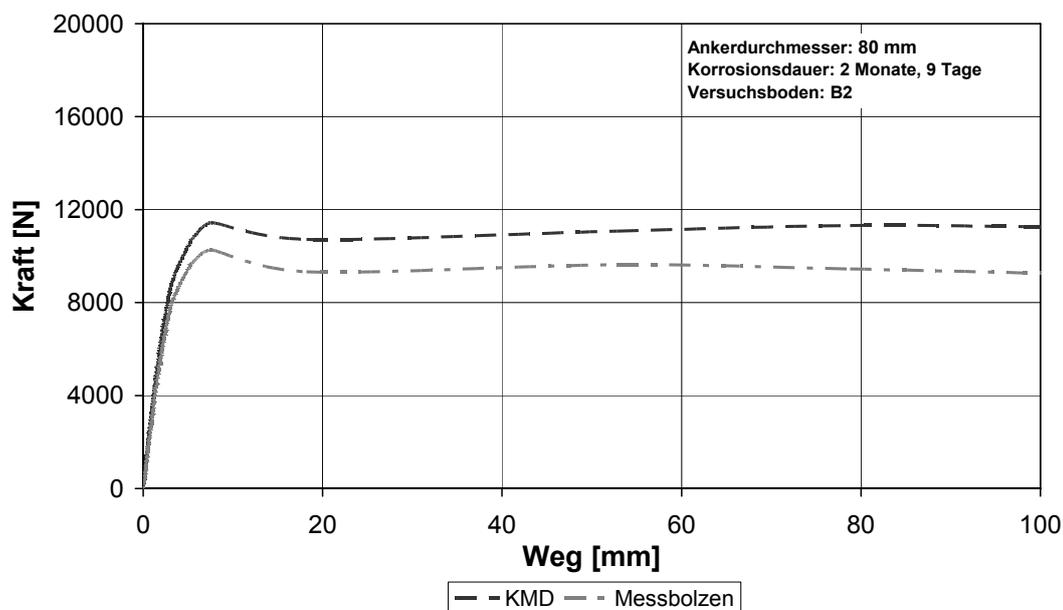


Bild 3.6 Kraft-Weg-Diagramm eines Ausziehversuchs mit Korrosion

In Bild 3.6 ist exemplarisch der typische Verlauf der Ankertragkraft über den Ausziehweg für einen Ausziehversuch nach Korrosion dargestellt. Die Ausziehkraft steigt zunächst sehr stark an, während die Verformungen noch sehr klein bleiben (im Bereich von einigen Millimetern). Die Kurve flacht dann bis zum Erreichen der maximalen Ausziehkraft immer stärker ab. Am Punkt des Versagens wird der Anker schlagartig aus dem Boden herausgezogen.

Die im Zugglied integrierten Messbolzen, von denen hier im Diagramm der Mittelwert der Messwerte dargestellt ist, zeigen einen entsprechenden Kraftverlauf. Die Werte liegen aber wie erwartet um den Anteil der an der glatten Zugstangenfläche übertragenen Reibung unterhalb der an der Kraftmessdose gemessenen Werte.

3.3.2 Änderung der maximalen Ausziehungskraft durch Korrosion

In Bild 3.7 (Boden 1) und Bild 3.8 (Boden 2) ist die Entwicklung der gemessenen Ausziehungskräfte über die Korrosionsdauer dargestellt. Bei den Versuchen ohne Korrosion (Zeit $t = 0$) ist der Mittelwert aller Versuche und die Bandbreite der Ergebnisse eingetragen.

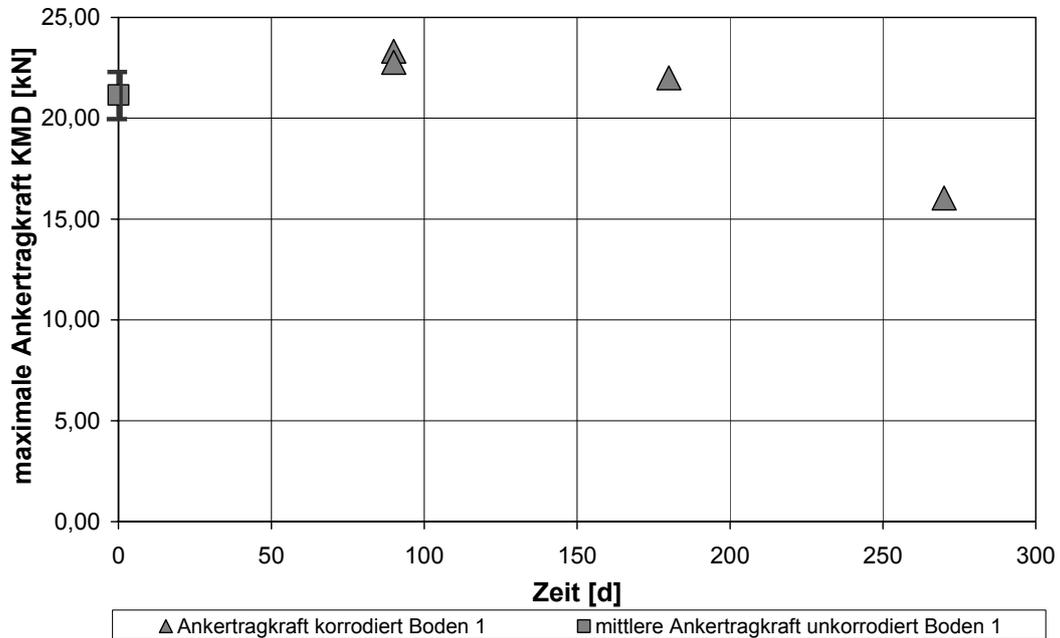


Bild 3.7 maximale Ankertragkraft aller Versuche (Boden 1, $\varnothing_{\text{Anker}} = 130 \text{ mm}$)

Im größeren Versuchsboden (Boden 1) liegen die nach einer Korrosionsdauer von 90 und 180 Tagen gemessenen Tragfähigkeiten unter Berücksichtigung der Bandbreite in der Größenordnung der Tragfähigkeiten die an den unkorrodierten Ankern gemessen wurden. Erst nach einer Korrosionsdauer von 9 Monaten fällt die maximale Ankertragkraft auf 16,04 kN ab, es ist also ein deutlicher Abfall der Tragfähigkeit zu beobachten.

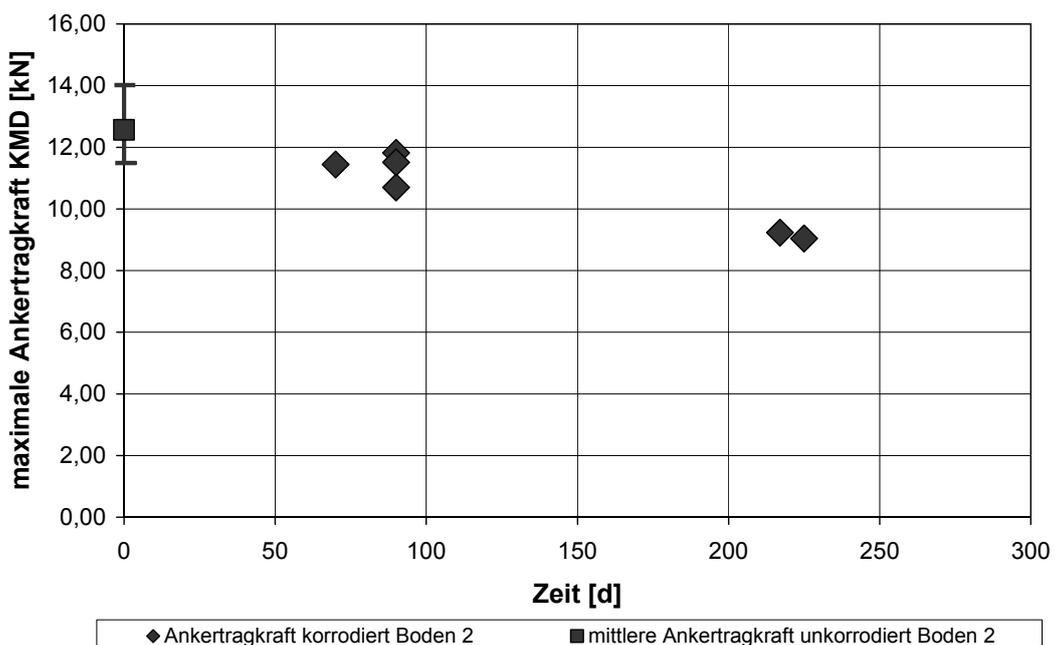


Bild 3.8 maximale Ankertragkraft aller Versuche (Boden 2, $\varnothing_{\text{Anker}} = 80 \text{ mm}$)

Im feineren Versuchsboden (Boden 2) unter Verwendung des Ankerdurchmessers $\varnothing = 80$ mm ist ein deutlicher Abfall der Ankertragkraft unter Korrosion zu erkennen. Im unkorrodierten Zustand liegt die über alle Versuche gemittelte Ausziehkraft bei 12,56 kN. Nach einer Korrosionsdauer von etwa 3 Monaten liegt die Tragkraft nur noch bei etwa 11 kN. Stehen die Anker insgesamt 7 Monate unter CO₂-Angriff, so liegt die Tragkraft nur noch bei etwas mehr als 9 kN.

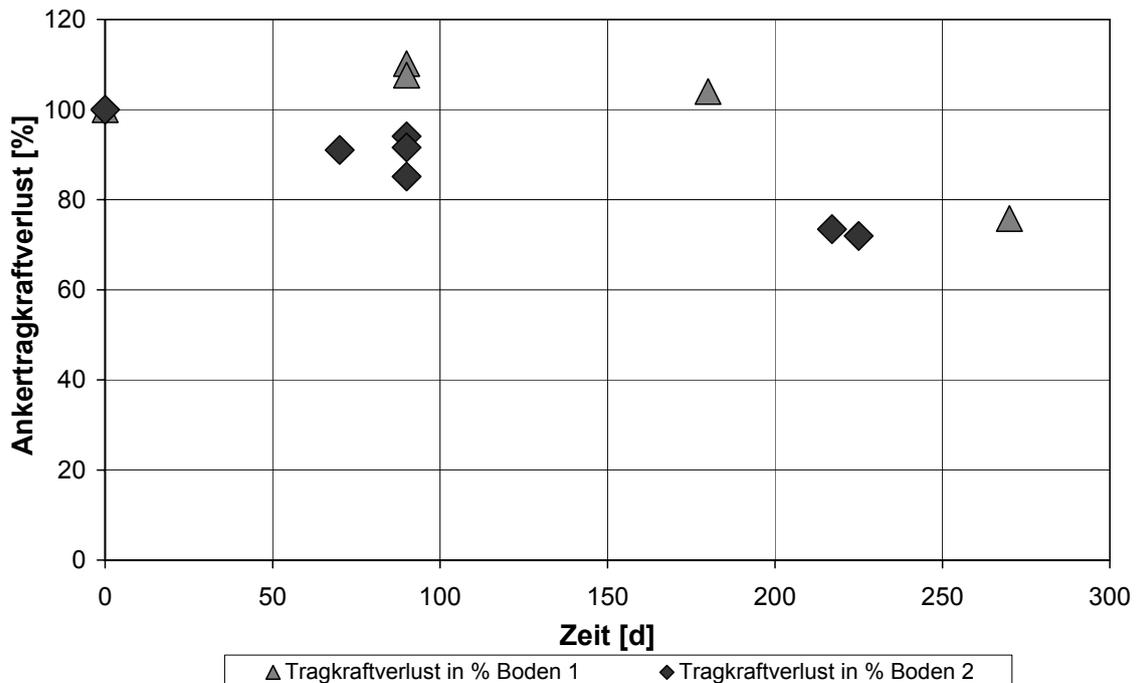


Bild 3.9 Verlauf der Ankertragkraft in Prozent vom unkorrodierten Zustand

In Bild 3.9 sind die Verläufe der Ankertragkraft in Prozent von der jeweiligen gemittelten Ankertragkraft im Ausgangszustand über die Korrosionsdauer aufgetragen. Im Boden 1 unter Verwendung des Ankerkörpers von 130 mm Durchmesser ist nach einem Korrosionszeitraum von 6 Monaten kein Abfall der Tragfähigkeit zu erkennen. Erst nach neun Monaten unter Korrosionseinfluss wird bei einem Ausziehversuch ein Abfall der Tragfähigkeit von etwas mehr als 24 % gemessen. Im feineren Boden 2 mit einem Ankerkörper $\varnothing = 80$ mm findet schon nach kurzer Korrosionsdauer ein signifikanter Tragkraftverlust statt, der einen annähernd linearen Verlauf aufweist. Nach einer Korrosionsdauer von 7 Monaten ist die Ankertragkraft auf etwas über 70 % vom unkorrodierten Ausgangszustand zurückgegangen. Ein wichtiger Unterschied in der Entwicklung der Ankertragkraft unter Korrosionsverlust in den beiden Böden ist, dass im größeren Boden 1 die Abnahme der Tragfähigkeit erst nach einer viel längeren Korrosionsdauer als im Boden 2 einstellt. Über den weiteren Verlauf der Tragfähigkeit nach längeren Korrosionszeiträumen kann mit reiner Betrachtung der Ergebnisse der Großversuche keine Aussage gemacht werden.

3.3.3 Änderung des Ausziehweges durch Korrosion

In Bild 3.10 sind die Ausziehwege bis zum Versagen des Ankers über die Korrosionsdauer für beide Böden dargestellt. In Boden 1 weist der Ausziehweg bei dem korrodierten Anker die gleiche Größenordnung auf wie im unkorrodierten Fall. Im feineren Boden 2 ist eine signifikante Abnahme des Ausziehweges mit fortschreitender Korrosionsdauer feststellbar.

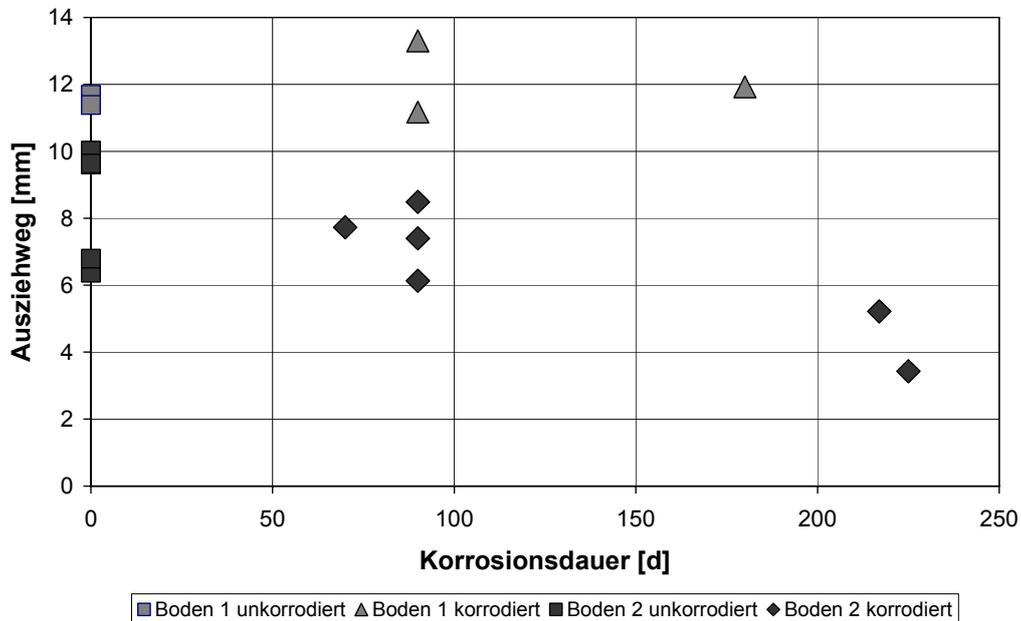


Bild 3.10 Änderung des Ausziehweges mit der Korrosionsdauer

Wird wie in Bild 3.11 die Ausziehungskraft über den Ausziehweg dargestellt, zeigt sich dass diese, unabhängig von der Korrosionsdauer, dem Boden und dem Ankerkörper näherungsweise linear voneinander abhängen. Je größer die Ausziehungskraft, desto größer wird auch der entsprechende Ausziehweg.

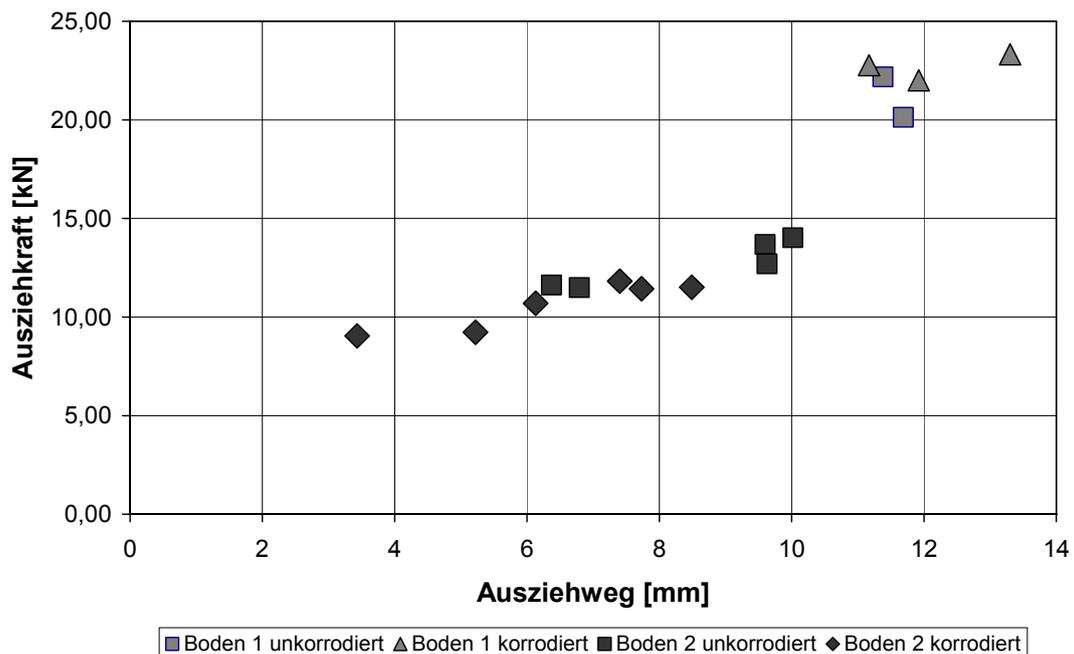


Bild 3.11 Ausziehungskräfte aller Großversuche in Bezug zum Ausziehweg

Dies lässt sich auch in Bild 3.12 nachvollziehen. Dort sind beispielhaft einige Verläufe der an der Kraftmessdose gemessenen Ausziehungskraft über den Ausziehweg (alle Versuche an Stand 6) dargestellt. Im Anstieg zur maximalen Ankertragkraft weisen alle Versuchskurven, sowohl im unkorrodierten als auch im korrodierten Zustand, ein übereinstimmendes Verformungsverhalten unter Belastung auf. Der Ausziehweg bleibt daher im Verhältnis zur Ausziehungskraft weitgehend konstant.

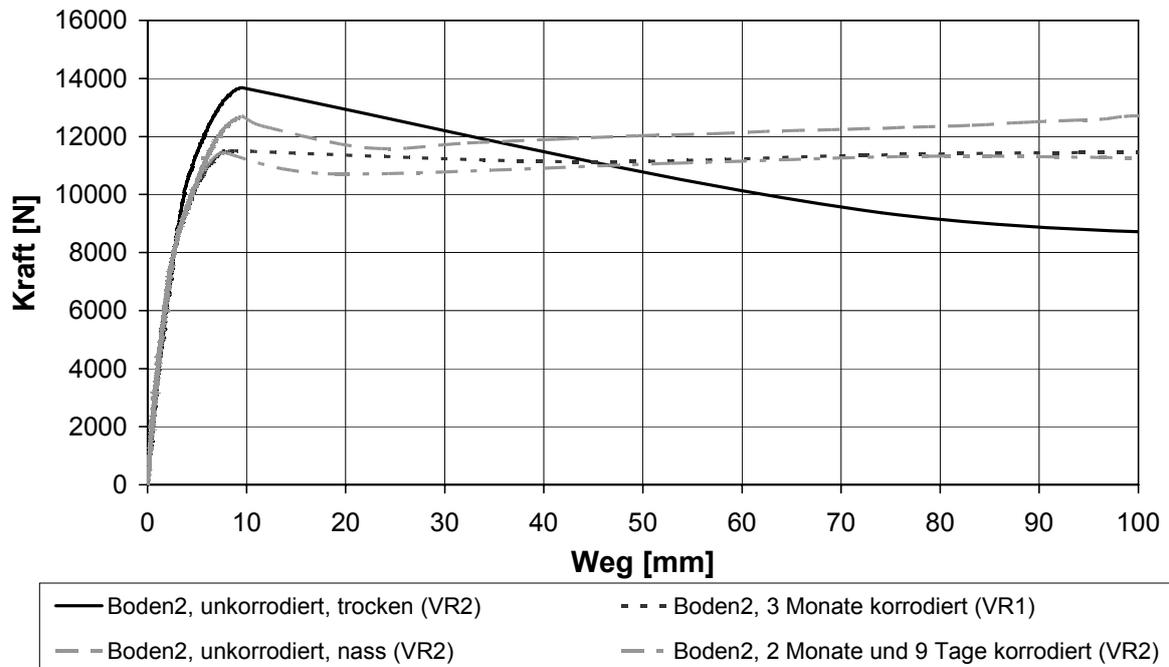


Bild 3.12 Kraft-Weg-Diagramm beispielhaft für Boden 2

Allein der im trockenen Boden durchgeführte Versuch weist einen abweichenden Verlauf nach dem Versagen des Ankers auf.

3.3.4 Tragfähigkeitsverlust bezogen auf die Korrosionstiefe

Die verwendeten Versuchsböden weisen Unterschiede in ihrer Wasserdurchlässigkeit aber auch Unterschiede in der maßgebenden Korngröße auf. Um den Verlauf der Ankertragkraft für die verwendeten Versuchsböden beurteilen zu können, werden die gemessenen Ankertragkräfte aus den Versuchen über die berechnete Korrosionstiefe für den jeweiligen Korrosionszustand aufgetragen. Für die Berechnung der Korrosionstiefe wird für Boden 1 Gleichung 2-1, für Boden 2 Gleichung 2-2 und für die Versuche von Manns die allgemeine Formel für die Korrosionstiefe in Abhängigkeit von der Durchlässigkeit des Bodens (Gleichung 2-4) aus Kapitel 2.3 verwendet.

In den nachfolgenden Diagrammen ist der prozentuale Verlauf der Ankertragkraft bezogen auf den unkorrodierten Ausgangszustand für jeden Versuch bezogen auf die jeweilige, rechnerisch ermittelte Korrosionstiefe dargestellt. Im Bild 3.13 ist dies für die Großversuche in beiden Versuchsböden dargestellt. Zur besseren Orientierung ist der jeweilige mittlere Korndurchmesser d_{50} der beiden Böden durch eine senkrechte, gestrichelte Linie gekennzeichnet.

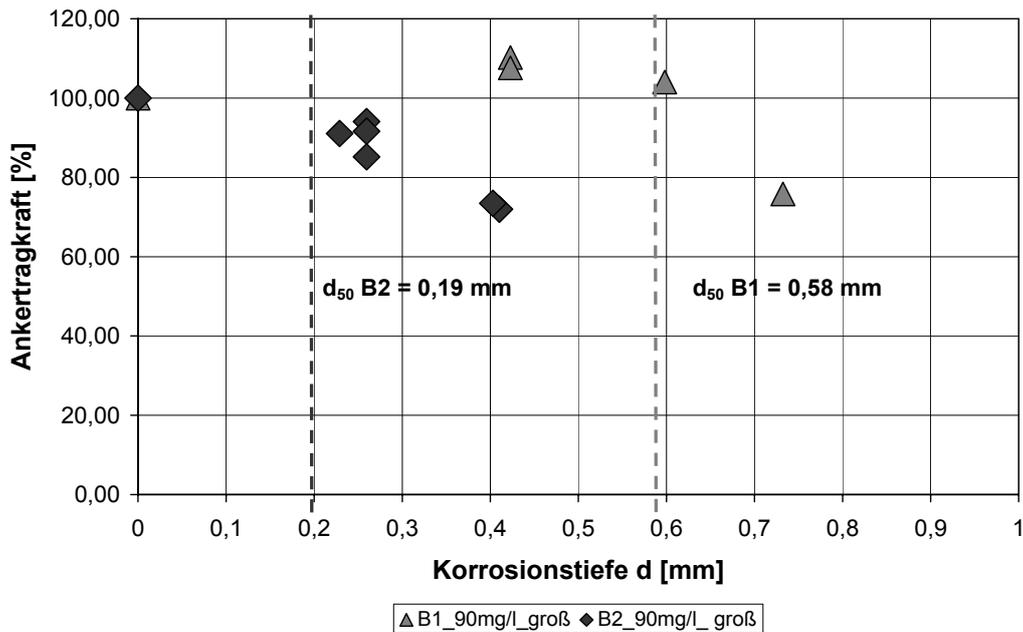


Bild 3.13 Ankertragkraft über Korrosionstiefe bei den Großversuchen

Im größeren Boden 1 kann ein Abfall der Ankertragkraft erst bei einer berechneten Korrosionstiefe von mehr als 0,7 mm beobachtet werden. Diese Korrosionstiefe ist größer als der mittlere Korndurchmesser von 0,58 mm. Im Boden 2 wird ein Abfall der Ankertragkraft bei einer Korrosionstiefe von mehr als 0,2 mm festgestellt. Der mittlere Korndurchmesser für diesen Boden liegt bei 0,19 mm. Es ist jedoch für beide Böden anzumerken, dass erst wenn die Korrosionstiefe die Größe d_{50} übersteigt ein signifikanter Abfall der Tragkraft beginnt.

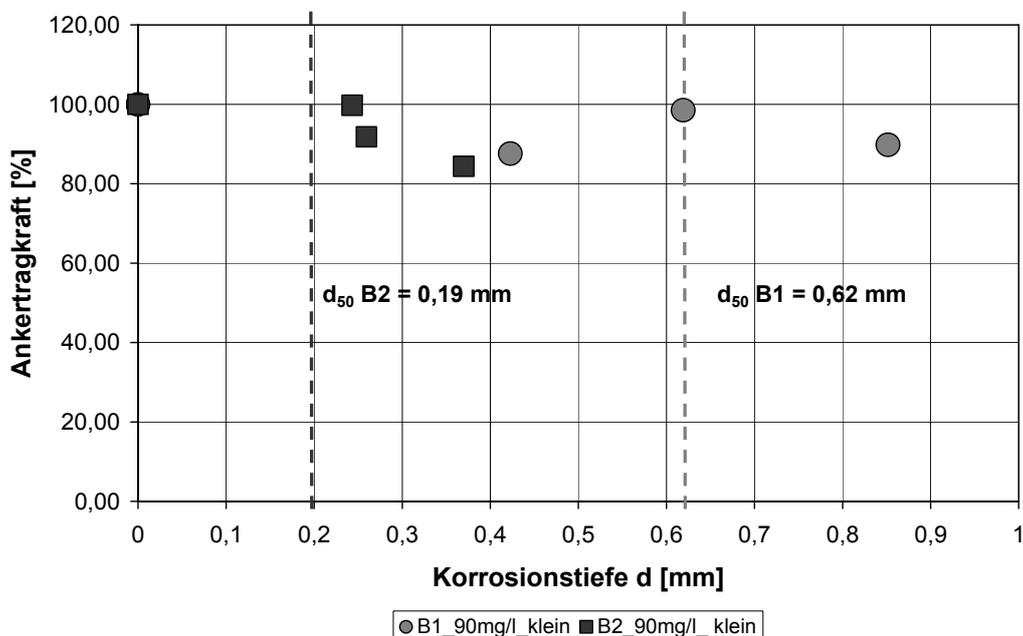


Bild 3.14 Ankertragkraft über Korrosionstiefe bei den kleinmaßstäblichen Versuchen

Im Bild 3.14 kann für Boden 1 kein nennenswerter Tragkraftverlust beobachtet werden. Der mittlere Korndurchmesser beträgt 0,62 mm. Im Boden 2 tritt der erste Tragkraftverlust bei einer berechneten Korrosionstiefe von etwa 0,25 mm auf, die größer ist als der mittlere Korndurchmesser d_{50} von 0,19 mm.

Zuletzt ist in Bild 3.15 der Verlauf der Ankertragfähigkeit über die Korrosionstiefe für die Versuche von Manns aufgetragen. Bei einer Korrosionstiefe von 0,5 mm wird der erste Tragfähigkeitsverlust gemessen. Bei einer größeren Korrosionstiefe von 0,7 mm ist die Ankertragkraft auf 25 % des unkorrodierten Ausgangszustandes abgesunken und sinkt auch bei weiterer Zunahme der Korrosionstiefe nicht mehr ab. Der mittlere Korndurchmesser für diesen Boden beträgt 0,44 mm.

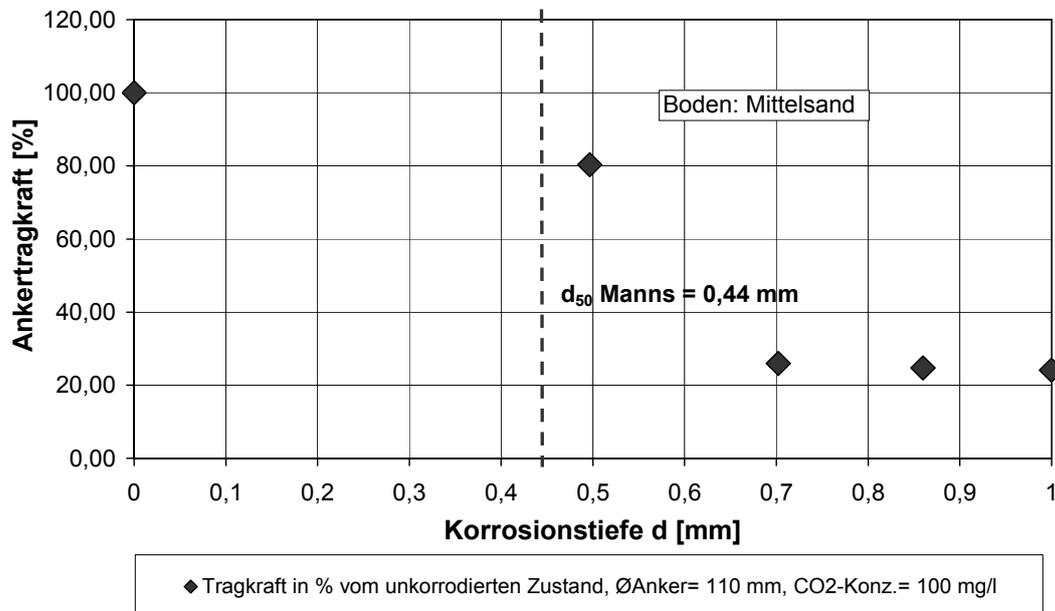


Bild 3.15 Ankertragkraft über Korrosionstiefe bei den Versuchen von Manns

Beim Betrachten dieser Darstellung der Versuchsergebnisse über die berechnete Korrosionstiefe für die einzelnen Versuchsreihen wird eine Abhängigkeit der mittleren Korngröße des verwendeten Versuchsbodens vom Abfall der Ankertragfähigkeit deutlich. In allen Fällen tritt ein Abfall der Ankertragkraft in den Versuchen erst ein, wenn die Korrosionstiefe größer als der mittlere Korndurchmesser des Bodens ist. Das bedeutet, dass es bei gröberen Böden erst bei einer größeren Korrosionstiefe, also nach einem längeren Korrosionszeitraum, zu einem Tragkraftverlust kommt. So kann auch erklärt werden, warum im gröberen Versuchsboden 1 auch bei langer Korrosionsdauer kein Abfall der Tragfähigkeit des Ankers beobachtet werden konnte.

Aufgrund der Tatsache, dass, um größere Korrosionstiefen der Zementoberfläche zu erreichen, besonders in feineren Böden sehr lange Versuchszeiträume erforderlich wären die im Rahmen dieses Projektes nicht zu verwirklichen waren, kann keine Aussage über den weiteren Abfall der Ankertragfähigkeit mit steigender Korrosionstiefe bei den verschiedenen Versuchsböden gemacht werden.

Es ist allerdings auch zu berücksichtigen dass die Entwicklung der Korrosionstiefe mit steigender Korrosionsdauer langsamer abläuft und deshalb bei grobkörnigen Böden sehr lange Korrosionszeiträume betrachtet werden müssen um überhaupt einen Abfall der Ankertragkraft zu erhalten. Es liegt die Vermutung nahe, dass ab dem Erreichen einer bestimmten Dicke der korrodierten Schicht ein weiterer Transport von aggressivem CO_2 an die Zementsteinoberfläche gehemmt wird.

4 Vergleich

Um zu einer Aussage bezüglich des Tragfähigkeitsverlustes von Verpressankern unter Korrosionseinfluss zu kommen, werden die im Rahmen der zweiten Antragsphase durchgeführten Großversuche mit den Ergebnissen der kleinmaßstäblichen Ausziehversuche verglichen.

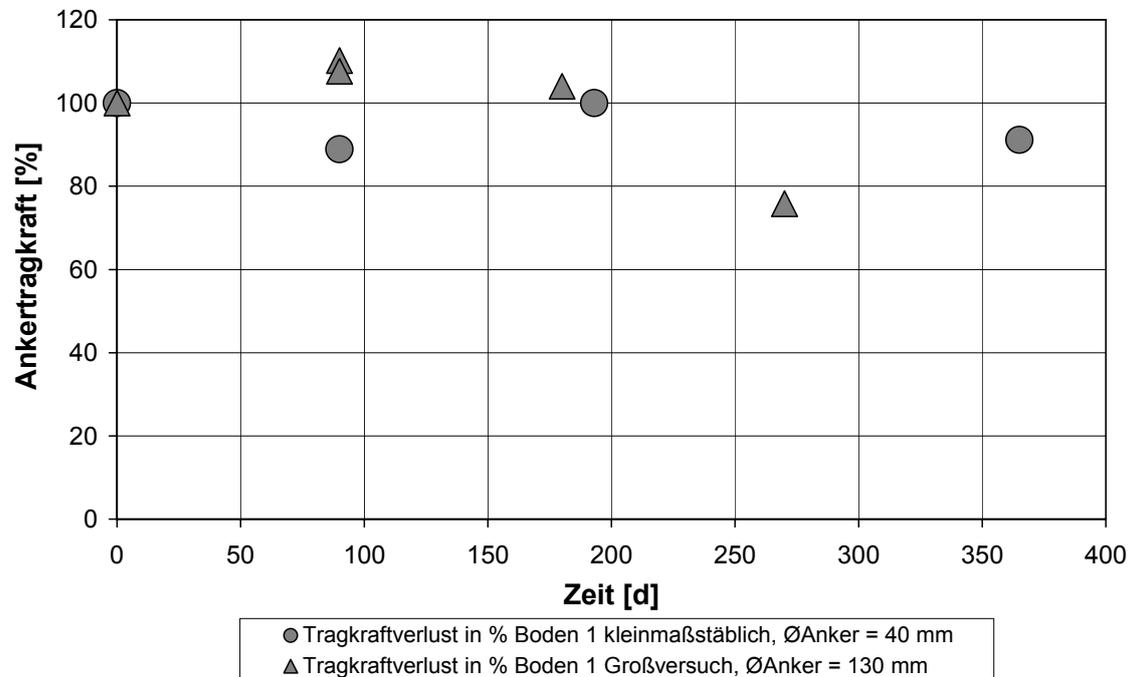


Bild 4.1 Vergleich Großversuche und kleinmaßstäbliche Versuche im Boden 1

In Bild 4.1 ist die prozentuale Abnahme der maximalen Ankertragkraft über die Korrosionsdauer für Boden 1 für die kleinmaßstäblichen Versuche mit einem Ankerdurchmesser von 40 mm und die Großversuche ($\varnothing_{\text{Anker}} = 130 \text{ mm}$) dargestellt. In diesem Mittel- bis Grobsand kann auch unter Berücksichtigung der Streuung der Versuchsergebnisse bei den kleinmaßstäblichen Versuchen kein signifikanter Verlust der Ankertragkraft durch die Korrosion festgestellt werden, wohingegen bei den Großversuchen nach einer Korrosionsdauer von 9 Monaten ein Abfall auf fast 75 % der unkorrodierten Tragfähigkeit zu verzeichnen ist.

Im Fein- bis Mittelsand (Boden 2) kann bei beiden Versuchsreihen eine deutliche Abnahme der Ankertragkraft durch Korrosion festgestellt werden (s. Bild 4.2). Bei den kleinmaßstäblichen Ausziehversuchen an Ankerdurchmessern von 40 mm ist die Tragkraft nach einer Korrosionsdauer von einem Jahr auf etwa 84 % des unkorrodierten Wertes gesunken. Die Anker von 80 mm Durchmesser aus den Großversuchen weisen nach nur etwas mehr als sieben Monaten Korrosionsdauer einen Rückgang der Ankertragkraft auf etwas über 70 % auf. Somit ist der Tragkraftverlust bei den großmaßstäblichen Versuchen größer, mindestens aber im zeitlichen Verlauf früher, als bei den kleinmaßstäblichen.

Der Tragkraftverlust ist physikalisch mit einer Abnahme des Reibungsbeiwertes zwischen Sand und Zementkörper und mit einer Abminderung der Verspannungswirkung beim Ausziehvorgang durch Eintreten von Bodenkörnern in die korrodierte Zone und der damit verbundenen Auflockerung zu erklären. Diese Verspannungseffekte nehmen mit zunehmender

Krümmung der Oberfläche des Zementkörpers, also mit abnehmendem Ankerradius, zu. Bei einer ebenen Oberfläche, wie im Rahmenschergerät abgebildet, fallen sie weg. Dort wird nur die Abnahme des Reibungswinkels einer Reduktion der Scherfestigkeit bewirken. Diese war, wie in [4] aus den Untersuchungen ermittelt wurde, gering. Bei Vergrößerung des Ankerdurchmessers wäre im Widerspruch zu den Versuchsergebnissen für Boden 2 eher eine Verringerung der Abminderung der Tragfähigkeit zu erwarten gewesen.

Zu berücksichtigen bleibt aber, dass jeder Messwert einen Einzelversuch repräsentiert und zusätzlich die kleinmaßstäblichen und großmaßstäblichen Versuche an unterschiedlichen Versuchsaufbauten durchgeführt wurden. So ist zwar die Geometrie aller Versuche vergleichbar (Verhältnis Oberfläche Zementkörper zu sich im Boden befindlicher Zugstangenoberfläche, Abstand des Ankerkörpers zur Zelleninnenwandung), aber es gab auch Unterschiede wie z.B. die Art wie der Spannungszustand auf den Bodenkörper aufgebracht wurde. Bezieht man diese Umstände im Vergleich mit ein, ist die Tendenz des Tragfähigkeitsabfalls z.B. gegenüber den Ergebnissen an Boden 1 aus beiden Versuchsarten übereinstimmend zu bewerten.

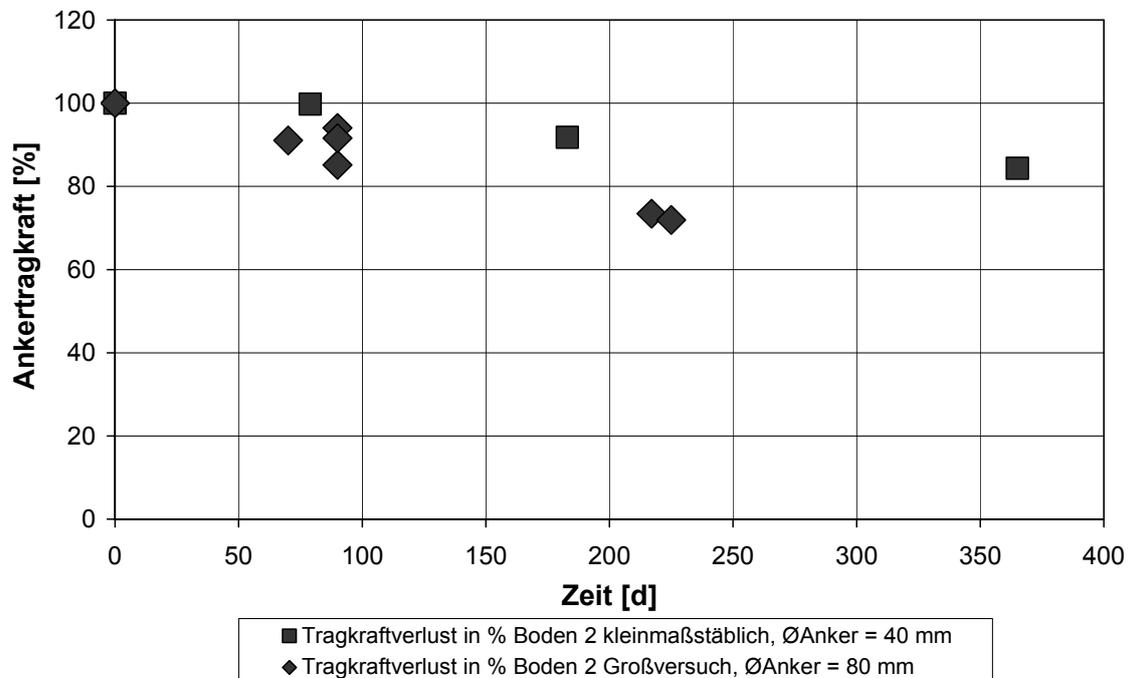


Bild 4.2 Vergleich Großversuche und kleinmaßstäbliche Versuche in Boden 2

Die von Manns beobachtete Abnahme der Ankertragkraft in solch einer Größenordnung (s. Bild 2.1) kann durch die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Versuche in den hier betrachteten Zeiträumen nicht bestätigt werden. Eine Erklärung für die beschriebenen Abweichungen wäre möglicherweise im Versuchsaufbau und in der Versuchsdurchführung zu suchen.

5 Zusammenfassung

Der Korrosionsfortschritt einer Zementsteinoberfläche durch Anwesenheit von kalklösender Kohlensäure läuft mit der Zeit immer langsamer ab. Durch experimentelle Bestimmung der Korrosionstiefe an Zementkörpern und theoretische Betrachtungen wurden, wie in Kapitel 2.3 beschrieben, für Boden 1 und Boden 2 Funktionen ermittelt, die die zeitliche Entwicklung der Korrosionstiefe beschreiben. Dabei stellt sich heraus, dass der Korrosionsfortschritt stark von der Durchlässigkeit des Bodens abhängig ist. Bei Böden mit geringer Durchlässigkeit läuft die Ausbildung der korrodierten Schicht viel langsamer ab als in durchlässigen Böden.

Für sehr feinkörnige Böden mit einer Durchlässigkeit von kleiner $k_f = 1 \times 10^{-7}$ m/s ist der Effekt durch Korrosion zunächst als sehr klein zu bewerten, da der Korrosionsprozess auch für Lebensdauerbetrachtungen sehr langsam abläuft. Bei kleinmaßstäblichen Ausziehversuchen in einem sehr feinkörnigen Boden [5] konnte auch nach einer Korrosionsdauer von einem Jahr kein Abfall der Tragfähigkeit beobachtet werden. Es muss hierbei beachtet werden, dass die wesentliche Korrosion in den ersten Monaten des Angriffs stattfindet.

Bei grobkörnigen Böden ist der Verlust der Tragfähigkeit zunächst ebenfalls sehr gering, da erst große Korrosionstiefen erreicht werden müssen bevor der Effekt des Verspannungsverlustes des Ankers auftritt und sich durch einen Kornnachfall beim Scheren ein Abfall der Tragfähigkeit bemerkbar macht.

Aus den Versuchsergebnissen kann abgeleitet werden, dass erst Korrosionstiefen größer als der mittlere Korndurchmesser d_{50} des Bodens erreicht werden müssen, bevor mit einem Verlust der Tragfähigkeit zu rechnen ist. Es kann mit Hilfe der Gleichungen für die Korrosionstiefe aus Abschnitt 2.3 eine Aussage über den Korrosionszeitraum gemacht werden, in dem noch nicht die Gefahr eines Tragfähigkeitsverlustes besteht. Ist dieser Zeitraum überschritten, dann ist ein Tragfähigkeitsverlust zu erwarten, dessen Größenordnung aus den vorhandenen Versuchsreihen nur bedingt abgeschätzt werden kann, da hierzu Beobachtungen über sehr lange Zeiträume (je nach Randbedingungen bis zu mehreren Jahren) erforderlich wären.

Die Ausziehversuche liefern Daten für Korrosionszeiträume von bis zu einem Jahr. Bei Versuchsboden 2 (Fein- bis Mittelsand) konnte sowohl bei den kleinmaßstäblichen Ausziehversuchen als auch bei den Großversuchen schon nach kurzer Korrosionsdauer ein Abfall der Ankertragfähigkeit beobachtet werden. Innerhalb eines Jahres konnten in diesem Boden Tragkraftverluste bis zu 30 % beobachtet werden. Verpressanker in Böden im Fein- Mittel-sandbereich sind gegenüber Korrosion am ehesten anfällig, da auf der einen Seite der Boden eine ausreichende Durchlässigkeit aufweist um die Ausbildung einer korrodierten Zone zuzulassen, auf der anderen Seite aber auch nicht so große Korrosionstiefen erforderlich sind, um einen Verspannungsverlust zu mobilisieren, da der mittlere Korndurchmesser dieser Böden nicht sehr groß ist.

Bei den hier vorgestellten Ergebnissen handelt es sich um Versuche an Böden welche ausgewählte Kornverteilungen aufweisen. Zur weiteren Bestätigung bzw. Verfeinerung der gemachten Aussagen ist die Durchführung weiterer Ausziehversuche an Ankerkörpern empfehlenswert.

Es bietet sich an, weitere kleinmaßstäbliche Ausziehversuche mit Ankerdurchmessern von 40 mm an Böden unterschiedlicher Zusammensetzung durchzuführen, um die Böden im Bereich eines Fein- Mittelsandes, in denen ein signifikanter Tragfähigkeitsverlust stattfindet, genauer zu erfassen und die Effekte ihrer Granulometrie auf den Korrosionsfortschritt bzw. den Spannungsverlust näher zu untersuchen.

Um festzustellen ob der stärkere Abfall der Tragfähigkeit beim größeren Ankerdurchmesser ausschließlich auf den Unterschieden zwischen den kleinmaßstäblichen Versuchen und den Großversuchen begründet ist, soll außerdem noch eine Versuchsreihe im Boden 2 mit einem größeren Ankerdurchmesser ($\varnothing = 130$ mm) mit Korrosionszeiträumen von 90, 180 und 360 Tagen und zwei unkorrodierten Großversuchen durchgeführt werden. In diesem Rahmen wären auch Langzeitversuche (Standzeit größer ein Jahr) denkbar.

6 Literatur

- [1] DIN 4125 (1990): Verpressanker – Kurzzeitanker und Dauerankerbemessung, Ausführung und Prüfung, 1990.
- [2] DIN EN 1537 (2001): Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) – Verpressanker – Deutsche Fassung EN 1537:1999 + AC:2000, Januar 2001.
- [3] C. Hof, Th. Triantafyllidis (2003): Über das Scherverhalten von korrodierten Zementkörperoberflächen. Bautechnik, 80. Jahrgang, Dezember 2003, Heft 12, S. 896 - 902.
- [4] C. Hof, Th. Triantafyllidis (2003): Tragverhalten von Verpressankern unter kalklösender CO₂-Belastung, Abschlußbericht T 3025, Fraunhofer IRB Verlag.
- [5] C. Hof (2004): Über das Verpressankertragverhalten unter kalklösendem Kohlensäureangriff. Dissertation. Schriftenreihe des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum, Heft 35, Bochum.
- [6] C. Hof, Th. Triantafyllidis & F. Schmidt-Döhl (2002): Einfluss von kalklösender Kohlensäure auf das Tragverhalten von Verpressankern. Geolex, 1. Jahrgang, Heft 1, September 2002, S. 31 – 41.
- [7] C. Hof, Th. Triantafyllidis & F. Schmidt-Döhl (2004): Über die Abnahme der Tragfähigkeit von Verpressankern unter Angriff von kalklösender Kohlensäure. Bautechnik, 81. Jahrgang, Mai 2004, Heft 5, S. 357-363.
- [8] C. Hof, Th. Triantafyllidis (2005): Über die Modellierung des Tragfähigkeitsverlusts von Verpressankern unter Angriff von kalklösender Kohlensäure. Bautechnik, 82. Jahrgang, Mai 2005, Heft 5, S. 310 - 317.
- [9] W. Manns, H.-D. Lange (1993) : Einfluß aggressiver Wässer und Böden auf das Langzeitverhalten von Verpressankern und Verpresspfählen, Abschlußbericht zu Teil II: Ausziehversuche. Forschungsbericht T2550, IRB-Verlag, Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau, Stuttgart.