

Corrosion damage to cantilever MR walls – Representation in tests and calculations

Korrosionsschäden an Winkelstützmauern – Versuchstechnische und rechnerische Nachbildung

After the failure of a cantilever retaining wall with counterfort on the Brenner Autobahn, intensive investigation of existing structures showed considerable corrosion damage to cantilever walls with and without counterforts, at the location of construction and day joints. This is difficult to detect and assess due to the placing of the main reinforcement at the back of the construction. The present paper presents a monitoring concept, which enables detection of corrosion damage and also provides a gain of information about the behaviour of the structure. The basis for this concept is the installation of inclination and strain gauges on the front of a retaining wall. In order to explain the functioning of the concept, a rudimentary cantilever model of the effect of corrosion damage is first described. Then the results and findings from a test series with artificial corrosion representation to reinforced concrete structures to validate the presented monitoring concept is described.

1 Corrosion damage to retaining walls

Corrosion damage to reinforced concrete structures can limit their service life [1], and can also have a significant effect on their loadbearing capacity and stability. In addition to corrosion damage to bridges [2] and multi-storey car parks [3], which are associated with chloride effects, similar damage patterns and effects are also observed to retaining walls. Due to their vicinity to infrastructure facilities and the slope and seepage water from the road, considerable chloride exposure is possible for these structures with the resulting corrosion potential to the reinforcement.

The two examples in Figure 1 show that massive corrosion damage is possible to the reinforcement due to weak points, which can be caused by a construction joint (or also by honeycombing). Figure 1a shows that in addition to general corrosion damage in the form of a loss of cross-section, the distribution of such damage to the individual reinforcement bars can be non uniform.

This possible, very widely scattered distribution of corrosion damage also hinders the identification of such damage. Reliable determination of corrosion damage is generally only possible after exposing the entire construction joint, which generally demands a great input of personnel and resources. The use of destructive investigation methods [5] like core drilling or the opening of windows by high-pressure water jetting only enable a view of the damage to the back of the structure at points. The use of

Nach dem Versagensfall einer Spornmauer auf der Brennerautobahn zeigte sich im Zuge intensiver Bestandserfassungen, dass vor allem im Bereich der Arbeits- und Betonierfugen von Winkelstütz- und Spornmauern erhebliche Korrosionsschäden vorliegen können. Diese sind aufgrund der Lage der Hauptbewehrung an der Hinterseite der Konstruktion schwierig zu erfassen und zu beurteilen. In vorliegendem Beitrag soll ein Monitoringkonzept vorgestellt werden, das die Erfassung von Korrosionsschäden ermöglicht und zudem auch einen Informationsgewinn in Bezug auf das Bauwerksverhalten aufweist. Die Grundlage für ein derartiges Konzept bildet die Anbringung von Neigungs- und Dehnungsaufnehmern an der Vorderseite eines Stützbauwerks. Um die Funktionsweise dieses Konzepts zu veranschaulichen, wird einleitend an einem rudimentären Stabmodell der Einfluss einer Korrosionsschädigung auf das Bauwerksverhalten aufgezeigt. Anschließend werden die Ergebnisse und Erkenntnisse aus einer Versuchsreihe zur künstlichen Korrosionsnachbildung bei Stahlbetonbauwerken zur Validierung des vorgestellten Monitoringkonzepts ausgeführt.

1 Korrosionsschäden bei Stützbauwerken

Korrosionsschäden an bewehrten Betonbauwerken schränken zum einen deren Lebensdauer [1] ein, können jedoch auch einen signifikanten Einfluss auf die Tragfähigkeit und Zuverlässigkeit solcher Bauwerke aufweisen. Neben den Korrosionserscheinungen an Brücken [2] und Parkbauten [3], die im Zusammenhang mit Chlorideinwirkung stehen, sind ähnliche Schadensbilder und Effekte auch bei Stützbauwerken zu beobachten. Aufgrund ihrer Nähelage zu Infrastruktureinrichtungen bzw. auch aufgrund der anfallenden Hang- und Sickerwässer aus dem Straßenbereich, ist bei diesen Bauwerken eine erhebliche Chloridbelastung und daraus folgend ein großes Korrosionspotenzial der Bewehrung möglich.

Die beiden Beispiele in Bild 1 zeigen, dass zufolge von Schwachstellen, die durch eine Arbeitsfuge (bzw. auch durch Kiesnester) verursacht werden können, massive Korrosionsschäden an der Bewehrung möglich sind. Bild 1a zeigt, dass neben einer generellen Korrosionsschädigung in Form eines Querschnittsverlustes auch eine sehr unregelmäßige Verteilung derartiger Schäden an den einzelnen Bewehrungsstäben vorliegen kann.

Diese mögliche, sehr weitstreuende Verteilung einer Korrosionsschädigung beeinträchtigt auch die Erfassung derartiger Schadensbilder. Eine zutreffende Feststellung

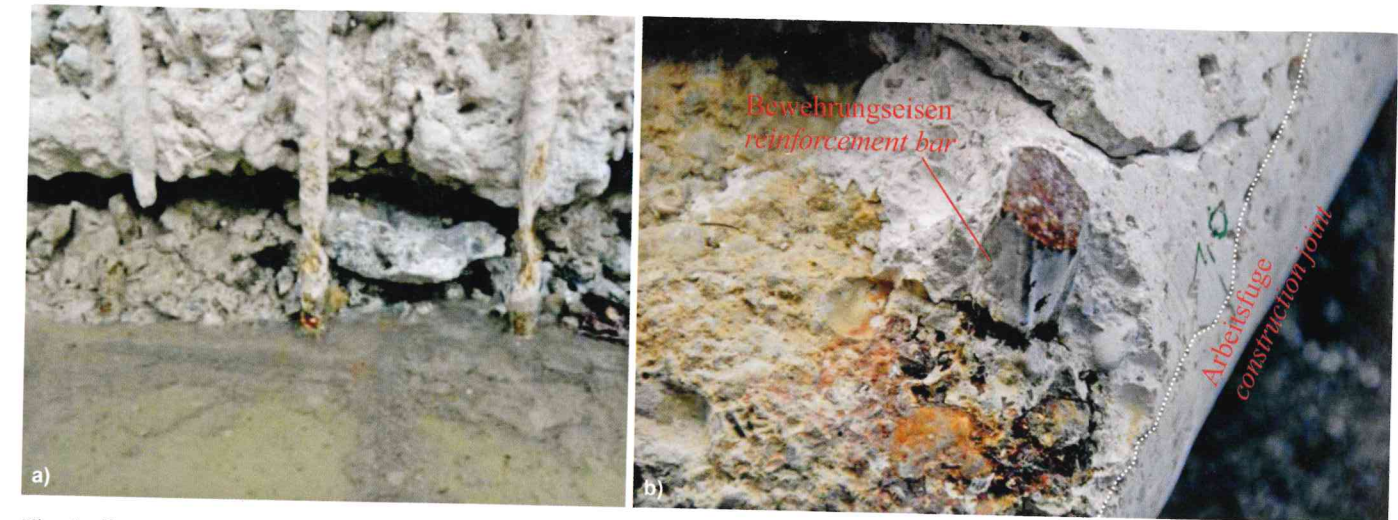


Fig. 1. Corrosion damage along the construction joint of cantilever walls: a) distribution of corrosion to an exposed cantilever wall (adapted acc. to [4]); b) corrosion damage to the main reinforcement in a core drilling. Bild 1. Korrosionsschäden im Bereich der Arbeitsfuge von Winkelstützmauern: a) Verteilung der Bewehrungskorrosion entlang der freigelegten Fuge einer Winkelstützmauer (adaptiert nach [4]); b) Korrosionsschaden an der Hauptbewehrung einer entnommenen Kernbohrung

such methods is also associated with invasive and sustained damage to the structure.

The recording of corrosion damage is an important part of checking, above all for cantilever walls with and without counterforts [6] [7]. Since only statements can be made about structural safety and loadbearing capacity that are unspecific or based on estimates, monitoring of the structure is often specified [8]. This is intended to detect any change of structural behaviour and signs of failure and can also be used as a basis for ensuring serviceability, in combination with alarm and threshold values as well as the associated measures (e.g. road closures).

2 Calculation of corrosion damage to concrete elements

There are currently few concepts for the calculation of corrosion damage to reinforced concrete structures [9]. Some of these methods are based on a damage indicator, which can describe the consequences of damage to the loadbearing behaviour of reinforced concrete structures [10]. Using the following example, an approach [11] is presented, which enables the representation of the behaviour of a retaining structure under the effects of corrosion. This approach is only of a qualitative nature and serves as the basis for the monitoring concept presented in Section 3.

The system in Figure 2a shows a cantilever representing the vertical part of a cantilever wall. The geometry or also the cross-section are taken from an example from Suda et al. [12] with slight adaptation to the present requirements. The reduction of stiffness due to the transition from uncracked to cracked has been taken into account for this cantilever together with the implementation of variable corrosion damage (cf. bending stiffnesses Table 1) along the construction joint. Long-term effects from creep in the concrete have been considered in the determination of the stiffness values. The corrosion damage was taken into account through a reduction of the reinforcement diameter (cf. Table 1, left-hand column).

eines Korrosionsschadens ist im Allgemeinen nur bei der Freilegung der gesamten Bauwerksfuge möglich. Hierzu ist jedoch im Allgemeinen ein großer Personal- und Ressourceneinsatz erforderlich. Durch die Anwendung zerstörender Untersuchungsmethoden [5] wie Kernbohrungen oder Herstellung von Sichtfenstern mittels Hochdruckwasserstrahlen wird lediglich ein punktueller Einblick in die vorliegenden Schäden an der Bauwerksrückseite ermöglicht. Zudem geht mit der Anwendung derartiger Methoden auch eine invasive und nachhaltige Schädigung des Bauwerks einher.

Die Erfassung von Korrosionsschäden stellt vor allem bei Winkelstütz- und Spornmauern einen wichtigen Bestandteil der Prüfung dar [6] [7]. Da hierzu nur sehr unspezifische bzw. auf Abschätzungen basierende Aussagen über die Bauwerkssicherheit bzw. die Tragfähigkeit getroffen werden können, wird oftmals ein Monitoring der Bauwerke angeordnet [8]. Dieses soll eine mögliche Veränderung des Bauwerksverhaltens und eine eventuelle Versagensankündigung aufzeigen. Darauf aufbauend kann, in Kombination mit Alarm- und Grenzwerten sowie den damit einhergehenden Maßnahmen (z.B. Streckensperre), die Verkehrstauglichkeit sichergestellt werden.

2 Berechnung von Korrosionsschäden an Betonbauteilen

Zur Berechnung von Korrosionsschäden an Stahlbetonbauwerken sind aktuell lediglich wenige Konzepte vorhanden [9]. Einige dieser Ansätze beruhen auf einem Schadensindikator, der über die Folgen von Schädigungen auf das Tragverhalten von Stahlbetonkonstruktionen [10] beschrieben werden kann. Anhand des nachfolgenden Beispiels soll ein Ansatz [11] vorgestellt werden, der es ermöglicht, das Verhalten eines Stützbauwerks unter Einwirkung einer Korrosionsschädigung entlang der Arbeitsfuge abzubilden. Dieser Ansatz ist lediglich qualitativer Natur, und dient als Grundlage für das in Kapitel 3 vorgestellte Monitoringkonzept.

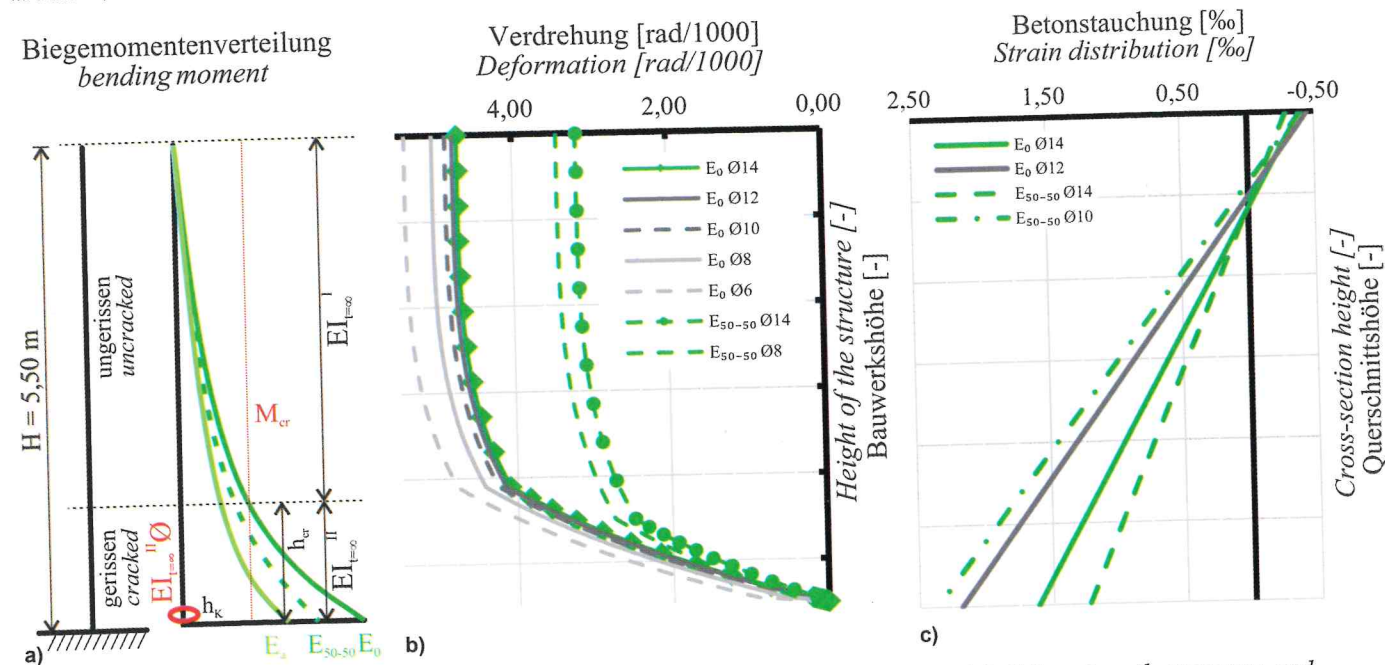


Fig. 2. Analytical simulation of corrosion damage to a cantilever wall: a) cantilever with different earth pressures and distribution of its bending stiffness; b) Corrosion damage influencing the deformation of the structure; c) Corrosion damage influencing the strain distribution along a RC cross-section (adapted acc. to [11])
Bild 2. Analytischer Ansatz zur Nachbildung einer Korrosionsschädigung bei Winkelstützmauern: a) Kragarm zur Abbildung des vertikalen Wandschenkels inklusive Steifigkeitsverteilung und Erddruckbeanspruchung; b) Einfluss einer Korrosionsschädigung auf die Bauwerksverdrehung; c) Einfluss einer Korrosionsschädigung auf die Dehnungsebene des Querschnitts (adaptiert nach [11])

In addition to the simulation of corrosion damage around the construction joint, the influence of temperature and earth pressure changes on the structure were also investigated in more detail. The various effects on the rotation of the structure should be made clear by the comparison in Figure 3. For a uniform representation, the relative deformation $\Delta\alpha$ [11] was selected in Equation (1). This represents the ratio of an existing deformation due to loading and damage (α_i) and the deformation of an undamaged structure loaded with the earth pressure at rest (α_{E0}).

Table 1. Influence of different effects on the bending stiffness of a RC-cross-section [11]
Tabelle 1. Einfluss unterschiedlicher Belastungs- und Schädigungszustände auf die Biegesteifigkeit des Betonquerschnitts und Angabe des damit verbundenen Korrosionsgrads C_i als Abnahme der Querschnittsfläche [11]

	E_a	$E_{50/50}$	E_0	C_i [%]
h_{cr}	0.4	1	1.4	m
$EI_{t=00}^I$		180		MNm ²
$EI_{t=00}^{II}$		60		MNm ²
$EI_{t=00}^{II} \varnothing 14$		60		MNm ²
$EI_{t=00}^{II} \varnothing 12$		74		MNm ²
$EI_{t=00}^{II} \varnothing 10$		35		MNm ²
$EI_{t=00}^{II} \varnothing 8$		24		MNm ²
$EI_{t=00}^{II} \varnothing 6$		14		MNm ²

Das Stabsystem in Bild 2a zeigt einen Kragarm, der den vertikalen Wandschenkel einer Winkelstützmauer repräsentiert. Die Geometrie bzw. auch der Querschnitt wurden einem Beispiel nach Suda et al. [12] entnommen und geringfügig an die vorliegenden Anforderungen angepasst. Die Steifigkeitsabnahme durch den Übergang von Zustand I zu Zustand II des Betonquerschnitts wurde an diesem Stab gemeinsam mit der Implementierung einer variablen Korrosionsschädigung (vgl. Biegesteifigkeiten Tabelle 1) in der Arbeitsfuge berücksichtigt. Langzeiteffekte des Kriechens von Beton wurden bei der Ermittlung der Steifigkeitswerte einbezogen. Die Korrosionsschädigung wurde hierbei durch eine Abnahme des Bewehrungsdurchmessers (vgl. Tabelle 1, linke Spalte) berücksichtigt.

Neben der Simulation einer Korrosionsschädigung im Bereich der Arbeitsfuge wurde auch der Einfluss einer Temperatur- sowie Erddruckänderung auf das Bauwerk näher untersucht. Die unterschiedlichen Einflüsse auf die Verdrehung des Bauwerks sollen anhand der Gegenüberstellung in Bild 3 verdeutlicht werden. Zur einheitlichen Darstellung wurde die in Gleichung (1) definierte Bezogene Verdrehung $\Delta\alpha$ [11] gewählt. Diese stellt das Verhältnis zwischen einer zufolge Belastung und Schädigung vorliegenden Verdrehung (α_i) und der Verdrehung bei einem ungeschädigten, durch den Erdruchdruck belasteten Bauwerk (α_{E0}) dar.

$$\Delta\alpha = \frac{\alpha_i}{\alpha_{E0}} \quad (1)$$

Es zeigt sich, dass zufolge einer Temperatureinwirkung mit konstantem Gradienten (A) eine gleichmäßige Zunahme der Verdrehungen erfolgt. Eine Änderung der Belas-

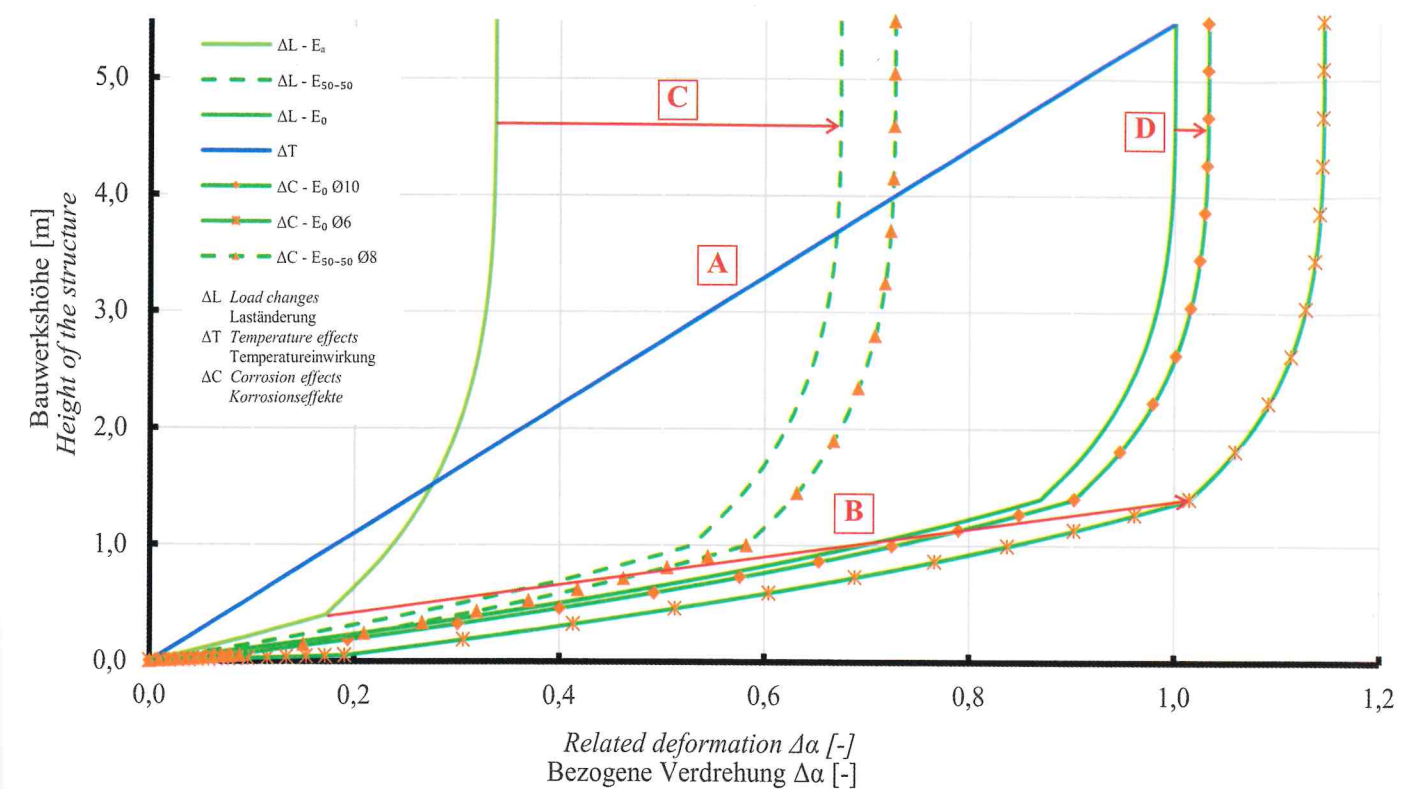


Fig. 3. Comparison of different effects on the deformation of a cantilever wall (adapted acc. to [11])
Bild 3. Gegenüberstellung unterschiedlicher Einflüsse auf die Verdrehung einer Winkelstützmauer (adaptiert nach [11])

$$\Delta\alpha = \frac{\alpha_i}{\alpha_{E0}} \quad (1)$$

It turns out that a uniform increase of rotation is caused by temperature action with constant gradient (A). A change of loading (e.g. increased earth pressure) is shown by a translation of the kink (B) upwards due to the cracking of the cross-section. Additionally this leads to an increase in the deformation (C). This structural behaviour is however practically similar to an increase of deformation (D) as a result of an emerging “corrosion hinge” (h_k , cf. Figure 2a). The difficulty is to separate the individual effects from each other and clearly identify them, since they also have different effects on structural safety.

In addition to the analytical investigations of the behaviour of a cantilever wall under the effects of corrosion damage described here, numerical investigations were also performed [13] [14] [15]. These are however not dealt with in more detail in the present paper.

3 Monitoring concept for corrosion-damaged retaining walls

Building on the results of the analytical investigations of structural behaviour on a cantilever model, a monitoring concept was prepared to enable the determination of corrosion damage to retaining structures. For this purpose it is necessary to install not only inclinometers but also strain gauges to record the concrete strains at various levels on the front of the structure. This is shown schematically in Figure 4a as a section through a cantilever wall with possible positions of sensors (① to ④).

With a suited installation (Figure 4b) of pairs of inclination and strain gauges at several points on the front of

tung (z. B. Erddruckzunahme) wird zum einen durch eine Verschiebung des Knickpunkts (B) nach oben, zufolge des Reißens des Querschnitts, ersichtlich. Zum anderen liegt auch eine Zunahme der Verdrehung (C) vor. Dieses Bauwerksverhalten ist jedoch praktisch ähnlich zu einer Zunahme der Verdrehungen (D) zufolge eines „Korrosionsgelenks“ (h_k , vgl. Bild 2a) im Bereich der Arbeitsfuge. Die Schwierigkeit besteht darin, die einzelnen Effekte voneinander zu trennen und eindeutig zu identifizieren, da diese auch unterschiedliche Auswirkungen auf die Bauwerkssicherheit besitzen.

Neben den hier angeführten analytischen Untersuchungen zum Verhalten einer Winkelstützmauer unter dem Einfluss einer Korrosionsschädigung wurden zusätzlich numerische Untersuchungen durchgeführt [13] [14] [15]. Diese werden jedoch in vorliegendem Beitrag nicht näher behandelt.

3 Monitoringkonzept für korrosionsgeschädigte Stützbauwerke

Aufbauend auf den Ergebnissen der analytischen Untersuchung zum Bauwerksverhalten an einem Stabmodell wurde ein Monitoringkonzept erarbeitet, das die Erfassung von Korrosionsschäden an Stützbauwerken ermöglichen soll. Dazu ist es erforderlich, neben Neigungssensoren auch Dehnungsaufnehmer zur Erfassung der Betonstauchungen in verschiedenen Höhenlagen an der Bauwerksvorderseite anzubringen. Dies ist schematisch in Bild 4a anhand eines Schnitts durch eine Winkelstützmauer und die Positionierung von Sensoren (① bis ④) angedeutet.

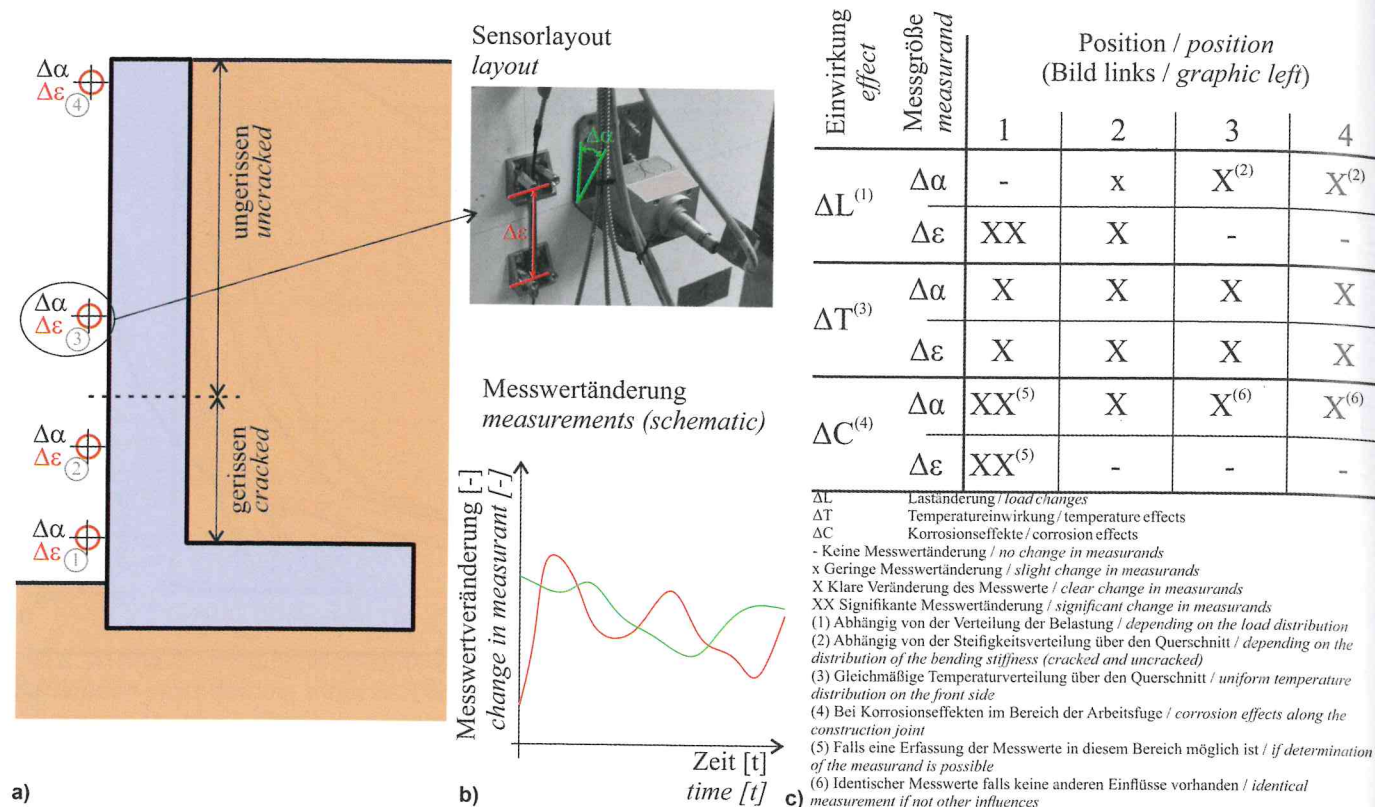


Fig. 4. Monitoring of corrosion-damaged cantilever walls: a) spread out positioning of the sensors; b) sensor layout; c) detection possibilities of the concept

Bild 4. Monitoringkonzept für korrosionsgeschädigte Winkelstützmauern: a) verteilte Anordnung der Sensoren an der Bauwerksvorderseite; b) Sensorlayout; c) Detektionsmöglichkeiten des Monitoringkonzepts

the structure, both changes to the overall structure (inclination) and also to the cross-section (concrete strain) can be recorded. By an overall consideration of the measured results a general differentiation between the effects described in Figure 3 is possible. The method of differentiating the effects on the behaviour of the structure and of the section is shown in Figure 4c.

4 Test validation of the monitoring concept

In order to test and validate the monitoring concept, a test rig was set up. This consists of a four-point bending test, in which the load is however applied to the underside in order to enable the exposure of the reinforcement at the upper side. Corrosion damage is simulated by a reduction of the reinforcement area. This process is based on a model of electrochemical machining [16] and has already been used in other tests on corrosion damage [17].

Figure 5 shows the test rig to validate the monitoring concept. The concrete slab for the simplified representation of a cantilever can be seen (cf. [11]). In axis D (centre of the plate), a joint is placed at the upper side to represent corrosion damage. The loading is applied by a hydraulic press in the supports C and E, with the two abutments on axes A and G. Part of the measuring equipment of the test rig can also be seen in the picture. At the upper side of the plate (tension zone) are the two inclinometers 04b and 04d, and optical strain gauges (FBG strain gauges HBM FS62 [18]) installed underneath. The sensor 05c was mounted outside the influence of the corrosion joint. The

Durch eine angepasste und paarweise Anbringung (Bild 4b) von Neigungs- und Dehnungsaufnehmern an mehreren Punkten der Bauwerksvorderseite können sowohl Veränderungen der Gesamtstruktur (Neigungen) als auch auf Querschnittsebene (Betonstauchungen) erfasst werden. Durch eine gemeinsame Betrachtung der Messergebnisse wird eine grundsätzliche Unterscheidung zwischen den in Bild 3 dargestellten Einflüssen ermöglicht. Der Ansatz, wie sich unterschiedliche Effekte auf das Bauwerks- und Querschnittsverhalten auswirken ist in Bild 4c dargestellt.

4 Versuchstechnische Validierung des Monitoringkonzepts

Zur Erprobung und zur Validierung des Monitoringkonzepts wurde ein Versuchsstand errichtet. Dieser besteht aus einem Vierpunktbiegeversuch, bei dem die Last jedoch an der Unterseite aufgebracht wurde, um ein Freiliegen der Bewehrung an der Oberseite zu ermöglichen. Die Simulation einer Korrosionsschädigung wurde durch eine Querschnittsreduktion der Bewehrung durchgeführt. Dieser Prozess basiert auf der Methode des elektrochemischen Abtrags [16] und kam bereits in anderen Versuchsreihen zu Korrosionsschäden [17] zur Anwendung.

Bild 5 zeigt den Versuchsaufbau zur Validierung des Monitoringkonzepts. Darin lässt sich die Betonplatte zur vereinfachten Nachbildung eines Kragträgers (vgl. [11]) erkennen. In Achse D (Plattenmitte) wurde eine Bauteilfuge an der Oberseite der Platte zur Nachbildung einer Korrosionsschädigung angeracht. Die Belastung wird

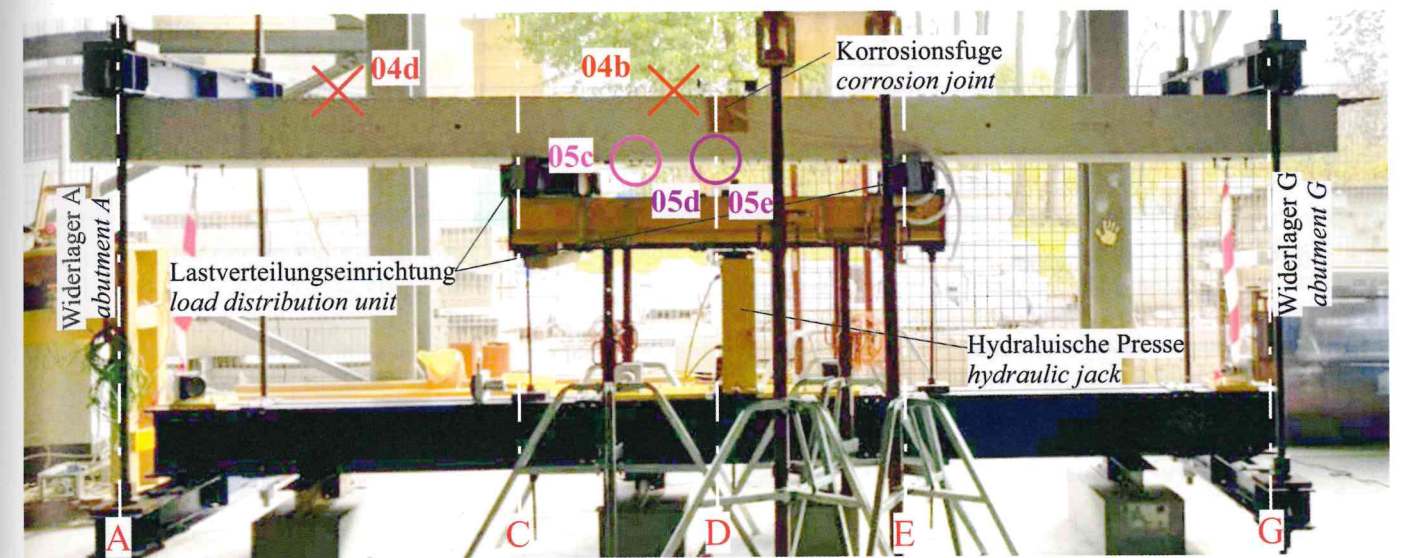


Fig. 5. 4-point bending test set up for the validation of the monitoring concept on corrosion-damaged cantilever walls (adapted acc. to [11])

Bild 5. Vierpunktbiegeversuch zur Validierung des Monitoringkonzepts für korrosionsgeschädigte Winkelstützmauern (adaptiert nach [11])

two sensors 05d (centre of the plate) and 05e (edge of the plate) were mounted opposite (underneath) the corrosion joint (underside of the plate).

The test results to represent corrosion damage to retaining structures are shown in Figure 6. The time axis (corresponding to an increasing degree of corrosion) is only an excerpt from the overall test duration. In addition the degree of corrosion C_i (loss of cross-sectional area of the reinforcement, cf. Table 1, right-hand column) are illustrated. The upper diagram shows the change of the two inclinometers 04b and 04d. These show that only at a very high degree of corrosion, a notification is given due to a (significant) change of inclination. In contrast to this, the two strain gauges 05b and 05d (in the section of the construction joint) already show an increase of the measured values at lower degrees of corrosion. The results measured by sensor 05c however remain uninfluenced by the corrosion damage.

This short discussion of the measured results shows that recording of the inclination alone only makes damage indication possible to a certain extent because of the lower measured quantity and the very late change of measured values. The installation of additional strain gauges to significant parts of the structure (cf. Figure 4a) enables the gain of additional information and statements about the structural behaviour. These enable firstly a differentiation between load, temperature and corrosion influences and show a considerably greater significance with regard to the recording of corrosion damage. Finally it should be noted concerning the measured results that these are artificially accelerated in the described test set-up. In practice, the progression of a degree of corrosion C_i from 60 to 65 % takes a considerably longer time than shown here in the test. Therefore the structure offers a potential to announce an upcoming failure.

In addition to the simulation of corrosion damage (cf. Figure 6), the effects of changes in load or temperature (by heating the underside) were also represented. The entire

durch eine Hydraulikpresse in den Auflagern C und E aufgebracht, die beiden Widerlager befinden in den Achsen A und G. Zusätzlich ist in diesem Bild ein Teil der messtechnischen Ausrüstung des Versuchsstands zu erkennen. An der Plattenoberseite (Zugzone) befinden sich die beiden Neigungsaufnehmer 04b und 04d. An der Unterseite wurden optische Dehnungsaufnehmer (FBG Dehnungsaufnehmer HBM FS62 [18]) angebracht. Der Sensor 05c wurde dabei außerhalb des Einflusses der Korrosionsfuge angebracht. Die beiden Sensoren 05d (Plattenmitte) und 05e (Rand Platte) wurden gegenüberliegend (unterhalb) der Korrosionsfuge (an der Plattenunterseite) installiert.

Ergebnisse dieses Versuchs zur Nachbildung von Korrosionsschäden an Stützbauwerken sind in Bild 6 dargestellt. Die Zeitachse (entspricht einer Zunahme des Korrosionsgrads) stellt hierbei lediglich einen Ausschnitt aus der gesamten Versuchsdauer dar. Zusätzlich sind die Korrosionsgrade C_i (Verlust der Querschnittsfläche der Bewehrung, vgl. Tabelle 1, rechte Spalte) angeführt. Das obere Diagramm zeigt die Veränderung der beiden Neigungssensoren 04b und 04d. Diese lassen erkennen, dass erst ab einem sehr hohen Korrosionsgrad eine Ankündigung zufolge einer (signifikanten) Neigungsänderung zu erkennen ist. Im Gegensatz hierzu zeigen die beiden Dehnungsaufnehmer 05b und 05d (im Querschnitt der geschädigten Fuge) bereits bei geringeren Korrosionsgraden einen Anstieg der Messwerte. Von der Korrosionsschädigung unbeeinflusst bleiben die Messergebnisse an Sensor 05c.

Diese kurze Aufbereitung der Messergebnisse zeigt, dass durch die ausschließliche Erfassung der Neigungen aufgrund der geringeren Messgröße sowie der sehr späten Messwertänderung eine Schadensindikation nur bedingt möglich ist. Durch die Installation zusätzlicher Dehnungsaufnehmer an signifikanten Bereichen des Bauwerks (vgl. Bild 4a) können zusätzliche Informationen und Aussagen über das Bauwerksverhalten gewonnen werden. Diese ermöglichen zum einen eine Unterscheidung zwischen last-, temperatur- und korrosionsbedingten Einflüssen und zei-

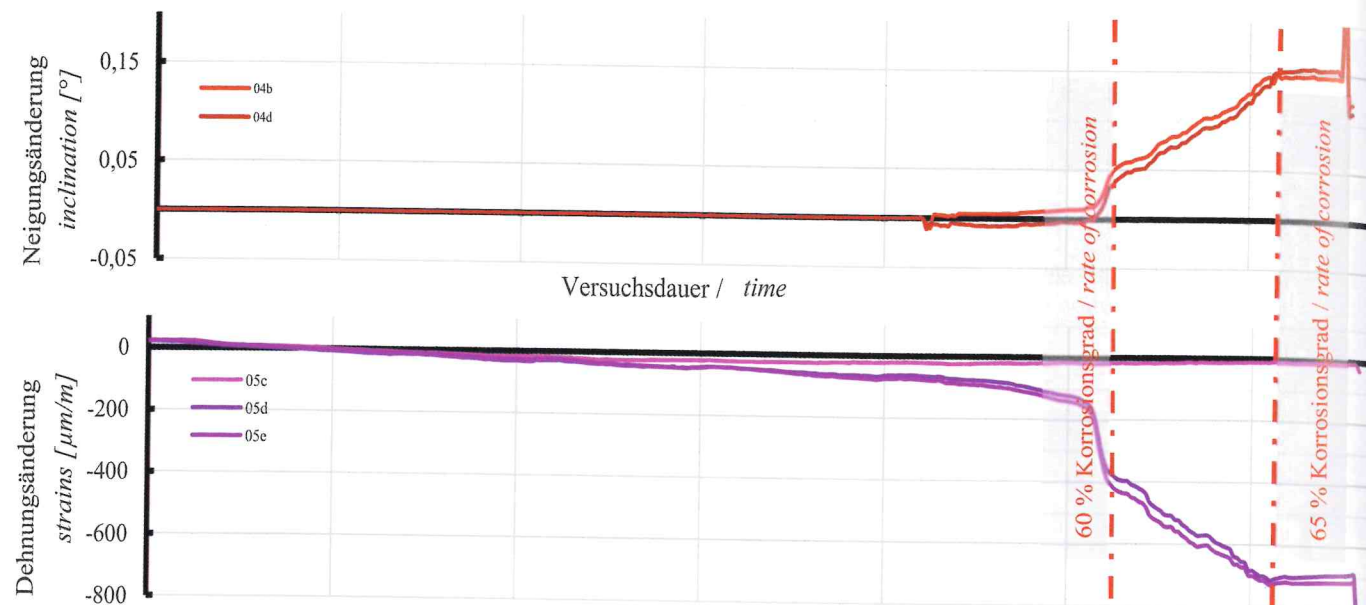


Fig. 6. Results of the test set-up with increasing degree of corrosion: a) changes in inclination; b) changes in strains/concrete compression (adapted acc. to [11])

Bild 6. Ergebnisauszug aus dem Versuchsstand SIBS_V3 bei einer Zunahme des Korrosionsgrads: a) Änderungen der Neigung; b) Änderungen in den Dehnungen/Betonstauchungen (adaptiert nach [11])

test sequence and a detailed evaluation of the test results are shown in [9] and [11].

5 Summary

The presented monitoring concept for the determination of the structural behaviour and particularly to detect the effects of corrosion has been investigated both with an analytical investigation and also with tests to validate its applicability. This shows that the determination of corrosion damage to cantilever walls by recording changes in inclination alone is difficult and subjected to great risk. With the gain of information following the additional installation of strain gauges at several locations, it is possible to generate more useful information, which enables the differentiation of various effects (e.g. of temperature, or earth pressure changes). With detailed planning and an appropriate arrangement of the sensors, the behaviour of the structure can be divided into the effects of temperature, loading and corrosion. In addition to the findings about corrosion damage, general added value can be gained regarding the structure.

With the presented test series, the general behaviour of corrosion-damaged retaining structures was indeed investigated but there is still no experience of the interaction of different influences, such as would be possible or probable in practice. Furthermore, a detailed and well-founded risk evaluation should be undertaken before the practical application of the presented monitoring concept. In addition to the application of the presented and validated monitoring concept for retaining structures, this concept of structural monitoring could also be used for monitoring other constructions suffering under corrosion such as bridges.

gen in Bezug auf die Erfassung von Korrosionsschäden eine deutlich größere Signifikanz auf. Abschließend sei bei den Messergebnissen anzumerken, dass diese im Versuch künstlich beschleunigt wurden. Unter praktischen Gesichtspunkten nimmt das Fortschreiten des Korrosionsgrads C_i von 60 auf 65% eine deutlich längere Zeitspanne in Anspruch als hier im Versuch aufgezeigt. Dadurch ist im Allgemeinen ein Ankündigungspotenzial des Bauwerks in Bezug auf ein Versagen zu erwarten.

Neben der Simulation einer Korrosionsschädigung (vgl. Bild 6) wurde auch der Einfluss einer Laststeigerung bzw. einer Temperatureinwirkung (mittels Aufheizen der Unterseite) abgebildet. Der gesamte Versuchsablauf bzw. auch eine detaillierte Aufarbeitung der Versuchsergebnisse ist in [9] und [11] dargestellt.

5 Zusammenfassung

Das vorgestellte Monitoringkonzept zur Erfassung des Bauwerksverhaltens und im Speziellen zur Bestimmung von Korrosionseinflüssen wurde sowohl durch eine analytische Untersuchung zu derartigen Schadensbildern als auch durch eine versuchstechnische Validierung auf seine Anwendbarkeit hin untersucht. Dies zeigte, dass die Bestimmung einer Korrosionsschädigung bei Winkelstützmauern lediglich durch die Erfassung einer Neigungsänderung schwierig bzw. sehr risikobehaftet ist. Durch den Informationsgewinn zufolge der zusätzlichen Anbringung von Dehnungsaufnehmern an mehreren über die Höhe verteilten Positionen an der Bauwerksvorderseite ist es möglich, einen Informationsmehrwert zu generieren, der die Unterscheidung von unterschiedlichen Einflüssen (z.B. Temperatur, Erddruckänderung) ermöglicht. Durch eine detaillierte Planung sowie eine zweckmäßige Anordnung der Sensoren kann das Bauwerksverhalten in Bezug auf temperatur-, last- und korrosionsbedingte Effekte untergliedert werden. Neben den Erkenntnissen über eine

Acknowledgement

Detailed investigations and research activities in this area of geotechnics could be carried out thanks to the FFG-supported research project SIBS – “Sicherheitsbewertung bestehender Stützbauwerke” (Safety assessment of existing retaining structures). Thanks for their support of this project are also due to the association of Austrian boring, well sinking and specialised civil engineering companies (VÖBU), the Austrian autobahn operator Asfinag and Austrian railways (ÖBB), as well as the entire research team and the industrial partners and supporters of the research project.

References

- [1] Bergmeister, K., Fingerloos, F., Wörner, J.D. (Hrsg.): Beton-Kalender 2013 – Lebensdauer und Instandsetzung, Brandschutz. Berlin: Ernst & Sohn, 2012.
- [2] Bergmeister, K., Fingerloos, F., Wörner, J.D. (Hrsg.): Beton-Kalender 2015 – Bauen im Bestand, Brücken. Berlin: Ernst & Sohn, 2014.
- [3] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V.: Merkblatt 39 – Ist-Zustandserfassung von Parkbauten in Betonbauweise. Berlin, 2017.
- [4] Opan, E.: La menace des murs de soutènement Focus sur les murs en béton armé à semelle. Fachtagung Stützmauern. Bern, 2017.
- [5] ÖGG: Empfehlungen zur vertieften Prüfung und Beurteilung bestehender, unverankerter Stützbauwerke. Österreichische Gesellschaft für Geomechanik. Salzburg, 2019.
- [6] RVS 13.03.61: Qualitätssicherung bauliche Erhaltung – Überwachung, Kontrolle und Prüfung von Kunstbauten – Nicht geankerte Stützbauwerke. Österreichische Forschungsgesellschaft Straße, Schiene, Verkehr. Wien, 2014.
- [7] Kirchmair, M.: Ungeankerte Stützbauwerke der ASFINAG, Erfahrungen und Vorgangsweise. Fachtagung Stützmauern. Bern, 2017.
- [8] RVS 13.03.01: Qualitätssicherung bauliche Erhaltung – Überwachung, Kontrolle und Prüfung von Kunstbauten – Monitoring von Brücken und anderen Ingenieurbauwerken. Österreichische Forschungsgesellschaft Straße, Schiene, Verkehr. Wien, 2012.
- [9] Forschungsgruppe SIBS: Abschlussbericht Forschungsprojekt SIBS – Sicherheitsbewertung bestehender Stützbauwerke. noch nicht publiziert.
- [10] Krätzig, W.B., Meskouris, K., Noh, S.Y.: Nichtlineares Nachweisverfahren zur Schädigungsermittlung von Stahlbetontragwerken / Teil 2. In: Beton- und Stahlbetonbau 98 (2003), S. 500–504. <https://doi.org/10.1002/best.200302200>.
- [11] Rebhan, M.J.: Korrosionsschäden bei Winkelstützmauern. PhD Thesis, Graz University of Technology, 2019.
- [12] Suda, J., Hofmann, R., Strauss, A., Wendner, R.: Bemessung eines Stützbauwerkes nach Eurocode – Teil 1: Ständige Bemessungssituation. Bautechnik 86 (2009), Heft 12, S. 782–793. <https://doi.org/10.1002/bate.200910077>.
- [13] Rebhan, M.J., Vorwagner, A., Kwapisz, M., Marte, R., Tschuchnigg, F., Burtcher, S.: Safety assessment of existing retaining structures / Sicherheitsbewertung bestehender Stützbauwerke. Geomechanics and Tunneling, 10 (2017), No. 5, pp. 524–532, 2017. <https://doi.org/10.1002/geot.201700023>.
- [14] Kwapisz, M., Vorwagner, A., Lechner, A., Rebhan, M.J.: Investigations on Existing Concrete Cantilever Walls Subjected to Reinforcement Corrosion. Proceedings of the 2017

Korrosionsschädigung kann somit auch ein genereller Mehrwert bezüglich des Bauwerks bestimmt werden.

Mit der vorgestellten Versuchsreihe wurde zwar das generelle Verhalten von korrosionsgeschädigten Stützbauwerken untersucht, jedoch liegen noch keine Erfahrungen bei einer Überlagerung unterschiedlicher Einflüsse, wie diese unter praktischen Gesichtspunkten möglich bzw. wahrscheinlich sind, vor. Weiters ist für den praktischen Anwendungsfall des vorgestellten Monitoringkonzepts eine eingehende und fundierte Risikobewertung vorzunehmen. Neben der Anwendung des vorgestellten und validierten Monitoringkonzepts auf Stützbauwerke kann dieses Konzept der Bauwerksüberwachung auch bei anderen korrosionsgefährdeten Konstruktionen wie beispielsweise Brückentragwerken zur Anwendung kommen.

Danksagung

Detailliertere Untersuchungen und Forschungstätigkeiten in diesem Bereich der Geotechnik konnten dank dem durch die FFG geförderten Forschungsprojekt SIBS – „Sicherheitsbewertung bestehender Stützbauwerke“ – durchgeführt werden. Der Dank für die Unterstützung in diesem Projekt geht an die Vereinigung Österreichischer Bohr-, Brunnen- und Spezialtiefbauunternehmen (VÖBU), die Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs- Aktiengesellschaft (Asfinag) und die Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB), sowie an das gesamte Forschungsteam sowie die Wirtschaftspartner und Unterstützer des Forschungsprojekts.

1 self-drilling system – 7 applications

TITAN micropile



- Slope and portal stabilisation 1 2
- Pipe umbrellas, spiles, radial bolting 3 4 5
- Working face anchors 6
- Springing point piles for minimising settlement 7

Further details: www.ischebeck.com

FRIEDR. ISCHEBECK GMBH
Loher Str. 31-79
58256 Ennepetal, Germany

ISCHEBECK
TITAN

fib Symposium – High Tech Concrete – Where Technology and Engineering Meet, pp. 2083–2091. Maastricht, 2017.

- [15] *Rebhan, M.J., Marte, R., Tschuchnigg, F., Vorwagner, A., Kwapisz, M.*: Safety assessment of existing retaining structures. Proceedings of the XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Reykjavik, 2019.
- [16] *Adam, P.*: Electrochemical Machining (ECM), In: Ferti-gungsverfahren von Turboflugtriebwerken. Technik der Turboflugtriebwerke. Basel: Birkhauser, 1998.
- [17] *Wöls, D.*: Versuchstechnische Untersuchung von korrosionsgeschädigten Winkelstützmauern. Diplomarbeit, Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik, TU Graz, 2018.
- [18] *HBM*: FS62: Optischer Dehnungssensor, Produktdatenblatt, Download von: <https://www.hbm.com/de/4600/fs62-optischer-dehnungssensor-fibersensing/>, Zugriff am 29.05.2019.



Dipl.-Ing. Dr.techn. Alois Vorwagner
Austrian Institute of Technology
Transportation Infrastructure Technologies
Giefinggasse 2
1020 Vienna
Austria
alois.vorwagner@ait.ac.at



Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Franz Tschuchnigg
Technische Universität Graz
Institut für Bodenmechanik und Grundbau und
Numerische Geotechnik
Rechbauerstraße 12
8010 Graz
Austria
franz.tschuchnigg@tugraz.at



Dipl.-Dipl.-Ing. Dr.techn. Matthias J. Rebhan,
B.Sc
Technische Universität Graz
Institut für Bodenmechanik, Grundbau und
Numerische Geotechnik
Rechbauerstraße 12
8010 Graz
Austria
rebhan@tugraz.at



Dipl.-Ing. Maciej Kwapisz
Austrian Institute of Technology
Transportation Infrastructure Technologies
Giefinggasse 2
1020 Vienna
Austria
maciej.kwapisz@ait.ac.at



Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Roman Marte
Technische Universität Graz
Institut für Bodenmechanik, Grundbau und
Numerische Geotechnik
Rechbauerstraße 12
8010 Graz
Austria
roman.marte@tugraz.at