



Dominik Wöls, BSc

**Versuchstechnische Untersuchung
von
korrosionsgeschädigten Winkelstützmauern**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Konstruktiver Ingenieurbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Roman Marte

Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik

Ass.Prof. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Dr.techn. Dirk Schlicke
Institut für Betonbau

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

Statutory declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz,

.....

(signature)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die mich im Laufe meines Studiums und während der Erstellung dieser Diplomarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zunächst möchte ich mich besonders bei meinem Betreuer Herrn Univ.- Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Roman Marte bedanken, der neben seiner konstruktiven Kritik und Beratung auch stets ein offenes Ohr für Fragen bei Baustellenbesichtigungen und interessanten Fachdiskussionen hatte.

Besonders möchte ich Herrn Bmst. Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Matthias Rebhan, BSc für sein überaus freundliches Engagement und für die kollegiale Zusammenarbeit während der Versuchsdurchführung danken.

Des Weiteren möchte ich ein großes Dankeschön jenen Kollegen aus dem Studium und meinen langjährigen Freunden widmen. Neben den Lernerfolgen die wir im Stahlbauzeichensaal gemeinsam erleben durften, sind vor allem die schönen Momente, die ein oder andere so wichtige Fachsimpelei und die manch länger andauernden fröhlichen Nächte, die meine in Graz zu einer der schönsten bisher gemacht hat.

Mein herzlichster Dank gilt meiner Familie, insbesondere meinen Eltern Paula und Hans, die mich während des gesamten Studiums in jeglicher Hinsicht bestmöglich unterstützt haben. Ohne eure Hilfe hätte ich die tollen Erfahrungen in der Studienzeit nicht sammeln können.

Zu guter Letzt danke ich meiner Freundin Christina für ihre Motivation und ihre Nachsicht dafür, dass ich während der Versuche im November/Dezember und beim Verfassen dieser Arbeit häufig wenig Zeit für sie hatte.

Diese Arbeit wurde im Zuge des durch die FFG geförderten Forschungsprojektes SIBS – „Sicherheitsbewertung bestehender Stützbauwerke“ erstellt. Ein Teil dieses Forschungsprojektes ist die Untersuchung und die Bewertung korrosionsgeschädigter Stützbauwerke.

Der Dank für die Möglichkeit der Umsetzung und Behandlung dieses Themas ergeht an die Vereinigung österreichischer Bohr-, Brunnenbau- und Spezialtiefbauunternehmen (VÖBU), die Autobahn- und Schnellstraßen- Finanzierungs- Aktiengesellschaft (Asfinag) und die Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) sowie die Wirtschaftspartner und Unterstützer dieses Forschungsprojektes.



Kurzfassung

Die Zustandserfassung von bestehenden unverankerten Stützbauwerken ist in den letzten Jahren ein wichtiges Thema geworden. Im Rahmen von Bauwerksprüfungen und Untersuchungen wurde im Besonderen bei älteren, bestehenden Winkelstützmauern erkannt, dass die Arbeitsfuge zwischen Fundament und aufgehender Wand, ein kritischer Bereich ist. Dieser Bereich stellt infolge der örtlich hohen Beanspruchung, mit klaffenden bzw. unter Belastung aufgehenden Fugen, eine große Gefahr zu Folge Bewehrungskorrosion dar. Weiters ist dieser Bereich auf Grund seiner abgeschatteten Lage im erdberührten Bereich der Konstruktion nur sehr schwierig prüf- und beurteilbar.

In der vorliegenden Arbeit wurden das Systemverhalten und der Bruchzustand derartiger Konstruktionen mit Versuchen behandelt. Dabei wurde im Zuge einer Versuchsreihe die Schädigung der Bewehrung durch künstliche Korrosion an Prüfkörpern nachgebildet. Es wurden zudem numerische Untersuchungen der AIT (Austrian Institute of Technology) zu derartigen Schadensbildern und Versagensmechanismen mit den Versuchsergebnissen validiert und verglichen.

Neben der Planung und der Durchführung des Versuchstands wird aufbauend auf numerischen Untersuchungen (aus dem Forschungsprojekt SIBS) ein Messkonzept und Messtechniklayout zur Überwachung korrosionsgeschädigter oder korrosionsgefährdeter Stützbauwerke unter realitätsnahen Bedingungen untersucht.

Als Abschluss der Arbeit werden die ersten Erkenntnisse aus den Versuchen zusammengefasst und es wird eine mögliche Umsetzung des beschriebenen Messlayouts ausgeführt. Durch die Optimierung des Messlayouts könnte sich z.B. in weiteren Versuchen, aber besonders auch bei in der Realität befindlichen Bauwerken, ein Monitoringsystem ableiten lassen.

Die gewonnenen Beobachtungen und Erkenntnisse fließen in das Forschungsprojekt „SIBS – Sicherheitsbewertung bestehender Stützbauwerke“ ein und dienen darüber hinaus der weiterführenden Forschung sowie der praktischen Anwendung zur Erhaltung bestehender Stützkonstruktionen.

Abstract

In recent years the condition assessment of existing retaining structures has become an important topic. During the performance of building inspections and structural investigations on cantilever walls, the construction joint between the foundation plate and the wall of such structures has been found to be the weak point for these types of retaining structures. Especially reinforcement corrosion is a quite common damage on existing cantilever walls. Given by the position of the reinforcement – located at the backside of the wall – a determination and investigation of an existing corrosion damages is quite hard.

In this work, the structural behaviour of cantilever walls, artificial corrosion of the reinforcement elements and a new monitoring layout for the determination of damages of retaining structures has been validated in a mock up test. The test set-up was also used to validated numerical results given in the research project SIBS.

The execution and the planning of the test set-up SIBS_V2 is described in the work and first results and accomplishments are shown. Furthermore, these results are used within the research project SIBS – Safety Assessment of existing retaining structures - to optimise monitoring solutions for corrosion damaged cantilever walls.

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Zielsetzung.....	2
3	Stützkonstruktionen.....	3
3.1	Allgemeines	3
3.2	Anforderungen an Stützbauwerke	4
3.3	Gliederung von Stützbauwerken	6
3.3.1	Kategorisierung gemäß ÖNORM EN 1997 – Teil1	9
3.3.2	Kategorisierung nach Boley.....	11
3.3.3	Kategorisierung nach ÖGG Empfehlungen	11
3.4	Gewichtskonstruktionen	12
3.4.1	Gewichtsstützmauern.....	14
3.4.2	Raumgitterkonstruktionen, Krainerwand.....	15
3.4.3	Gabionenwände	16
3.4.4	Bewehrte Erde Konstruktionen.....	18
3.5	Schlitzwände	19
3.6	Pfahlwände	20
3.7	Brunnenwände	21
3.8	Winkelstützmauern.....	22
4	Grenzzustände bzw. Versagensszenarien lt. EC7	25
4.1	Allgemeines	25
4.2	Grenzzustand der Tragfähigkeit - ULS	29
4.2.1	Allgemein	29
4.2.2	Äußere Standsicherheit.....	30
4.2.3	Innere Standsicherheit	33
4.3	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit SLS	35
4.3.1	Allgemein	35
4.3.2	Regelung in ÖNORM EN 1997-1, 2014.....	35
5	Schadensbilder bei Stützbauwerken.....	37

5.1	Allgemeines	37
5.2	Systemverhalten von Stützbauwerken	38
5.3	Schäden an Beton und Stahlbeton	40
5.3.1	Betonabplatzungen	41
5.3.2	Betonausblühungen	43
5.3.3	Betonkorrosion	44
5.3.4	Rostfahnen.....	44
5.3.5	Risse im Beton	45
5.3.6	Verarbeitungsfehler und Kiesnester	46
5.3.7	Versätze bei Stahlbetonbauteilen	47
6	Korrosionsschäden an Winkelstützmauern.....	48
6.1	Allgemeines über Korrosion	48
6.1.1	Chemische Reaktion	50
6.1.2	Metallphysikalische Reaktion	51
6.1.3	Elektrochemische Reaktion	52
6.2	Erscheinungsformen von Korrosion - Korrosionsarten.....	54
6.2.1	Gleichmäßige Flächenkorrosion.....	54
6.2.2	Lochfraßkorrosion	55
6.2.3	Spaltkorrosion	55
6.2.4	Muldenkorrosion	56
6.2.5	Bimetall-Korrosion (Kontaktkorrosion).....	56
6.2.6	Spannungsrisskorrosion.....	57
6.2.7	Erosionskorrosion	58
6.3	Arbeitsfuge Fundament - aufgehender Wandschenkel.....	59
7	Versuchsstand SIBS V2 in Graz Raaba	62
7.1	Planung des Versuchs	63
7.1.1	Bewehrungsführung Versuchskörper	66
7.1.2	Anordnung der Korrosionsfuge und Detail Korrosionswanne	70
7.2	Vorversuche.....	71

7.2.1	Korrosion am nackten Bewehrungsstab	71
7.2.2	Korrosion an Bauteilen	72
7.3	Verwendete Messtechnik	75
7.4	Konfigurationen der Versuche	76
7.4.1	SIBS V2_01	80
7.4.2	SIBS V2_02	81
7.4.3	SIBS V2_03	82
7.4.4	SIBS V2_04	83
7.4.5	SIBS V2_05	84
7.5	Auswertung der Messergebnisse	85
7.5.1	SIBS_V2_01	86
7.5.2	SIBS_V2_02	88
7.5.3	SIBS_V2_03	90
7.5.4	SIBS_V2_04	92
7.5.5	SIBS_V2_05	94
7.6	Erkenntnisse aus den Versuchen und der Auswertung der Messergebnisse	96
8	Ergebnisse, Resümee, Ausblick	97
8.1	Korrosionsgeschädigte Stützbauwerke.....	97
8.2	Versuchsstand SIBS_V2	97
8.3	Weitere Entwicklungen	98
9	Literatur.....	99

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Schadensbild des Wandverbruchs (Rotes Kreuz, 2012).....	1
Abb. 2: Stützkonstruktionen im Querprofil einer Trassierung (Henner, 1999)	3
Abb. 3: Bergseitige Sicherung eines Geländesprunges (Rebhan, 2015)	6
Abb. 4: Talseitige Sicherung eines Geländesprunges (Rebhan, 2015).....	6
Abb. 5: Neubau einer Stützmauer (Ritter-Bau GmbH, 2011)	7
Abb. 6: Beispiel einer Stützwand in Form einer Pfahlwand mit verankerten Kopfbalken	8
Abb. 7: Beispiel einer Stützwand in Form einer ungeankerten Pfahlwand	8
Abb. 8: Gliederung von Stützbauwerken (modifiziert aus Ziegler, 2012).....	9
Abb. 9: Kategorisierung nach Boley (Boley, 2012).....	10
Abb. 10: Antike Trockenmauer, Mykene, 2. Jahrtausend v. Chr. (Maier, 2012)	12
Abb. 11: Links: Gewichtsmauer aus (Stahl-)Beton (Rebhan); Rechts: Querschnitt einer Steinschichtung (ÖGG Empfehlungen, 2018).....	13
Abb. 12: Beispiele von Gewichtsmauern (Land Tirol)	13
Abb. 13: Schnitt und Ansicht einer Gewichtsmauer (ÖGG-Empfehlungen, 2018).....	14
Abb. 14: Beispiele einer Gewichtsstützmauer; Links: schräge Ausbildung der Fundamentsohle; Mitte: Gewichtsmauer mit talseitigen Sporn; Rechts: Gewichtsmauer mit talseitigen und bergseitigen Sporn (Schmidt, 2014).....	15
Abb. 15: Längsansicht und Schnitt einer Raumgitterkonstruktion (ÖGG-Empfehlungen, 2018).....	15
Abb. 16: Beispiele von Raumgitterwänden; Links: Fertigteile aus Stahlbeton; Rechts: Krainerwand (Weidenart GmbH, 2014).....	16
Abb. 17: Links: Schnitt einer geneigten Gabionenwand; Rechts: Schnitt einer abgetreppten Gabionenwand (ÖGG-Empfehlungen, 2018)	17
Abb. 18: Beispiele einer fertiggestellten Gabionenwand (Schartmüller GmbH, 2007).	17
Abb. 19: Aufbau einer bewehrten Erde Konstruktion (Boley, 2012)	18
Abb. 20: Schnitt durch bewehrte Erde Konstrukt. (ÖGG-Empfehlungen, 2018)	18
Abb. 21: Beispiele einer bewehrten Erde Konstruktion (Schartmüller GmbH).....	18
Abb. 22: Grundriss und Schnitt einer Schlitzwand (ÖGG-Empfehlungen, 2018).....	19
Abb. 23: Beispiel einer Schlitzwand mit nachträglicher Verankerung (Implenia GmbH, 2012).....	19
Abb. 24: Grundtypen von Pfahlwänden; Links: aufgelöste BPW; Rechts: tangierende Bohrpfahlwand (Boley, 2012)	20
Abb. 25: Überschnittene BPW (Boley, 2012).....	20
Abb. 26: Beispiel einer Bohrpfahlwand (Bachner GmbH, 2006).....	20
Abb. 27: Brunnenwand entlang der A2-Packabschnitt (Land Kärnten)	21

Abb. 28: Grundriss der Brunnenwand entlang der A2 (Land Kärnten)	21
Abb. 29: Zusätzliche Eigengewichts-komponente (Rebhan, 2015)	22
Abb. 30: Graphische Darstellung der Kernflächen für Rechteck- und Kreisquerschnitt (Boley, 2012).....	23
Abb. 31: Ausführungsvarianten einer Winkelstützmauer - vertikale Sporne (Bergmeister, 2009).....	23
Abb. 32: Ausführungsvarianten einer Winkelstützmauer - aussteifende Rippen und horizontaler Sporn (Bergmeister, 2009).....	24
Abb. 33: Beispiele einer Winkelstützmauer; Links: aussteifende Rippen „Schwerter“; Rechts: Fundamentbewehrung einer Winkelstützmauer (BSP Ingenieure, 2013)	24
Abb. 34: Bauwerksspezifische Versagensmechanismen für eine Winkelstützmauer mit Sporn (Marte et al., 2014).....	27
Abb. 35: Bauarbeiten zur Ertüchtigung der Stützmauer (Marte et al., 2014)	28
Abb. 36: Gliederung der Versagensmechanismen für Stützbauwerke (Rebhan, 2015)	28
Abb. 37: Links: Böschungsbruch; Rechts: Geländebruch (Schmidt, 2014)	30
Abb. 38: Versagensmechanismen - Fundamentversagen (Ziegler, 2012)	31
Abb. 39: Versagen bodengestützter Wände; Links: Drehung einer tiefgegründeten Wand (ÖNORM EN 1997-1, 2014); Rechts: Drehung (Kippen) einer Gewichtsmauer (Ziegler, 2012).....	32
Abb. 40: Arbeitslinie Beton (Ziegler, 2012)	34
Abb. 41: Innere Versagensmechanismen (ÖNORM EN 1997-1, 2014)	34
Abb. 42: Beispiel eines Ablaufs zu einem Monitoring (ÖGG Empfehlungen, 2018)	39
Abb. 43: Links: pH-Wert von Beton; Rechts: Grafik über Karbonatisierungstiefe und entstehende Korrosion an einem Bewehrungsseisen (Baustoffwissen, 2016).....	41
Abb. 44: Chemischer Prozess der Karbonatisierung (Stahr, 2015).....	41
Abb. 45: Beispiel einer Betonabplatzung an einem Stützmauerfundament.....	42
Abb. 46: Beispiel einer Betonabplatzung an der Wandoberfläche eines Stützbauwerks	42
Abb. 47: Links: Betonausblühung in der Nähe eines Risses im Stahlbetonbauteil;	
Rechts: Ausblühungen in unmittelbarer Nähe zur Straße mit Taussalzverwendung	43
Abb. 48: Beispiele einer Schädigung durch Betonkorrosion (Baustoffwissen, 2016)....	44
Abb. 49: Schematische Abbildungen von Rissen (Weber, 2013).....	45
Abb. 50: Skizzenhafte Darstellung eines Kiesnestes (ASTRA 2012)	46
Abb. 51: Beispiel eines eingebauten Kiesnestes (Holcim, 2011)	46
Abb. 52: Skizzenhafte Darstellung einer ungleichmäßigen, Relativverformung von Betonierabschnitten (ETH Zürich, 2017).....	47
Abb. 53: Beispiel eines Versatzes an einer bestehenden Stützmauer	47

Abb. 54: Einflüsse auf die Korrosion – Einflussgrößen seitens des Werkstoffs (Tostmann, 2001).....	49
Abb. 55: Einflüsse auf die Korrosion – Einflussgrößen seitens des Mediums (Tostmann, 2001).....	49
Abb. 56: Links: Hochtemperaturkorrosion einer Gasturbine; Rechts: Heißgaskorrosion bei einem Heizkessel (TH Köln, 2016).....	50
Abb. 57: Metallphysikalische Korrosion durch Metalle und Wasserstoff (Tostmann, 2001)	51
Abb. 58: Beispiel einer gleichmäßigen Flächenkorrosion (TH Leipzig, 2010).....	54
Abb. 59: Beispiel einer Lochfraßkorrosion (TH Leipzig, 2010)	55
Abb. 60: Skizzenhafte Darstellung einer Spaltkorrosion (TH Leipzig, 2010)	55
Abb. 61: Beispiel einer Muldenkorrosion (TH Leipzig, 2010)	56
Abb. 62: Beispiel einer Kontaktkorrosion (TH Leipzig, 2010)	56
Abb. 63: Links: transkristalline Risse unter Einwirkung chloridhaltiger Lösung; Rechts: interkristalline Rissbildung bei einem Gewindestück aus Messing (Macherauch, 2014)	57
Abb. 64: Links: Skizze Spannungsrisskorrosion (TH Leipzig, 2010); Rechts: Beispiel einer Spannungsrisskorrosion an einem Außengewinde (ThyssenKrupp, 2015	57
Abb. 65: Beispiel einer Erosionskorrosion (TH Leipzig, 2010)	58
Abb. 66: Skizze Fundament und aufgehender Wandschenkel eine Winkelstützmauer	59
Abb. 67: Links: skizzenhafte Darstellung des problematischen Bereichs Fundament - Wand; Rechts: freigelegte Hauptbewehrung einer Winkelstützmauer (ASTRA, 2014)	60
Abb. 68: Korrosionsgeschädigte Biegezugbewehrung einer Winkelstützmauer (Geotechnik Schweiz, 2017).....	60
Abb. 69: Links: Systemverhalten in Längsrichtung; Rechts: Modellvorstellung des Rotationsgelenks infolge Bewehrungskorrosion (Geotechnik Schweiz, 2017)	61
Abb. 70: Modellierung des Versuchsstands zu korrosionsgeschädigten Winkelstützmauern.....	62
Abb. 71 Übersicht und Geometrie eines Prüfkörpers	63
Abb. 72: Schema eines Prüfkörpers	65
Abb. 73: Bewehrungskonfigurationen Prüfwand (Schnitt A-A); Links: 4 x 7Ø14; Rechts: 1 x 3Ø20	67
Abb. 74: Darstellung der Bewehrungsführung - Längsschnitt Achse 2.....	68
Abb. 75: Darstellung der Bewehrungsführung; Links: Schnitt 1-1; Rechts: Schnitt 2-2	69
Abb. 76: Schematische Darstellung der Korrosionswanne und Detail Schrumpfschlauch	70

Abb. 77: Versuchsanordnung bei reiner Korrosion am Bewehrungsstab (Rebhan, 2017)	72
Abb. 78: Vorversuch Winkelmauer	73
Abb. 79: Vorversuch zur Korrosionsgeschwindigkeit an einer Winkelmauer	73
Abb. 80: Vorversuch; Schädigung eines gezielt ausgewählten Bewehrungsstabs	74
Abb. 81: Schematische Darstellung der Anordnung der geplanten Messtechnik	75
Abb. 82: Erläuterung der Bereiche innerhalb eines Lastschemas	78
Abb. 83: Lastschema für SIBS V2_01	80
Abb. 84: Versuchsdurchführung SIBS_V2_01	80
Abb. 85: Lastschema für SIBS V2_02	81
Abb. 86: Versuchsdurchführung SIBS_V2_02	81
Abb. 87: Lastschema für SIBS V2_03	82
Abb. 88: Versuchsdurchführung SIBS_V2_03	82
Abb. 89: Lastschema für SIBS V2_04	83
Abb. 90: Versuchsdurchführung SIBS_V2_04	83
Abb. 91: Lastschema für SIBS V2_05	84
Abb. 92: Versuchsdurchführung SIBS_V2_05	84
Abb. 93: Schematische Darstellung der Sensorpositionen und der Sensoren	85
Abb. 94: Betrachteter Messbereich zur Auswertung der Versuche (SIBS_V2_02)	85
Abb. 95: SIBS_V2_01 – Kurve Last [kN] im Untersuchungsbereich	86
Abb. 96: SIBS-V2_01 – Kurve Dehnungen [$\mu\text{m}/\text{m}$] im Untersuchungsbereich	86
Abb. 97: SIBS-V2_01 – Kurve Neigung [$^\circ$] im Untersuchungsbereich	86
Abb. 98: SIBS_V2_02 – Kurve Last [kN] im Untersuchungsbereich	88
Abb. 99: SIBS-V2_02 – Kurve Dehnungen [$\mu\text{m}/\text{m}$] im Untersuchungsbereich	88
Abb. 100: SIBS-V2_02 – Kurve Neigung [$^\circ$] im Untersuchungsbereich	88
Abb. 101: SIBS-V2_03 – Kurve Dehnungen [$\mu\text{m}/\text{m}$] im Untersuchungsbereich	90
Abb. 102: SIBS_V2_03 – Kurve Last [kN] im Untersuchungsbereich	90
Abb. 103: SIBS-V2_03 – Kurve Neigung [$^\circ$] im Untersuchungsbereich	90
Abb. 104: SIBS_V2_04 – Kurve Last [kN] im Untersuchungsbereich	92
Abb. 105: Kurve Dehnungen [$\mu\text{m}/\text{m}$] im Untersuchungsbereich	92
Abb. 106: SIBS-V2_04 – Kurve Neigung [$^\circ$] im Untersuchungsbereich	92
Abb. 107: SIBS_V2_05 – Kurve Last [kN] im Untersuchungsbereich	94
Abb. 108: SIBS-V2_05 – Kurve Dehnungen [$\mu\text{m}/\text{m}$] im Untersuchungsbereich	94
Abb. 109: SIBS-V2_05 – Kurve Neigung [$^\circ$] im Untersuchungsbereich	94
Abb. 110: Optimiertes Messtechniklayout	98

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eurocodes für Bemessung der inneren Tragfähigkeit (Rebhan, 2015)	33
Tabelle 2: Übersicht über Schäden und deren Ursachen an Betonbauteilen (Stahr, 2015)	40
Tabelle 3: Übersicht - wasserstoffinduzierte Korrosion (Tostmann, 2001)	52
Tabelle 4: Galvanische Spannungsreihe (Weibach 2010)	53
Tabelle 5: Eigenschaften Prüfkörper.....	64
Tabelle 6: Messtechnische Ausstattung und Sensoren des Versuchsstandes.....	75
Tabelle 7: Querschnitt- und Versuchskonfigurationen	77

1 Einleitung

In der Vergangenheit sind vermehrt Schadensfälle an älteren Stützbauwerken sowohl in Österreich, als auch in Deutschland und in der Schweiz aufgetreten. Beispielsweise fand im Jahr 2012 ein plötzlicher Wandverbruch an der A13, der Brennerautobahn, statt. Eine über 10 m hohe Stützmauer stürzte nahe der Mautstelle Schönberg ohne erkennbare Vorzeichen auf die Fahrbahn. Dabei kam tragischerweise ein LKW-Fahrer ums Leben.



Abb. 1: Schadensbild des Wandverbruchs (Rotes Kreuz, 2012)

Nach diesem Ereignis starteten vertiefte Untersuchungen zu ähnlichen Stützkonstruktionen. Die Zustandsbewertung von bestehenden Bauwerken stellt bis heute eine anspruchsvolle Aufgabe dar. Eine Weiterentwicklung existierender Beurteilungsmethoden, die Adaptierung vorhandener Untersuchungsmittel und die Entwicklung neuer Untersuchungsmethoden waren notwendig. Auf Grund dieser Anforderungen wurde im Jahr 2016 das Forschungsprojekt SIBS „Sicherheitsbewertung bestehender Stützbauwerke“ ins Leben gerufen. Darin sollen neben den möglichen Schäden und deren Ursachen, auch Wege zur Untersuchung und der Beurteilung von Bestandskonstruktionen erforscht und erarbeitet werden. (Vöbu-Forum, 2017)

2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, anhand eines Versuchsstandes zu korrosionsgeschädigten Winkelstützmauern das Systemverhalten und den Bruchzustand derartiger Konstruktionen näher zu erfassen. Dabei sollen zum einen numerische Untersuchungen, welche im Zuge des SIBS-Forschungsprojekts zu derartigen Schadensbildern und Versagensmechanismen durchgeführt wurden (Rebhan et al., 2017), validiert und mit den Versuchsergebnissen verglichen werden. Zum anderen soll ein, aufbauend auf den numerischen Untersuchungen, geplantes Messkonzept und Messlayout zur Überwachung korrosionsgeschädigter oder korrosionsgefährdeter Stützbauwerke getestet werden.

Der Fokus in dieser Masterarbeit liegt auf der Erarbeitung, Planung und Durchführung eines Versuchsstandes für Winkelstützmauern. Zur Umsetzung des Versuchsstandes wurden Vorversuche an kleineren Versuchskörpern und einzelnen Bewehrungselementen durchgeführt und in die Planung und Durchführung der Versuche miteinbezogen. Bei der Durchführung des Versuchsstandes lag das Hauptaugenmerk auf der Anwendung der Erkenntnisse aus den Vorversuchen und auf der Erfassung der Messdaten zum Verhalten des Versuchskörpers und auf einer ersten Analyse und Auswertung der Messdaten.

Als Abschluss der Arbeit werden die ersten Erkenntnisse aus den Versuchen zusammengefasst und es wird eine mögliche Umsetzung des beschriebenen Messlayouts weiter ausgeführt. Zusätzlich soll ein Ausblick zu weiteren Untersuchungen und Versuchen gegeben werden.

3 Stützkonstruktionen

3.1 Allgemeines

Die Topografie in und rund um Österreich ist durch die Alpen stark gekennzeichnet. Daraus ergibt sich oftmals die Anforderung der Herstellung von Geländesprüngen oder der Sicherung von Böschungen. Von einem Geländesprung im Allgemeinen spricht man, wenn eine stufenförmige Veränderung des Geländes, durch einen künstlich herbeigeführten Eingriff oder durch natürliche Einwirkungen wie z.B. Erosion, Sedimentierung und Bodenhebungen stattgefunden hat. Eine Böschung beschreibt eine unter gewisser Neigung hergestellte Geländeoberfläche, welche z.B. durch einen Bodenabtrag, im Bereich des Einschnitts oder durch einen talseitigen Bodenauftrag gefertigt wurde. (Schmidt et al., 2014)

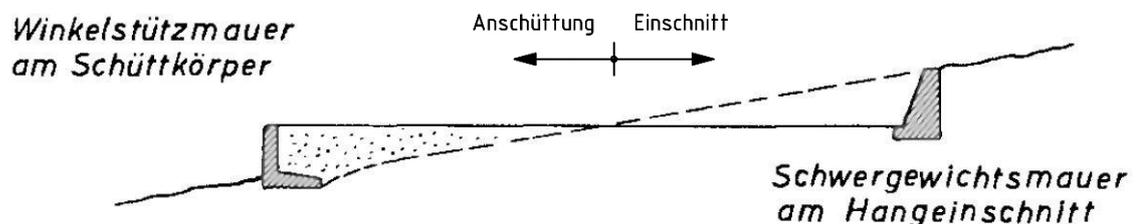


Abb. 2: Stützkonstruktionen im Querprofil einer Trassierung (Henner, 1999)

Die zur Sicherung einer Böschung oder eines Geländesprunges baulich erforderlichen Maßnahmen werden grundsätzlich als Stützkonstruktion bezeichnet. Das Erfordernis, die Form und der Entwurf eines Stützbauwerkes, hängt maßgeblich von der Art und der gewählten Trassierung eines Streckenabschnittes ab. Die konkrete Aufgabe einer derartigen Tragkonstruktion liegt darin, die geneigten sowie vertikalen Geländesprünge sowohl kurz- als auch langfristig zu stützen und die geforderte Standsicherheit zu gewährleisten.

Gemäß Eurocode 7 - Teil 1 (ÖNORM EN 1997-1, 2014) umfassen Stützbauwerke alle Arten von Mauern, Wänden oder Stützsystemen, bei welchen die Bauteile des Bauwerks durch Kräfte aus dem gestützten Erdkörper (aus Boden, Fels oder Hinterfüllungsmaterial und auftretendes Hangwasser bestehend), beansprucht werden.

3.2 Anforderungen an Stützbauwerke

Das Anforderungsprofil an Stützbauwerke in den Nachkriegsjahren, in welchen hauptsächlich Schwergewichtsmauern, bedingt durch den nicht verfügbaren bzw. sehr teuren Bewehrungsstahl, gebaut wurden, ist mit den heutigen Anforderungen nicht zu vergleichen. Im Zuge des später erfolgten Ausbaus des Straßennetzes ergab sich die Notwendigkeit an größeren, widerstandsfähigeren Stützkonstruktionen. Jedoch sei anzumerken, dass viele dieser alten Stützbauwerke noch in „Betrieb“ sind und diese, dem heutigen Stand der Technik, nicht gerecht werden können (Marte et al., 2014). Die folgenden Punkte sollen einleitend zu einer Sensitivierung für die in dieser Arbeit behandelten Themen und Probleme führen.

Zur Sicherstellung der Widerstandsfähigkeit und der Dauerhaftigkeit von Stützbauwerken können allgemeine und konstruktive Anforderungen formuliert werden. In der nachfolgenden Auflistung werden einige Anforderungen aus den technischen Merkblättern für Stützbauwerke, des Bundesamtes für Straßen ASTRA, (Technisches Merkblatt Stützbauwerke, ASTRA, V2.13, 2017), erläutert:

- Die zur Herstellung von Stützbauwerken zu verwendende **Betonqualität** (Expositionsklassen) ist auf die chemische Zusammensetzung des Kontaktwassers (Oberflächenwasser, Sickerwasser, Hangwasser, Chlorid haltiges Spritzwasser) Wasser aus dem Untergrund (z.B. Sulfat haltiges Wasser, Humussäuren im Erdreich, Salzlösungen) abzustimmen. Im Falle von naheliegenden oder angrenzenden landwirtschaftlichen genutzten Flächen, gilt es den eventuellen Einsatz von Düngemittel (sehr betonaggressiv und stahlkorrosiv) zu berücksichtigen. Da bei einem direkten Einbringen des Betons gegen den Untergrund keine Möglichkeit einer Schutz-Beschichtung besteht, sind dementsprechend Betone mit erhöhtem Widerstand gegen chemischen Angriff einzusetzen.
- Im Untergrund und hinter Stützbauwerken auftretende **Wasserdrücke** und **Sickerströmungen** müssen bei der Bemessung berücksichtigt werden. Sie können die Einwirkungen auf die Stützmauer beträchtlich erhöhen. Der Einsatz etwaiger Entlastungsleitungen oder Drainagesysteme ist zweckmäßig.

- Die Anordnung von **Drainagierungen** kann bei Hangwasser erforderlich sein, da auch die Hangstabilität dadurch wesentlich beeinflusst wird. Das Drainagesystem sollte so ausgeführt werden, dass neben der Frostbeständigkeit Wartungsmöglichkeiten, welche ein Spülen und Reinigen des Systems beinhalten, möglich sind.
- **Kiesnester** sind durch einen unsachgemäßen Einbau und unzureichenden Verdichten des Betons unter allen Umständen zu vermeiden. Speziell bei Winkelstützmauern, im Bereich der Arbeitsfuge (Fundament – aufgehendes Mauerwerk), ist ein erhöhtes Augenmerk darauf zu legen. Bewehrungsführung (Abstände) und Betondeckung sind unbedingt einzuhalten.
- **Horizontale Arbeitsfugen** sind gegen eindringendes Wasser (chemisch-belastet oder unbelastet) und Feuchtigkeit dauerhaft und sicher zu schützen. Dies kann durch geeignete (aufgeflämmte) Abdichtungsbahnen oder mehrlagige Schutzanstriche auf Bitumenbasis erfolgen.
- **Eine Erhöhung der Arbeitsfuge** um mindestens 10 cm, durch eine sogenannte Kickerschalung (OK Fundament und vertikaler Schenkel,) kann das Eindringen von chemisch belasteten Wasser, in dieser kritischen Stelle, verhindern.
- **Die Hinterfüllung** des Stützbauwerks hat mit einer schichtweisen Einbringung eines geeigneten Bodenmaterials zu erfolgen. Es ist darauf zu achten, dass Abdichtungssysteme und Schutzschichten beim Einsatz von verdichtenden Geräten nicht beschädigt werden. Ein einzuhaltender Mindestabstand von mind. 30cm, des Verdichtungsgeräts, muss eingehalten werden.

Die oben angeführten Anforderungen (Technisches Merkblatt Stützbauwerke, ASTRA, 2017) bei der Errichtung von Stützbauwerken zeigen, dass auch im Neubau erhebliche Randbedingungen bestehen, um die Standsicherheit und Dauerhaftigkeit zu gewährleisten. Bei Bestandsbauwerke gibt diese Auflistung einige der signifikanten, im Zuge einer Bauwerksprüfung zu untersuchenden Regional- und Randbedingungen wieder.

3.3 Gliederung von Stützbauwerken

„Ein Material ist gestützt, wenn es in steilerer Neigung gehalten wird als die, unter der es sich ohne ein stützendes Tragwerk einstellen würde. Stützbauwerke umfassen alle Arten von Wänden oder Stützsystemen, bei denen Bauteile durch Kräfte aus dem gestützten Material beansprucht werden“. (ÖNORM EN 1997-1, 2014)

Bedingt durch die Örtlichkeit der Stützung eines Erdkörpers kann grundsätzlich in eine bergseitige und talseitige Stützkonstruktion unterschieden werden.

- **Bergseitige Anordnung der Stützkonstruktion:**

Die bergseitige Sicherung eines vorhandenen Geländesprunges oder einer Böschung dient als Stützung oberhalb des zu errichtenden Bauwerks bzw. Straßenabschnitts. Die Standsicherheit des Geländeeinschnittes kann durch unterschiedliche Systeme an Stützkonstruktionen gewährleistet werden.

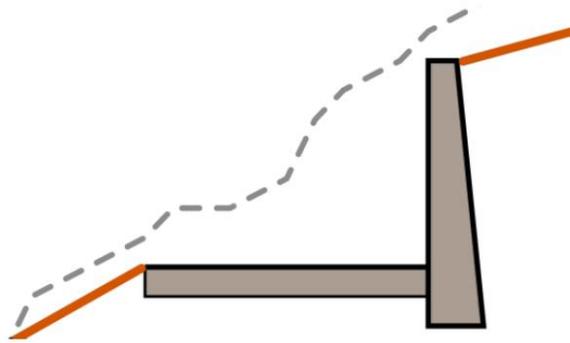


Abb. 3: Bergseitige Sicherung eines Geländesprunges (Rebhan, 2015)

- **Talseitige Anordnung der Stützkonstruktion:**

Ist eine Anschüttung für ein zu errichtendes Objekt (Gebäude, Straßenbau, Herstellung einer Ebene Fläche in Hanglage) erforderlich, so kann mit geeigneten Stützbauwerken eine talseitige Sicherung des Erdkörpers erfolgen.

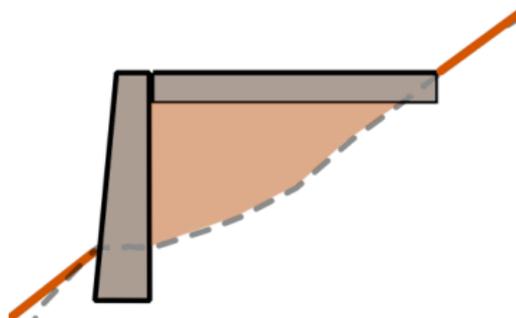


Abb. 4: Talseitige Sicherung eines Geländesprunges (Rebhan, 2015)

Im allgemeinen Sprachgebrauch werden Begriffe wie „Stützmauer“ und „Stützwand“ zur Sicherung von Geländesprüngen und zur Erstellung von Bauwerken in Hanglage häufig, aber oft nicht explizit unterschieden. In der aktuellen Fachliteratur (z.B. Boley 2012) und den normativen Grundlagen werden die zuvor genannten Bezeichnungen von Stützbauwerken differenziert betrachtet.

▪ **Stützmauer**

Unter einer Stützmauer wird eine Konstruktion verstanden, bei welcher die Abmessungen der Mauer und in weiterer Folge das Mauergewicht, die Standsicherheitsfunktion und das Übertragen der Kräfte im Allgemeinen, ohne Verankerung, vom hinteren Bereich der Stützmauer in die Fundamentsohle und somit in den Untergrund, vollständig übernimmt. Die Übertragung der Spannungen in die Gründungssohle hängt im Wesentlichen von der Geometrie und der daraus zusätzlich entstandenen Erdauflast der Konstruktion ab (z.B. bergseitiger Schenkel). Nach Eurocode 7 – Teil 1 (ÖNORM EN 1997-1, 2014) werden derartige Stützmauern als Gewichtsstützwände bezeichnet. In Abb. 5 ist ein fertiggestellter Neubau einer Stützmauer dargestellt.



Abb. 5: Neubau einer Stützmauer (Ritter-Bau GmbH, 2011)

▪ **Stützwand**

Stützwände werden im Vergleich zu Stützmauern schlanker ausgeführt. Dies hat zur Folge, dass eine ausreichende Biegesteifigkeit der Stützkonstruktion zur Lastabtragung erforderlich ist. Um die Lastaufnahme infolge der auftretenden Biegebeanspruchung zu erleichtern, werden häufig Ankerkonstruktionen und zusätzliche aussteifende Bauteile bei Stützwänden angeordnet. Das Eigengewicht derartiger Wände erfährt im Gegensatz zur Biegesteifigkeit, welche maßgebend für die Stützwirkung beiträgt, eine geringe Bedeutung. (Schmidt et al, 2014)



Abb. 6: Beispiel einer Stützwand in Form einer Pfahlwand mit verankerten Kopfbalken



Abb. 7: Beispiel einer Stützwand in Form einer ungeankerten Pfahlwand

3.3.1 Kategorisierung gemäß ÖNORM EN 1997 – Teil1

Für die Bemessung von Stützkonstruktionen unterscheidet Eurocode 7 (Kapitel 9.1.2) die in drei Hauptarten: „Gewichtsstützwände“, „im Boden einbindende Wände“ und „zusammengesetzte Stützkonstruktionen“. Eine Übersicht dieser Unterteilung ist in Abb. 8 dargestellt.

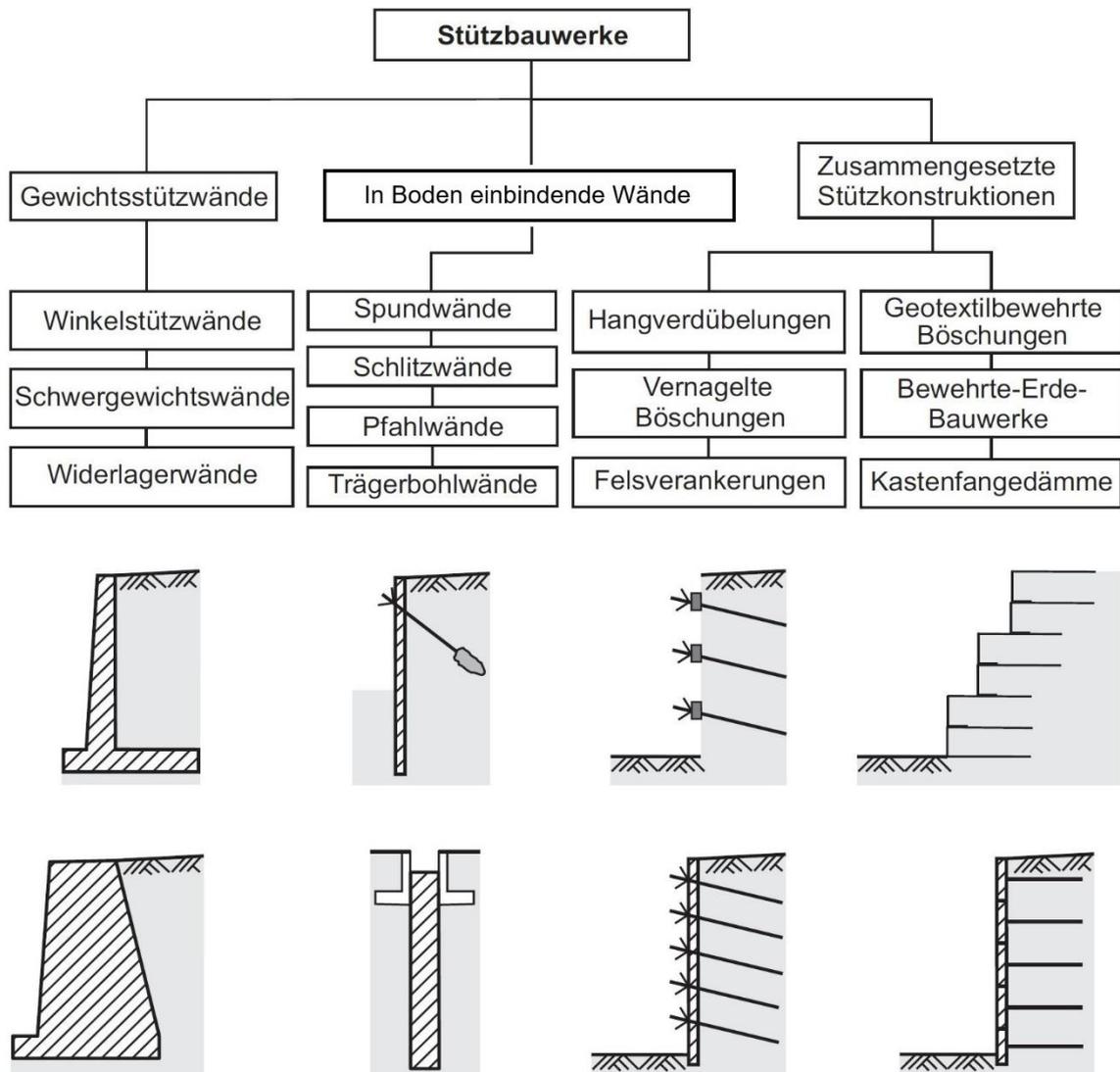


Abb. 8: Gliederung von Stützbauwerken (modifiziert aus Ziegler, 2012)

▪ Gewichtsstützwände

„Wände aus Stein oder Beton oder Stahlbeton auf einem Fundament, mit oder ohne Sporn, Fuß oder Stützpfiler. Das Wandgewicht selbst, gegebenenfalls einschließlich stabilisierender Boden-, Fels- oder Hinterfüllungsmassen, spielt bei der Stützwirkung eine wesentliche Rolle. Beispiele sind Gewichtsstützwände aus Beton mit konstanter oder variabler Dicke, Winkelstützwände, Widerlagerwände“. (ÖNORM EN 1997-1, 2014)

▪ **In Boden einbindende Wände („Baugrubenwände“)**

„Relativ dünne Wände aus Stahl, Stahlbeton oder Holz, die durch Verankerungen, Steifen und/oder den Erdwiderstand gestützt werden. Die Biegesteifigkeit solcher Wände spielt bei der Stützwirkung eine wesentliche Rolle, während das Wandgewicht ohne große Bedeutung ist. Beispiele sind eingespannte Stahlspundwände, verankerte oder ausgesteifte Stahl- oder Betonspundwände, Schlitzwände“. (ÖNORM EN 1997-1, 2014)

▪ **Zusammengesetzte Stützkonstruktionen**

„Wände, die sich aus Elementen der vorgenannten beiden Arten zusammensetzen. Es gibt eine große Vielfalt derartiger Konstruktionen, und Beispiele dafür sind Kastenfangedämme, durch Anker, Geokunststoffe oder Injektionen bewehrte Erdbauwerke, Tragwerke mit mehreren Lagen von Bodenankern oder Bodennägeln“. (ÖNORM EN 1997-1, 2014)

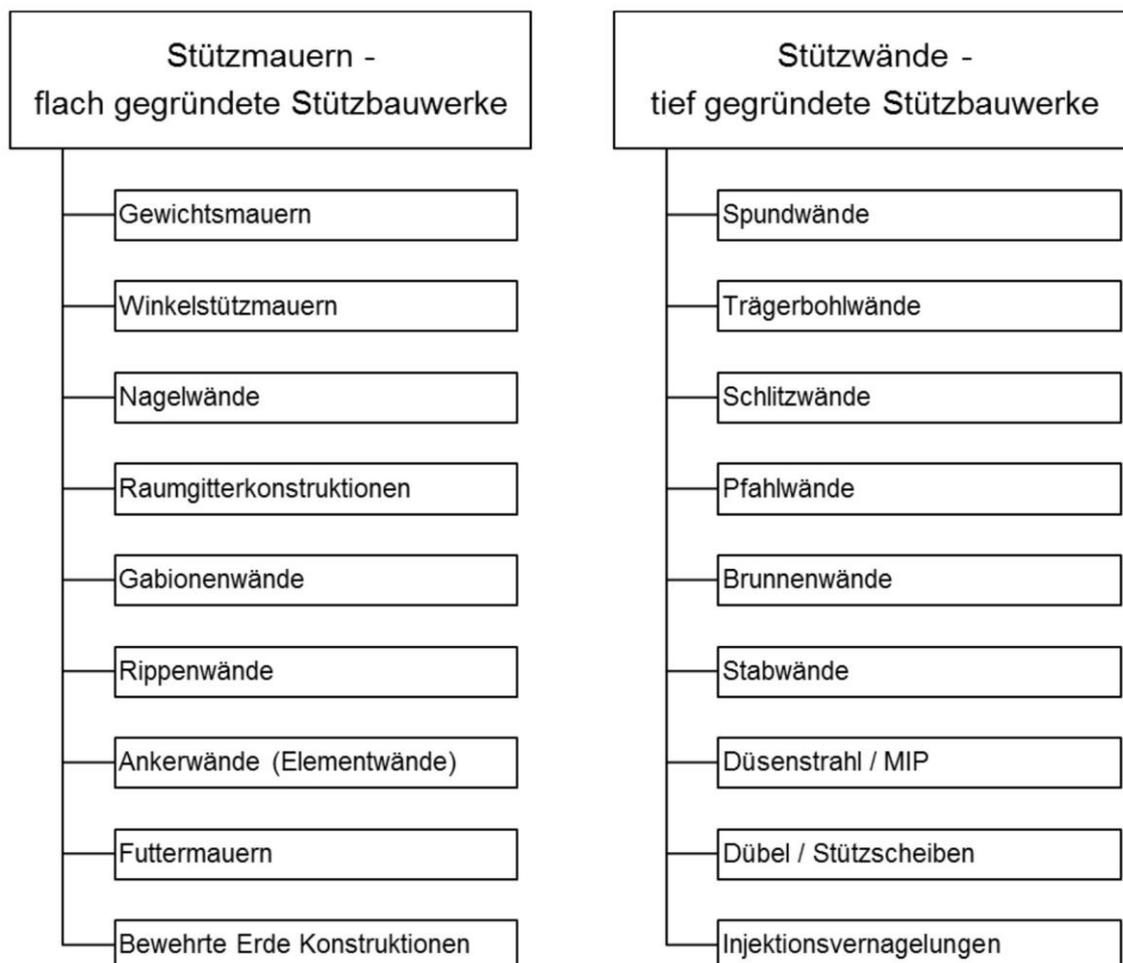


Abb. 9: Kategorisierung nach Boley (Boley, 2012)

3.3.2 Kategorisierung nach Boley

Die Gliederung nach Boley differenziert sich im Gegensatz zum Eurocode 7 darin, dass entsprechend der konstruktiven Ausbildung und dem Tragverhalten, zwischen „flach gegründeten Stützbauwerken“ und „tief gegründeten Stützbauwerken“ unterschieden wird. (Boley, 2012)

Zusätzlich zu den bisher angeführten Gliederungen von Stützbauwerktypen, gibt es eine Vielzahl an weiteren literarischen Werken, welche eine ähnliche aber doch unterschiedliche Kategorisierung solcher Konstruktionen vornehmen.

3.3.3 Kategorisierung nach ÖGG Empfehlungen

Da sich diese Arbeit auf unverankerte Stützbauwerke bezieht, im Speziellen auf den Typ der Winkelstützmauer, wird als Grundlage die Unterteilung der Stützkonstruktionen anhand der ÖGG Empfehlung zur vertieften Prüfung und Beurteilung bestehender, unverankerter Stützbauwerke angewendet (ÖGG Empfehlungen, 2018). In dieser wird im Wesentlichen in folgende unverankerte Konstruktionen unterschieden:

- **Gewichtskonstruktionen**
 - Gewichtsmauern
 - Raumgitterkonstruktionen
 - Gabionenwand
 - Steinstützkörper
 - Bewehrte Erde Konstruktionen
- **Winkelstützmauern**
- **Schlitzwände**
- **Pfahlwände**
- **Brunnenwände**
- **In Boden einbindende Wände (unverankert)**
- **Widerlagerwände und Flügelmauern**

Zu den in Boden einbindende Wände sei angemerkt, dass es sich im Zuge der Unterteilung lediglich um unverankerte Konstruktionen dieser Art handelt. Für Widerlagerwände oder Flügelmauern, welche ein ähnliches Verhalten und Schadensbilder wie Stützkonstruktionen aufweisen können, wird eine sinngemäße Anwendung der Inhalte (ÖGG-Empfehlung) empfohlen.

3.4 Gewichtskonstruktionen

Die Entstehungsgeschichte von historischen Mauerwerken, welche beinahe ausschließlich aus Natursteinen bestanden, reicht bereits mehr als 10.000 Jahre zurück. Mit der Zeit wurde für die Herstellung einer kraftschlüssigen Verbindung zwischen den Steinen und Blöcken, gebrannter Kalk als „Bindemittel“ eingesetzt. (vgl. Lumesberger 2016)

Derartige Mauerkonstruktionen, wie in Abb. 10 gezeigt, gehören zu den ältesten Bauwerkstypen und fanden bereits sehr früh eine individuelle Anwendung. Neben den Griechen verwendete später auch das damalige Römische Reich und die Kelten diesen „Baustoff“. In der Epoche des Mittelalters dagegen, geriet dies wiederum in Vergessenheit und es wurden Folge dessen, die oft wuchtigen Bauwerke, wie Burgen und Wehranlagen, größtenteils aus Naturstein gefertigt.



Abb. 10: Antike Trockenmauer, Mykene, 2. Jahrtausend v. Chr. (Maier, 2012)

Über die Jahrhunderte wurde das Wissen um diese frühzeitige Technik stetig weiterentwickelt und Mitte des 19. Jahrhunderts kam der heute bezeichnete Portlandzement zur Anwendung. Dieses hydraulische Bindemittel war unter anderem ein wichtiger Wegbegleiter für Beton als Baustoff. (Externbrink et al., 2014) Aufbauend auf den Massenbeton wurde durch die Erfindung des Eisenbetons (Joseph Monier 1861) eine wirtschaftliche, schlanke und widerstandsfähige Konstruktionsart eingeführt.

Gewichtskonstruktionen sind dadurch charakterisiert, dass ihre Formgebung und das daraus resultierende Eigengewicht, den größten Anteil der Standsicherheitsfunktion übernimmt. Die Querschnitte dieses Typs von Stützbauwerk, bestehen meist aus un- oder gering bewehrtem Beton, können aber auch aus Natursteinmauerwerk, Steinlagen oder aus Gabionen und zusammengesetzten Konstruktionen aus Stahl und Holz bestehen.

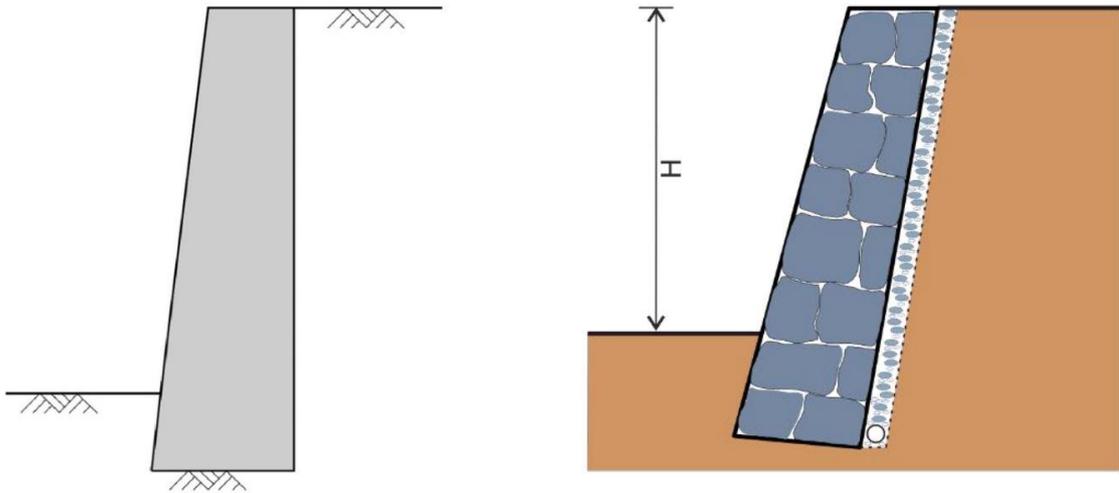


Abb. 11: Links: Gewichtsmauer aus (Stahl-)Beton (Rebhan); Rechts: Querschnitt einer Steinschichtung (ÖGG Empfehlungen, 2018)



Abb. 12: Beispiele von Gewichtsmauern (Land Tirol)

3.4.1 Gewichtsstützmauern

Mit der zuvor erwähnten Charakteristik ist es nachvollziehbar, dass Gewichtsstützmauern, mit Hilfe des Eigengewichts, die infolge Erddruck entstehenden Horizontalkräfte, in den Baugrund abgetragen werden können. Die Geometrie und Formgebung von Gewichtsstützmauern ist maßgeblich von den vorherrschenden Platzverhältnissen (Einhaltung notwendiger Lichtraumprofile, etc.), den geforderten Standsicherheiten und dem optischen Erscheinungsbild abhängig.

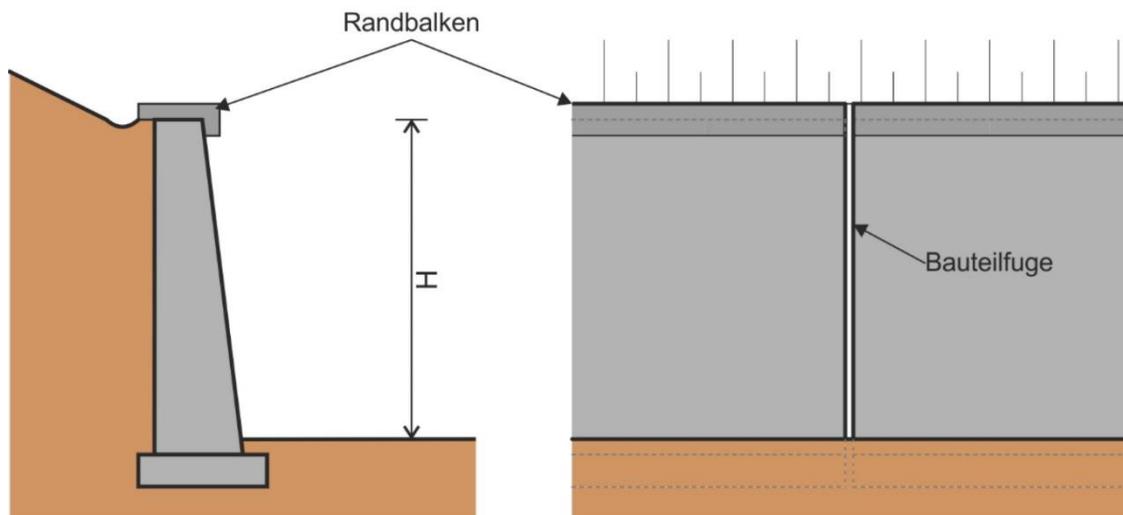


Abb. 13: Schnitt und Ansicht einer Gewichtsmauer (ÖGG-Empfehlungen, 2018)

Die oft massive Ausführung von Gewichtsmauern kann durch entsprechende Maßnahmen in Form einer Schiefstellung der Fundamentsohle oder aber auch durch das Einführen eines Tal- oder Bergsporns optimiert werden. Häufig wird bei Gewichtsmauern ein nach oben hin konischer Verlauf der Mauerstärke angestrebt. Dies ergibt sich aus der optimalen Form einer Gewichtskonstruktion, welche um Zugspannungen im Querschnitt zu verhindern, einen gekrümmten (parabolischen) Verlauf aufweisen sollte. Sind nur kleinere Wandhöhen für eine Lastabtragung erforderlich, werden Konstruktionen mit konstanter Wandstärke eingesetzt. Kommen jedoch hohe Schwergewichtsmauern zum Einsatz, kann es von Vorteil sein, ein Anfügen eines Talsporns zur Erhöhung des rückdrehenden Momentes einzusetzen.

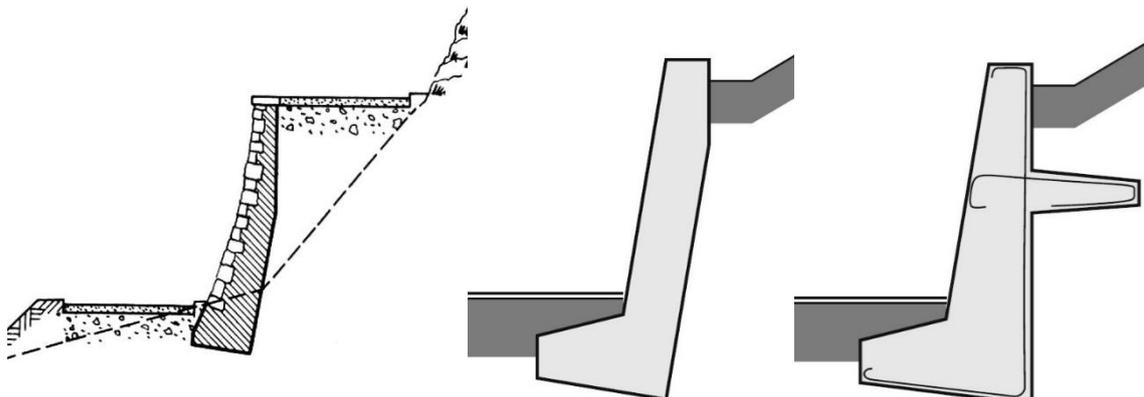


Abb. 14: Beispiele einer Gewichtsstützmauer; Links: schräge Ausbildung der Fundamentsohle; Mitte: Gewichtsmauer mit talseitigen Sporn; Rechts: Gewichtsmauer mit talseitigen und bergseitigen Sporn (Schmidt, 2014)

3.4.2 Raumgitterkonstruktionen, Krainerwand

Auch diese Art von Gewichtskonstruktion fand seit Jahrhunderten, speziell in Gebirgsregionen, als Hangsicherung, ihre Anwendung. Sie beruht auf einem einfachen Prinzip. Kraftschlüssig miteinander verbundene, stabförmige Konstruktionselemente bilden durch Übereinanderstapeln räumliche Gitterstrukturen. Diese wirken durch Hinterfüllen der Bereiche (Silozellen) zwischen den Elementen, als gemeinsamer Verbundkörper. Durch die flexible Anordnung der Elemente, welche traditionell aus Holzstämmen oder Stahlbetonelementen bestehen können, sind an das Gelände gut angepasste Strukturen möglich.

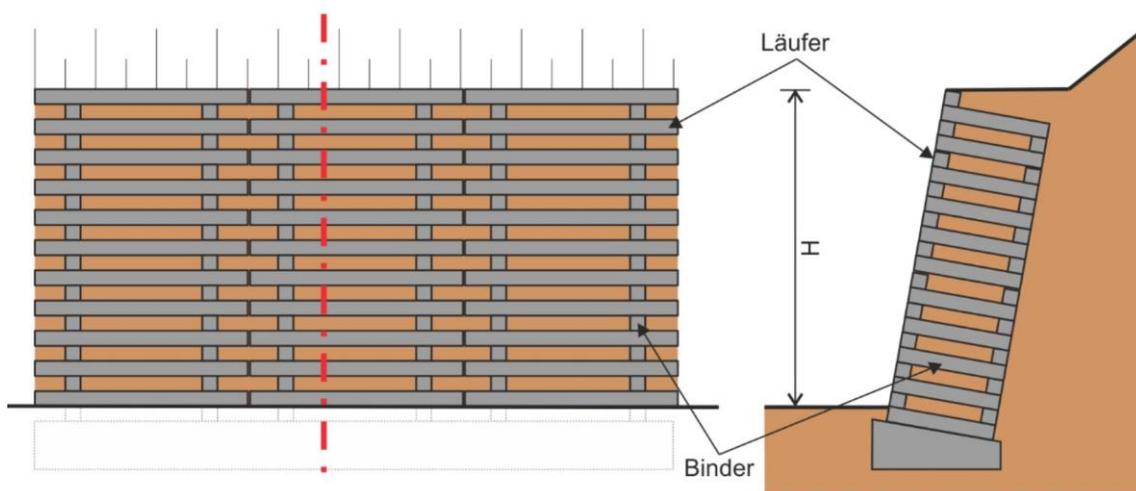


Abb. 15: Längsansicht und Schnitt einer Raumgitterkonstruktion (ÖGG-Empfehlungen, 2018)

Raumgitterwände, welche aus Holzelementen hergestellt werden, bezeichnet man in unseren Breiten als Krainerwände. Verwendung finden derartige Stützbauwerke meist noch in der Wildbachverbauung, sowie bei der Errichtung von eher untergeordneten Straßen wie zB. Forstwegen. Heutzutage ist die Verwendung von Holzelementen aus Gründen der Dauerhaftigkeit, insbesondere durch die Feuchteanfälligkeit des Konstruktionsholzes eher auf kleinere Stützkonstruktionen sowie im Forstwegebau beschränkt. Deshalb kommen gegenwärtig vorwiegend mit Boden, Steinmaterial aber auch mit recycelten Hinterfüllungsmaterial verfüllte (Stahl)Betonfertigteile zum Einsatz. (Brandl, 2009)



Abb. 16: Beispiele von Raumgitterwänden; Links: Fertigteile aus Stahlbeton; Rechts: Krainerwand (Weidenart GmbH, 2014)

3.4.3 Gabionenwände

Gabionenwände nehmen als Gewichtskonstruktion eine Sonderform von Stützbauwerken ein. Sie bestehen aus sogenannten Gabionen, welche als Drahtschotterkörbe oder Steinkörbe bezeichnet werden. Gabionenwände sind mit Steinmaterial verfüllte, übereinander geschichtete Stahlkörbe, nach dem Prinzip der Gewichtsmauer. Neben ihrer Anwendung für Lärm- oder Sichtschutz kommen diese ebenfalls als Stützbauwerk und als Böschungssicherung zum Einsatz.

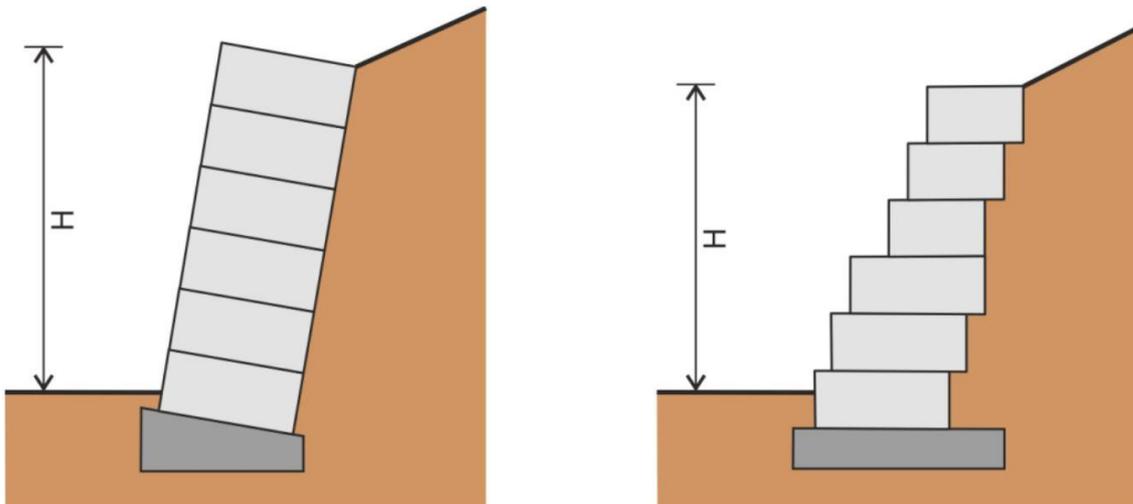


Abb. 17: Links: Schnitt einer geneigten Gabionenwand; Rechts: Schnitt einer abgetreppten Gabionenwand (ÖGG-Empfehlungen, 2018)

Das bei der Herstellung verwendete Material dieser Gitterkörbe, ist für die Langzeitbeständigkeit und Dauerhaftigkeit der Konstruktion von großer Bedeutung. So können die Stahlgitter feuerverzinkt werden oder es erfolgt eine Ausführung aus rostfreien Edelstahl. Auch durch eine Verwendung von Betonfertigteilsteinen und Steinstützkörpern kann dies, als ähnliches System, zur Anwendung kommen. (ÖGG Empfehlungen, 2018)



Abb. 18: Beispiele einer fertiggestellten Gabionenwand (Schartmüller GmbH, 2007)

3.4.4 Bewehrte Erde Konstruktionen

Der Ursprung dieser Gewichtskonstruktion beruht auf dem französischen Ingenieur Henri Vidal, der diese Form von Stützbauwerken in den sechziger Jahren erstmals entwickelt hatte. Darunter versteht man einen Verbundkörper aus Boden und Bewehrungselementen. Bei diesem schichtweisen, hergestellten Stützkörper wird Schüttmaterial und Bewehrung lagenweise eingebracht und angeschlossen. Die Bewehrung kann meist aus flachen Stahl- oder Kunststoffstäben, Gittern, Matten sowie aus Geokunststoffen bestehen. Die entstehenden Zugkräfte sollen durch die verbundenen Bewehrungselemente aufgenommen werden und können in weiterer Folge über Reibung in den Untergrund übertragen werden.

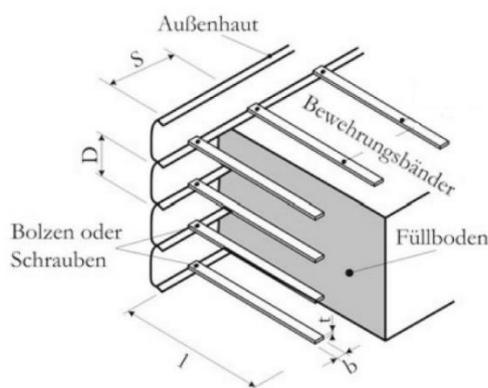


Abb. 19: Aufbau einer bewehrten Erde Konstruktion (Boley, 2012)

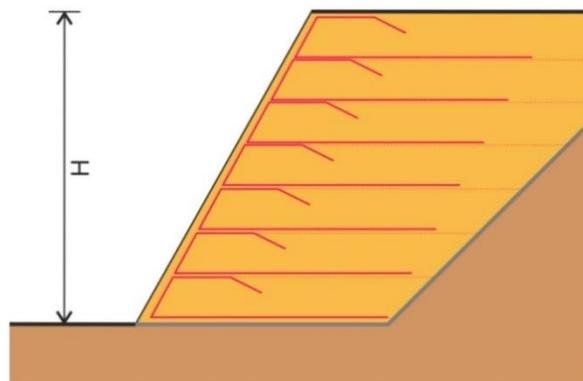


Abb. 20: Schnitt durch bewehrte Erde Konstrukt. (ÖGG-Empfehlungen, 2018)

Aufgrund der unterschiedlichen Materialien und der Geometrie der Bewehrungselemente gibt es eine ganze Reihe an möglichen Konstruktionsarten. Die Luftseite der bewehrten Erde wird durch eine Außenhaut, bestehend aus Geotextilien oder Bewehrungsmatten mit Vlies abgeschlossen. Gegenwärtig wird die Außenhaut oftmals auch durch Stahlbeton-Fertigteile und/oder durch Stahlbleche abgeschlossen. Es werden auch zunehmend mehr Kunststoffe als Bewehrungselemente eingesetzt um die Korrosionsproblematik zu umgehen. (Boley, 2012)



Abb. 21: Beispiele einer bewehrten Erde Konstruktion (Schartmüller GmbH)

3.5 Schlitzwände

Schlitzwandkonstruktionen sind tiefgegründete Flächentragwerke und dienen meist als langfristige Sicherung eines Geländesprungs. Die oft hochgradig bewehrten und massiven Wandquerschnitte sind sehr belastbare und wasserundurchlässige Stützkonstruktionen. Die daraus resultierende hohe Biegesteifigkeit der Wand, eine etwaige Teil- oder Volleinspannung im Fußbereich sowie eine eventuelle vertikale Auflagerung der Schlitzwand leiten die einwirkenden Kräfte in den Untergrund ein. Weiters können Schlitzwände auch mit zusätzlichen Verankerungen gesichert werden. (ÖGG Empfehlungen, 2018)

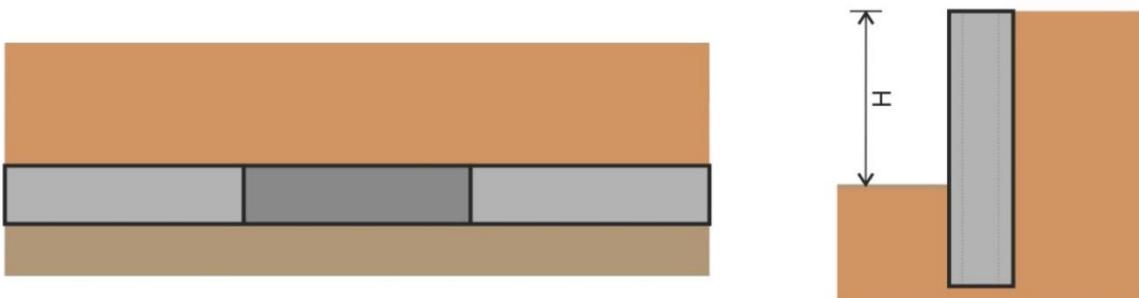


Abb. 22: Grundriss und Schnitt einer Schlitzwand (ÖGG-Empfehlungen, 2018)



Abb. 23: Beispiel einer Schlitzwand mit nachträglicher Verankerung (Implenia GmbH, 2012)

3.6 Pfahlwände

Wie die Schlitzwandkonstruktionen gehören auch die Pfahlwände zu den tiefgegründeten Stützkonstruktionen. Der Unterschied liegt darin, dass ein System aus Pfahlwände kein flächenförmiges, sondern ein punkt- bzw. stabförmiges Tragwerk darstellt. Sie bestehen aus pfahlförmigen Stützwandelementen, welche einen hohen Bewehrungsgrad aufweisen können. Die Übertragung der einwirkenden Kräfte erfolgt wie bereits erwähnt durch eine Teil- oder Volleinspannung, sowie durch eine allfällige vertikale Auflagerung im Fußbereich. Die Herstellung von Bohrpfahlwänden kann entweder überschnitten, tangierend oder aufgelöst ausgeführt werden. Bei der aufgelösten Variante zur Pfahlherstellung, findet die Lastabtragung zwischen den Bohrpfählen, über ein Gewölbe, statt. Dieses wird z.B. durch Spritzbetonschalen gesichert.

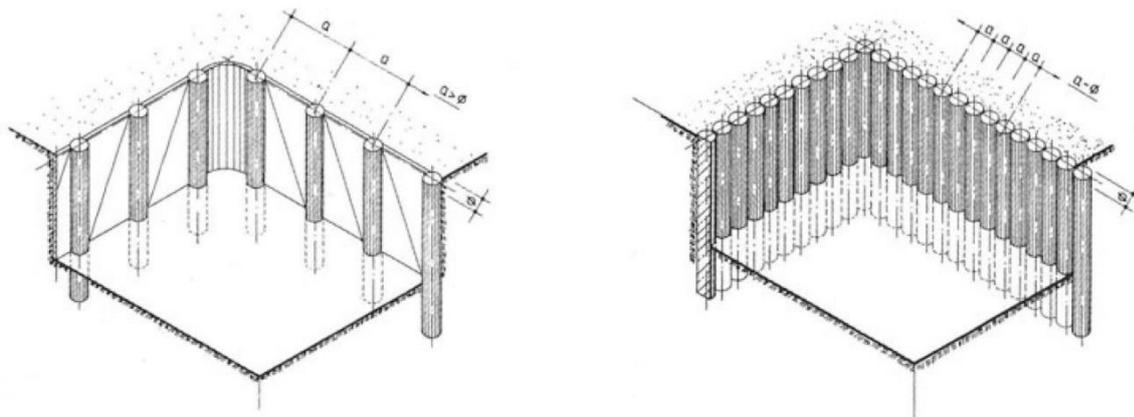


Abb. 24: Grundtypen von Pfahlwänden; Links: aufgelöste Bohrpfahlwand; Rechts: tangierende Bohrpfahlwand (Boley, 2012)

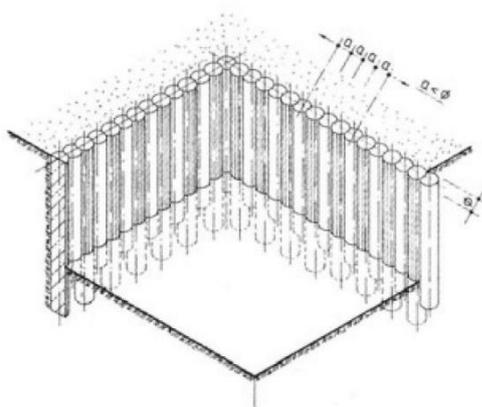


Abb. 25: Überschnittene BPW (Boley, 2012)



Abb. 26: Beispiel einer Bohrpfahlwand (Bachner GmbH, 2006)

3.7 Brunnenwände

Diese tiefgegründeten Stützbauwerke können, durch ihre statische- und konstruktive Wirkung, mit Pfahlwänden verglichen werden. Neben der speziellen Herstellungsweise, sind diese Stützkonstruktionen durch ihre im Allgemeinen tiefe Gründungssohle und den beträchtlichen Durchmessern, gekennzeichnet. Die Herstellung von Brunnen erfolgt über eine sogenannte Abteufung von Schächten. Dabei wird der „Brunnen“ etagenweise ausgehoben und sukzessive z.B. mit einer Ortbetonschale gesichert. Heutzutage erfolgt die Sicherung der Wandungen meist durch (bewehrten) Spritzbeton, welcher nach dem Erhärten eine stützende Schale bildet. Diese Schalen weisen häufig eine Stärke von ca. 10 – 50 cm auf. Ist die Endtiefe erreicht, kann der Brunnenschacht entweder von unten nach oben ausbetoniert, oder durch Verwendung von aussteifenden Stahlbetonringen (sofern diese die Beanspruchung aufnehmen können) fertiggestellt werden. Da Brunnenwände bei sehr großen Beanspruchungen herangezogen werden, Folge dessen hohe Seitendruckkräfte aufzunehmen haben, erfolgt oftmals eine elliptische Wahl des Querschnitts. Die Sicherung der Bereiche zwischen den Brunnen kann mit (verankerten) Spritzbetonschalen erfolgen. (Boley, 2012)

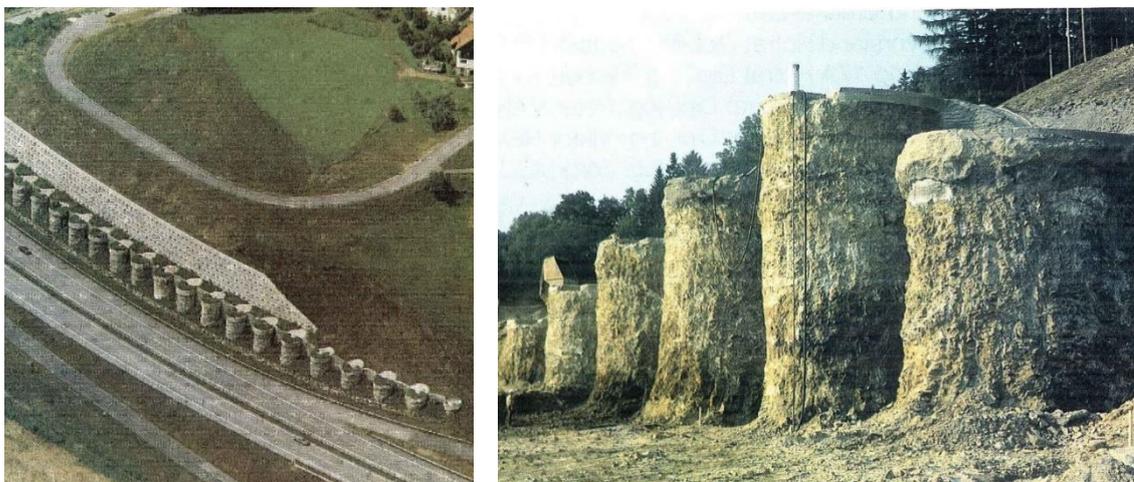


Abb. 27: Brunnenwand entlang der A2-Packabschnitt (Land Kärnten)

Grundriß

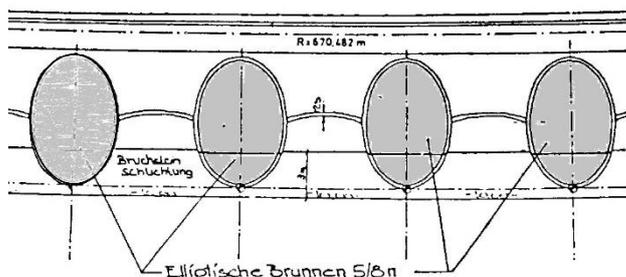


Abb. 28: Grundriß der Brunnenwand entlang der A2 (Land Kärnten)

3.8 Winkelstützmauern

Aus Stahlbeton hergestellte Stützkonstruktionen, welche aufgrund ihrer Querschnittsform auch als Winkelstützmauer bezeichnet werden, stellen in ihrer einfachsten Form ein aus Platten und Scheiben zusammengesetztes Tragwerk dar. Im Gegensatz zu Gewichtskonstruktionen, können derartige Bauwerke um einiges schlanker ausgeführt werden. Die Beanspruchung von Winkelstützmauern erfolgt vor allem auf Biegung und Querkraft woraus teils hochgradig bewehrte Stahlbetonkonstruktionen resultieren.

Bedingt durch die schlanke Konstruktionsform, steht im Vergleich zu Gewichtskonstruktionen ein verhältnismäßig geringes Eigengewicht für die Lastabtragung zur Verfügung. Winkelstützmauern eignen sich besonders in weniger tragfähigen Böden, da sie eine meist große Aufstandsfläche besitzen. Zudem wird durch die auf den horizontalen Schenkel wirkende Eigenlast der Hinterfüllung die vertikale Gewichtskomponente erhöht. Die Anordnung dieses horizontalen Schenkels kann entweder luftseitig oder erdseitig erfolgen. Der Widerstand (rückhaltende Kräfte) gegen die horizontalen Lasten kann somit, durch diese „Aktivierung von Erdkeilen“, vergrößert werden.

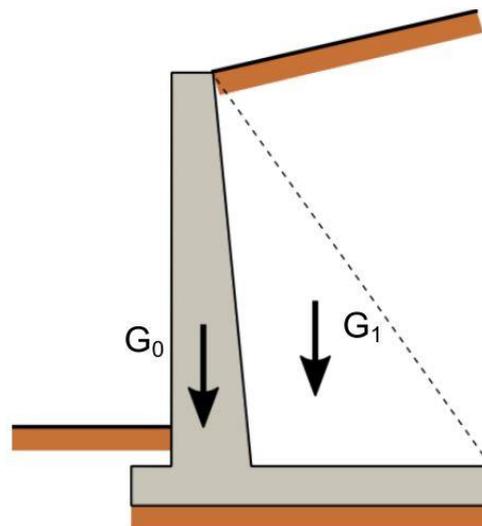


Abb. 29: Zusätzliche Eigengewichts-komponente (Rebhan, 2015)

In Abb. 29 ist die zusätzliche Vertikalkomponente G_1 , infolge der Aktivierung des Erdkeils hinter der Winkelstützmauer, dargestellt. Die Größe hängt im Wesentlichen von der Länge des horizontalen Schenkels ab. Dasselbe gilt für eventuell angeordnete Sporne, die durch die Belastung des Erdreichs ebenfalls zu einer Erhöhung des Eigengewichts führen.

Kennzeichnend für das Verhalten von Winkelstützmauern im Vergleich zu Gewichtsstützmauern ist die Tatsache, dass die Resultierende aus der Wandbelastung und dem Eigengewicht der Stützkonstruktion außerhalb der Kernweite des Bauwerkes zu liegen kommen kann. Im Kippsicherheitsnachweis gilt es diese Lage der Resultierenden in der Sohlfuge zu überprüfen. Der Kippsicherheitsnachweis z.B. einer Gewichtsmauer wird hingegen nur erfüllt, wenn die Resultierende innerhalb der Kernfläche zu liegen kommt. (Boley, 2012)

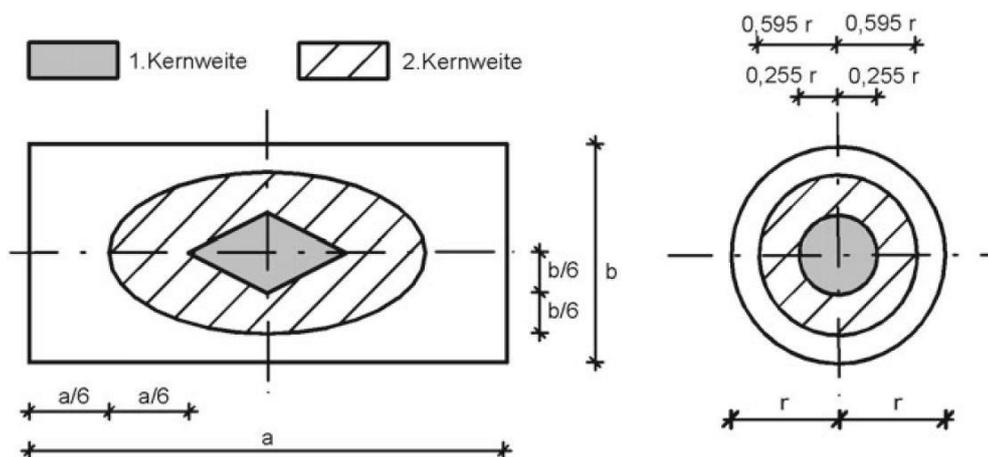


Abb. 30: Graphische Darstellung der Kernflächen für Rechteck- und Kreisquerschnitt (Boley, 2012)

Im Laufe der Zeit haben sich eine Vielzahl an Ausführungsvarianten von Winkelstützmauern ergeben. Durch die Einführung eines Sporns (Berg- und Talspore) sowie Aussteifungsrippen kann eine Erhöhung der Standsicherheit erreicht werden. Nachteilig ist diese Konstruktionsart bei tiefen Einschnitten (z.B. Sicherung eines hohen Geländesprunges), wofür eine große Baugrube bzw. der nötige Platzbedarf dafür gegeben sein muss. In den Abb. 31 und Abb. 32 sind verschiedene Varianten zur Ausführung von Winkelstützwänden abgebildet.

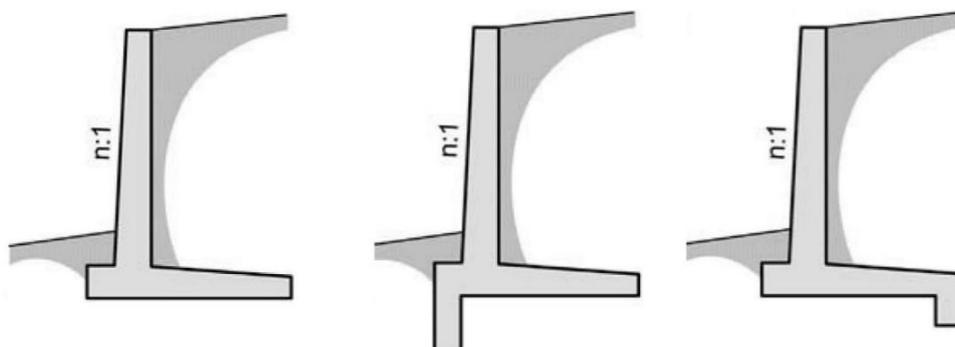


Abb. 31: Ausführungsvarianten einer Winkelstützmauer - vertikale Spore (Bergmeister, 2009)

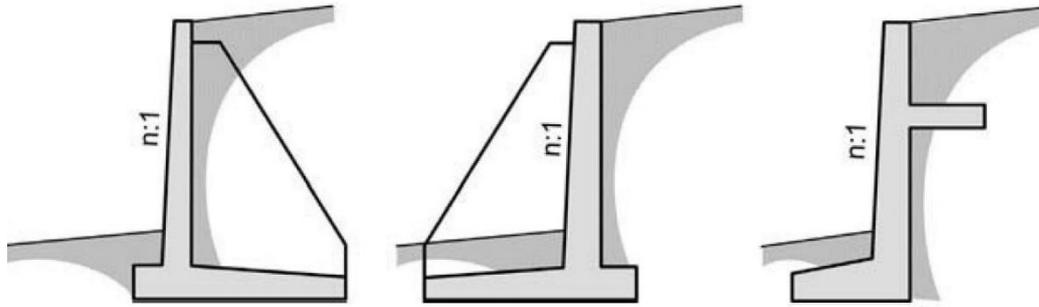


Abb. 32: Ausführungsvarianten einer Winkelstützmauer - aussteifende Rippen und horizontaler Sporn (Bergmeister, 2009)

In der nachfolgender Abb. 33 sind Bilder der Bauphase zweier Winkelstützmauern abgebildet.



Abb. 33: Beispiele einer Winkelstützmauer; Links: aussteifende Rippen „Schwerter“; Rechts: Fundamentbewehrung einer Winkelstützmauer (BSP Ingenieure, 2013)

Abschließend sei zu erwähnen, dass eine Vielzahl weiterer Ausführungen von unverankerten sowie auch verankerten Arten von Stützkonstruktionen existieren. Diese Arbeit beschäftigt sich mit unverankerten Stützbauwerke und im Besonderen mit Winkelstützmauern und deren Schadensbildern und Schadensursachen.

4 Grenzzustände bzw. Versagensszenarien lt. EC7

4.1 Allgemeines

Als Grundlage für geotechnische Bemessungsaufgaben unterscheidet der Eurocode 0 (ÖNORM EN 1990 Kapitel 6.4 und 6.5) grundsätzlich zwischen den Grenzzuständen der Tragfähigkeit (ULS - „ultimate limit state“) und den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit (SLS - „serviceability limit state“). Die Grenzzustände der Tragfähigkeit werden unterdies noch weiter in die Grenzzustände EQU, UPL, HYD, STR, und GEO aufgliedert,

Die laut Norm beschriebenen Versagensszenarien werden im Zuge der Bemessung eines Bauwerks als Grenzzustände bezeichnet. Es können durch diese skizzenhaften Darstellungen der Versagensmechanismen die maßgebenden Beanspruchungsfälle eines geplanten Bauwerks beschrieben werden, und diese dienen in weiterer Folge als Bemessungsgrundlage. Die Grenzzustände stellen eine obere bzw. untere Grenze eines definierten Zustandes dar. Bei einem Über- oder Unterschreiten dieser Grenzwerte ist von einem unzulässigen Verhalten des Bauwerks auszugehen. (Rebhan, 2015)

Für sämtliche geotechnische Bauwerke (im Zuge eines Neubaus) gilt es sicherzustellen, dass die genannten Grenzzustände (Versagensformen) nicht überschritten werden. Diese sind nach Eurocode 7-1 (ÖNORM EN 1997-1 Kapitel 2.4.7) wie folgt definiert:

- *"Verlust der Lagesicherheit des als starrer Körper angesehenen Bauwerks oder des Baugrunds, wobei die Festigkeiten der Baustoffe und des Baugrunds für den Widerstand nicht entscheidend sind (EQU);*
- *Verlust der Lagesicherheit des Bauwerks oder Baugrunds infolge Aufschwimmens (Auftrieb) oder anderer vertikaler Einwirkungen (UPL);*
- *Hydraulischer Grundbruch, innere Erosion und Piping im Boden, verursacht durch Strömungsgradienten (HYD);*
- *Inneres Versagen oder sehr große Verformung des Bauwerks oder seiner Bauteile, einschließlich der Fundamente, Pfähle, Kellerwände usw., wobei die Festigkeit der Baustoffe für den Widerstand entscheidend ist (STR);*
- *Versagen oder sehr große Verformung des Baugrunds, wobei die Festigkeit der Locker- und Festgesteine für den Widerstand entscheidend ist (GEO).“*

Im Grenzzustand des SLS ist noch folgende Fallunterscheidung zu treffen

- **Umkehrbarer Grenzzustand:** Es ereignet sich keine bleibende Überschreitung des Grenzzustandes nach Entfernen der maßgebenden Einwirkung;
- **Nicht umkehrbarer Grenzzustand:** Bleibende Überschreitung des Grenzzustandes nach Entfernen der maßgebenden Einwirkung. (Gebrauchstauglichkeit nicht mehr erfüllt).

Im Speziellen sind nach Eurocode 7-1 (Kapitel 9.2), für alle Stützbauwerke und konstruktiven Geländesprungsicherungen, folgende, zu untersuchenden Grenzzustände (Versagensmechanismen) aufgelistet: (ÖNORM EN 1997-1, 2014)

- „*Gesamtstandsicherheit*;
- *Versagen eines Bauteils, z.B. einer Wand, eines Ankers, eines Gurtes oder einer Steife, oder Bruch der Anschlüsse zwischen derartigen Bauteilen (STR)*;
- *Gemeinsames Versagen des Baugrunds und des Bauteils*;
- *Hydraulischer Grundbruch und Piping (UPL)*;
- *Nachgeben des Stützbauwerks, so dass es zum Einsturz kommt oder dass das Erscheinungsbild die uneingeschränkte Nutzung des Bauwerks, angrenzende Bauwerke oder Leitungen, die davon abhängen, beeinträchtigt werden*;
- *Unzulässige Leckagen durch die Wand oder unter dieser*;
- *Unzulässige Bodenauspülungen und durch die Wand oder unter dieser*;
- *Unzulässige Veränderungen der Grundwasserverhältnisse.“*

Ergänzend muss bei Gewichtsstützwänden und zusammengesetzten Stützkonstruktionen nachstehende Grenzzustände nachgewiesen werden: (ÖNORM EN 1997-1, 2014)

- „*Grundbruch des Bodens unter dem Fundament (GEO-2)*;
- *Gleitversagen in der Sohlfuge (GEO-2)*;
- *Kippen (EQU).“*

Für in den Boden einbindende Wandkonstruktionen müssen zusätzlich folgende Nachweise nachgewiesen werden: (ÖNORM EN 1997-1, 2014)

- „Versagen der Wand oder von Teilen durch Drehung und Verschiebung
- Versagen durch fehlendes vertikales Eigengewicht.“

Neben diesen Zuständen, welche der Eurocode als zu untersuchen anführt, ist es gerade bei Stützbauwerken häufig der Fall, dass eine Kombination aus mehreren Versagensmechanismen eintreten kann. In Folge dessen müssen Kombinationen aus den angeführten Grenzzuständen genauso in die Nachweisführung einbezogen werden. (ÖNORM EN 1997-1, 2014)

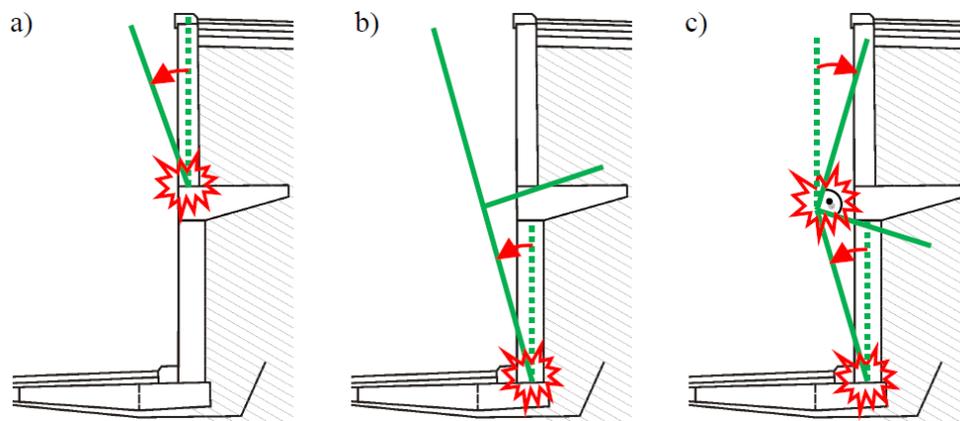


Abb. 34: Bauwerksspezifische Versagensmechanismen für eine Winkelstützmauer mit Sporn (Marte et al., 2014)

Die in Abb. 34 dargestellten Bruchmechanismen bilden für dieses Bauwerk spezifische Versagensszenarien ab. Diese wurden im Zuge von vertieften Prüfmaßnahmen und den Ergebnissen der Berechnungen ermittelt. Das anhand der Untersuchungen wahrscheinlichste Versagensbild zeigt einen Bruch im Anschluss – Fundamentplatte zu vertikalen Wandschenkel – welches in Szenario b) abgebildet ist. Ein weiterer Versagensmechanismus ist in der Fuge oberhalb des erdseitigen Sporns zu erwarten, welches zu einem Verkippen der aufgehenden oberen Wand führen würde (Szenario a). Das dritte spezifische Versagensbild ergibt sich durch ein Biegeversagen in der Anschlussfuge des Sporns zum unteren Wandabschnitt der mit hoher Wahrscheinlichkeit ein Versagen in der Fuge Fundamentplatte zu Folge hätte (Szenario c). (Marte, et al., 2014)

In Abb. 35 ist die durch vertiefte Prüfmaßnahmen untersuchte Winkelstützmauer entlang eines Streckenabschnittes der A23 (Südosttangente) abgebildet, welcher in weiterer Folge einer umfassenden Sicherung und Ertüchtigung unterzogen wurde.



Abb. 35: Bauarbeiten zur Ertüchtigung der Stützmauer (Marte et al., 2014)

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden die möglichen Versagensmechanismen dargestellt und kurz beschrieben. Wie bereits angeführt, handelt es sich hierbei lediglich um die nach Eurocode 7-1 angeführten Versagensmechanismen. Bei spezifischen Bauwerken gilt es, wie bereits angeführt, meist mehrere oder auch zusammengesetzte Versagensmechanismen zu untersuchen.

In Abb. 36 sind als Überblick, die in nachfolgenden Unterkapiteln behandelten Grenzzustände, in Form eines Diagrammes, abgebildet.

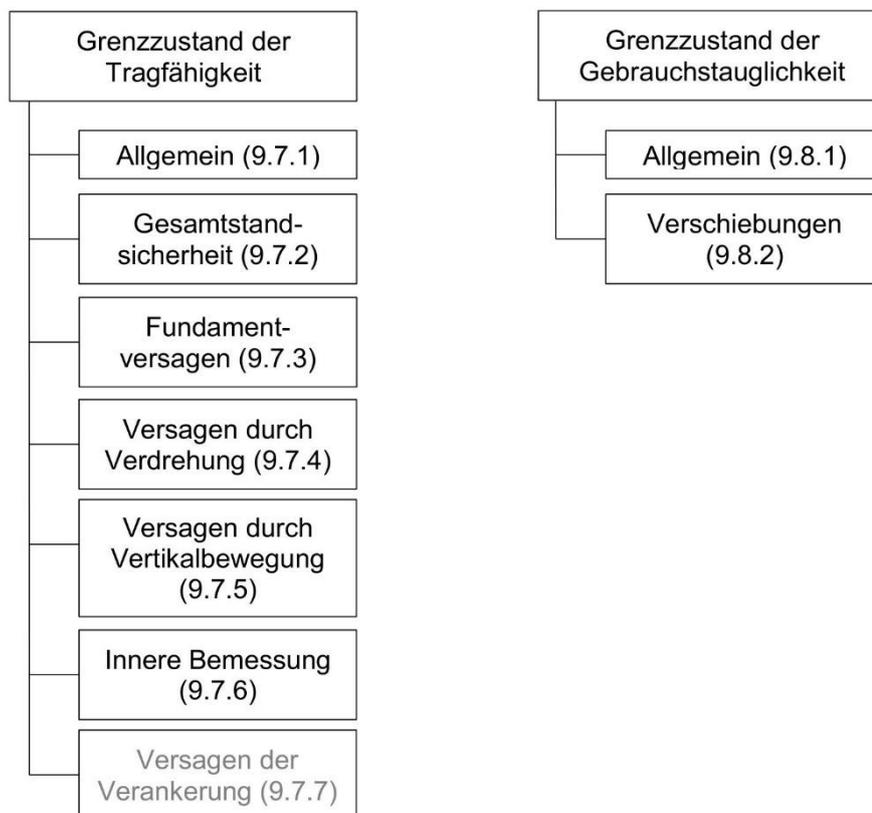


Abb. 36: Gliederung der Versagensmechanismen für Stützbauwerke (Rebhan, 2015)

4.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit - ULS

4.2.1 Allgemein

In der Regel wird bei der Bemessung und Berechnung geotechnischer Bauwerke von einer „inneren“ und einer „äußeren“ Standsicherheit gesprochen. Diese Unterteilung wird grundsätzlich auch bei Berechnungen von Hang- und Geländesprungsicherungen verwendet, da der anstehende Boden, gleich wie die für die Herstellung verwendeten Materialien (Stahl, Beton), als Baustoff angesehen wird. Für die Untersuchung im Grenzzustand der Tragfähigkeit werden hierzu die Versagensbilder für Stützbauwerke wie folgt unterteilt:

- **äußere Standsicherheit** (Versagensmechanismen):

Für die Untersuchung der äußeren Standsicherheit betrachtet man alle eintretenden Versagensmechanismen, welche das Bauwerk in Zusammenhang mit dem Untergrund betreffen (Boden-Bauwerks-Interaktion). Beispielhaft hierzu zählen neben dem Verlust der Lagesicherheit – welche ein Versagen infolge Gleiten, Grund- und Geländebruch, und Fundamentversagen beinhalten – auch hydraulischer Grundbruch, Versagen durch Verdrehung (Kippen) und Vertikalbewegung (Setzung). Die Bemessungswerte für Einwirkungen/Beanspruchungen oder Widerstände werden aus charakteristischen Werten durch Ansatz der Teilsicherheitsbeiwerte erhalten. Die char. Werte der Einwirkungen und Teilsicherheiten sind nach den jeweiligen Abschnitten in EN 1990 (Grundlagen der Tragwerksplanung) und EN 1991 (Einwirkungen auf Tragwerke) zu ermitteln. Die geotechnischen Kenngrößen (Widerstände) sind aus Labor- und Feldversuchen festgestellten Ergebnisse abzuleiten. Teilsicherheitsbeiwerte (widerstandsseitig) sind für ständige und vorübergehende Bemessungssituationen aus dem Anhang A in EN 1997 zu entnehmen.

- **innere Standsicherheit** (Versagensmechanismen):

Für die Untersuchung der inneren Standsicherheit wird neben der Aufnahme von Lasten und der Verformbarkeit des Bauwerks, ebenfalls die Festigkeit der verwendeten Baustoffe und der Widerstand der einzelnen Bauteile überprüft und nachgewiesen. Daher kann hier im Gegensatz zur äußeren Standsicherheit von den Versagensmechanismen des betrachteten Bauteils gesprochen werden. Beispielhaft hierzu sind vor allem bei (Stahl-) Betonbauwerken ein Bruch der Bauteile durch Biegezugversagen oder Schubversagen. Es erfolgt hier eine analoge Ermittlung der Bemessungswerte der Einwirkungen/Beanspruchungen wie weiter oben erwähnt.

Bei Stützkonstruktionen aus Stahlbeton sind die Bemessungswerte des Widerstandes nach EN 1992 (Entwurf, Berechnung und Bemessung von Stahlbetonbauteilen) zu ermitteln. Die dafür erforderlichen Teilsicherheitsbeiwerte für die jeweiligen Bemessungssituationen sind dem nationalen Anhang zu entnehmen.

4.2.2 Äußere Standsicherheit

- **Gesamtstandsicherheit:**

Unter der Gesamtstandsicherheit bezeichnet man jene Sicherheit, welche der gesamte geotechnische Baukörper – also der sich aus baulich-konstruktiver Struktur und Boden zusammensetzende Körper – gegen ein Versagen aufweist. Der Verlust der Gesamtstandsicherheit kann je nach Art eines Geländesprungs als Hangrutschung (Hang), Böschungsbruch (Böschung) oder Geländebruch (Stützkonstruktion) definiert werden (Ziegler, 2012)

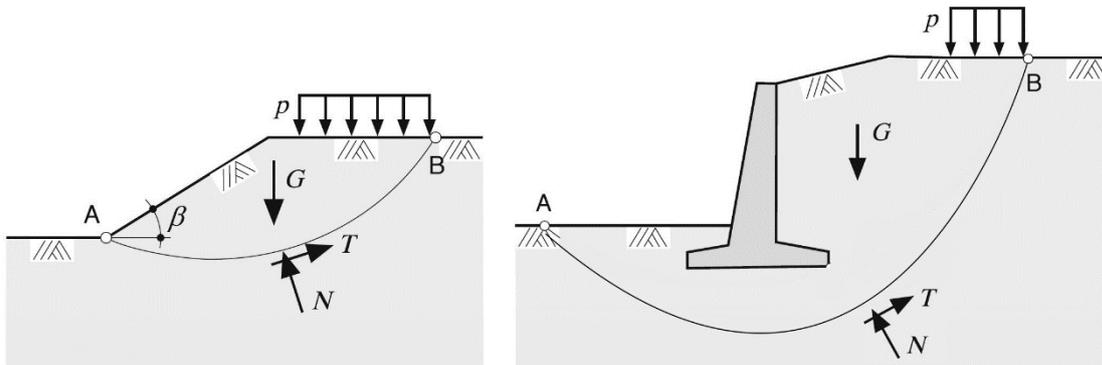


Abb. 37: Links: Böschungsbruch; Rechts: Geländebruch (Schmidt, 2014)

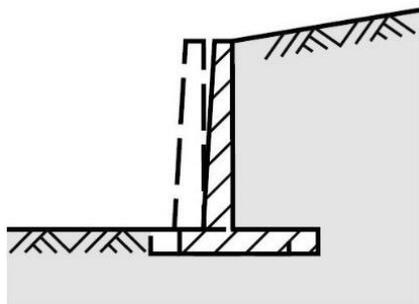
Die in Abbildung 36 dargestellten Grenzzustände zeigen die Mechanismen eines Böschungs- bzw. Geländebruchs. Wenn die Einwirkungen, wie z.B. das Gewicht **G** des Erdkörpers und eine eventuelle Nutzlast **p**, nicht mehr mit den reaktiven Kräften **N** und **T** im Gleichgewicht stehen, und es zu Folge dessen zu einer Bewegung des Erdkörpers kommt, spricht man von einem klassischen Böschungsbruch. Anders ausgedrückt, der Scherwiderstand (Rückhaltende Kräfte) in der maßgebenden Gleitfuge wird durch die einwirkenden Scherkräfte (Treibende Kräfte) überschritten. Ein Geländebruch, welchem dieselben mechanischen Ursachen zu Grunde liegen, unterscheidet sich lediglich dahingehend, dass der Geländesprung, durch ein Stützbauwerk ganz oder teilweise, gesichert worden ist. (Schmidt et al., 2014)

Die Nachweisführung der Gesamtstandsicherheit erfordert die Untersuchung einer Vielzahl von Gleitflächen. Dies ist erforderlich um die maßgebende Versagensform ermitteln zu können.

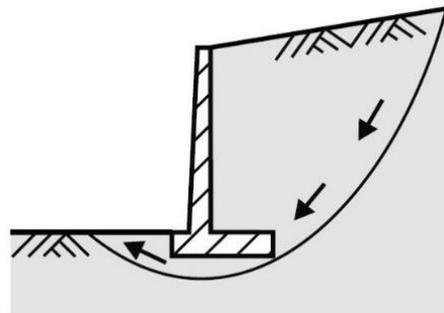
▪ Fundamentversagen:

Die Beanspruchungen aus den Einwirkungen infolge Erddruck, Eigengewicht, Geländeauflast, sowie ggf. Wasserdruck werden bei Stützbauwerken in den meisten Fällen über die Sohlfuge der Gründung in den Boden eingeleitet. Aufgrund dieser Eigenschaft muss bei Stützkonstruktionen ident zu Flächengründungen, die Nachweisführung gegen Grundbruch- und Gleitversagen nach Eurocode 7 erfolgen. (Ziegler, 2012)

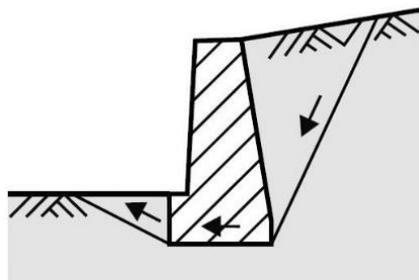
In der Abb. 38 sind die zwei maßgebenden Versagensmechanismen Gleitversagen und Grundbruch ersichtlich.



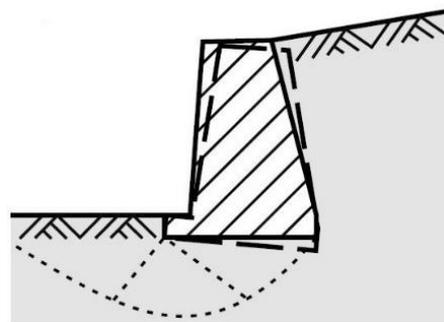
a) Gleitversagen Winkelstützmauer



b) Kombiniertes Grund- u. Geländebruch einer Winkelstützmauer



c) Gleitversagen Gewichtsmauer



d) Grundbruch einer Gewichtsmauer

Abb. 38: Versagensmechanismen - Fundamentversagen (Ziegler, 2012)

Die bruchmechanischen Formen bilden sich ähnlich wie bei dem Versagen der Gesamtstandsicherheit aus, jedoch unterscheidet sich diese im geometrischen Verlauf der Gleitflächen. Hierbei wird der Boden unterhalb (oder neben) des Fundamentes – durch zu hohe Belastung des Bauwerks, welche den Scherwiderstand des Bodens überschreitet – lokal zur Seite gedrückt und seitlicher Boden nach oben hin verdrängt. Dabei gleitet oder sinkt das Fundament in weiterer Folge ein und es ergibt sich dadurch eine Hebung des umliegenden Geländes.

- Ein Gleitversagen kann z.B. durch einen zu geringen Scherwiderstand in der Fundamentsohle oder durch eine ungünstige Lage oder Form des Fundamentes eintreten.

- Bei einem Grundbruch kommt es Infolge einer Überbelastung des Bodens im Gründungsbereich eines Bauwerks zu einem Überschreiten der Scherfestigkeit. Das bedeutet, dass das Eigengewicht des Erdkörpers, die wirkenden Kohäsionskräfte und die „Verzahnung“ der Bodenkörner nicht mehr ausreichen, um die einwirkenden Kräfte im Gleichgewicht zu halten. Die Scherfestigkeit des Bodens kann beispielsweise durch Porenwasserdrücke stark reduziert werden. Unter Umständen kann auch ein Wegfallen etwaiger seitlicher Stützungen zu einem schnelleren Grundbruchversagen führen.
 Ein Grundbruch nach Adam (Betonkalender, 2007) liegt vor, *„wenn ein Fundament so stark belastet wird, dass der Scherwiderstand des Bodens im Bereich unter und unmittelbar neben dem Gründungskörper überwunden wird. Der Boden entweicht dann seitlich, und das Fundament sinkt ein.“*

▪ **Versagen durch Verdrehung:**

Das Auftreten dieser Versagensform ist im Allgemeinen bei tiefgegründeten Stützbauwerken der Fall. Es muss nachgewiesen werden, dass ein Gleichgewicht zwischen den aus Erddruck und anderer Belastung entstehenden (einwirkenden) Kräften und den im Fußbereich wirkenden (rückhaltenden) Kräften, besteht. Ist dies nicht der Fall, kann es bei tiefgegründeten Stützwänden, in besonderen Fällen aber auch bei Gewichtsstützwänden, zu einer Verdrehung oder einem sogenannten „Kippen“ kommen. (Ziegler, 2012)

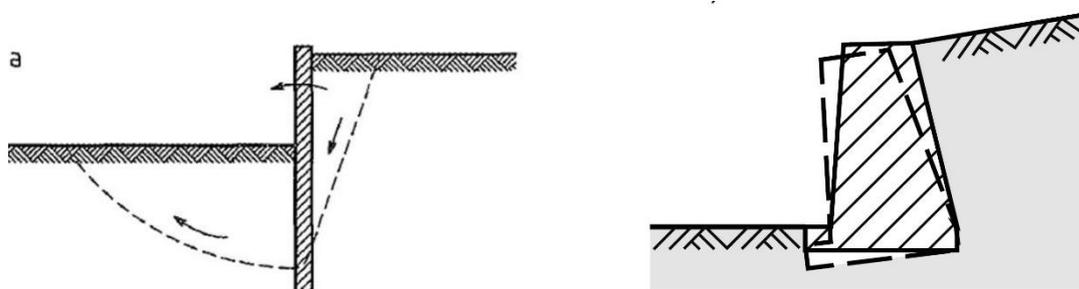


Abb. 39: Versagen bodengestützter Wände; Links: Drehung einer tiefgegründeten Wand (ÖNORM EN 1997-1, 2014); Rechts: Drehung (Kippen) einer Gewichtsmauer (Ziegler, 2012)

▪ **Versagen durch Vertikalbewegung:**

Bei sehr massiven Stützbauwerken sowie bei tiefgegründeten Stützbauwerken ist das Gleichgewicht in vertikaler Richtung zu untersuchen. Die auftretenden Vertikalkräfte infolge Eigengewicht und ggf. durch Verankerungen (vertikale Kraftkomponente) dürfen die in der Gründungssohle herrschenden Scherwiderstände nicht überschreiten. Bei einem Überschreiten kommt es dadurch zu einem „Setzen“ oder Absinken der Stützkonstruktion.

4.2.3 Innere Standsicherheit

In Eurocode 7 (ÖNORM EN 1997-1, 2014) wird der Nachweis der inneren Standsicherheit für alle konstruktiven Bauteile gefordert. Dazu zählen z.B. die aus Stahlbeton bestehenden Bauteile des Stützbauwerks (Fundamente, Konsolen, Sporne, aufgehende Wände, Steifen) sowie evtl. vorhandene Anker oder z.B. die Ausfachung zwischen aufgelösten Bauwerken. Es soll damit sichergestellt werden, dass kein inneres Versagen der Stützkonstruktion eintritt.

Aufgrund der zuvor erwähnten unterschiedlichen Bauteile und Konstruktionsarten, sowie der verwendeten Materialien, werden zur Nachweisführung neben dem EC7, noch weitere Normen der Eurocode Reihe herangezogen. Die hierfür anzuwendenden Normenwerke sind in der nachfolgenden Tabelle aufgelistet:

Tabelle 1: Eurocodes für Bemessung der inneren Tragfähigkeit (Rebhan, 2015)

EC Nr.	Bezeichnung	
2	EN 1992	Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton und Spannbetontragwerken
3	EN 1993	Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten
5	EN 1995	Bemessung und Konstruktion von Holzbauten
6	EN 1996	Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten

Maßgebend für die Einhaltung der geforderten Grenzzustände und für den Widerstand entscheidend, ist die Festigkeit der Baustoffe und der Widerstand des Bauteils. Aufgrund der Einwirkungen muss eine verformungsbedingte Festigkeitsabnahme durch z.B. Risse in Betonquerschnitten, Verdrehungen bei plastischen Gelenken oder aber auch durch ein Ausbeulen von Stahlquerschnitten, berücksichtigt werden.

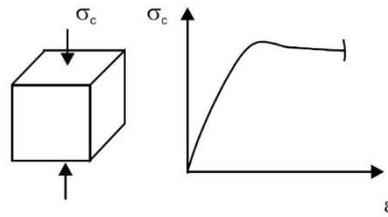


Abb. 40: Arbeitslinie Beton (Ziegler, 2012)

Neben der für die Ermittlung der Materialwiderstände notwendigen Materialgesetze, sind auch etwaige Vereinfachungen und Annahmen zur Widerstandsberechnung von Bedeutung. So ist zur Veranschaulichung der oft unterschiedlichen Materialeigenschaften (Stahl, Beton, Holz), in Abb. 40, beispielhaft die Betondruckfestigkeit und die dazugehörige Arbeitslinie dargestellt.

In den nachfolgenden Abbildungen sind einige, für die „innere Standsicherheit“ zu untersuchenden Versagensmechanismen dargestellt. Im Eurocode 7 Kapitel 9.7.6 werden unter anderem diese möglichen Versagensmechanismen aufgelistet:

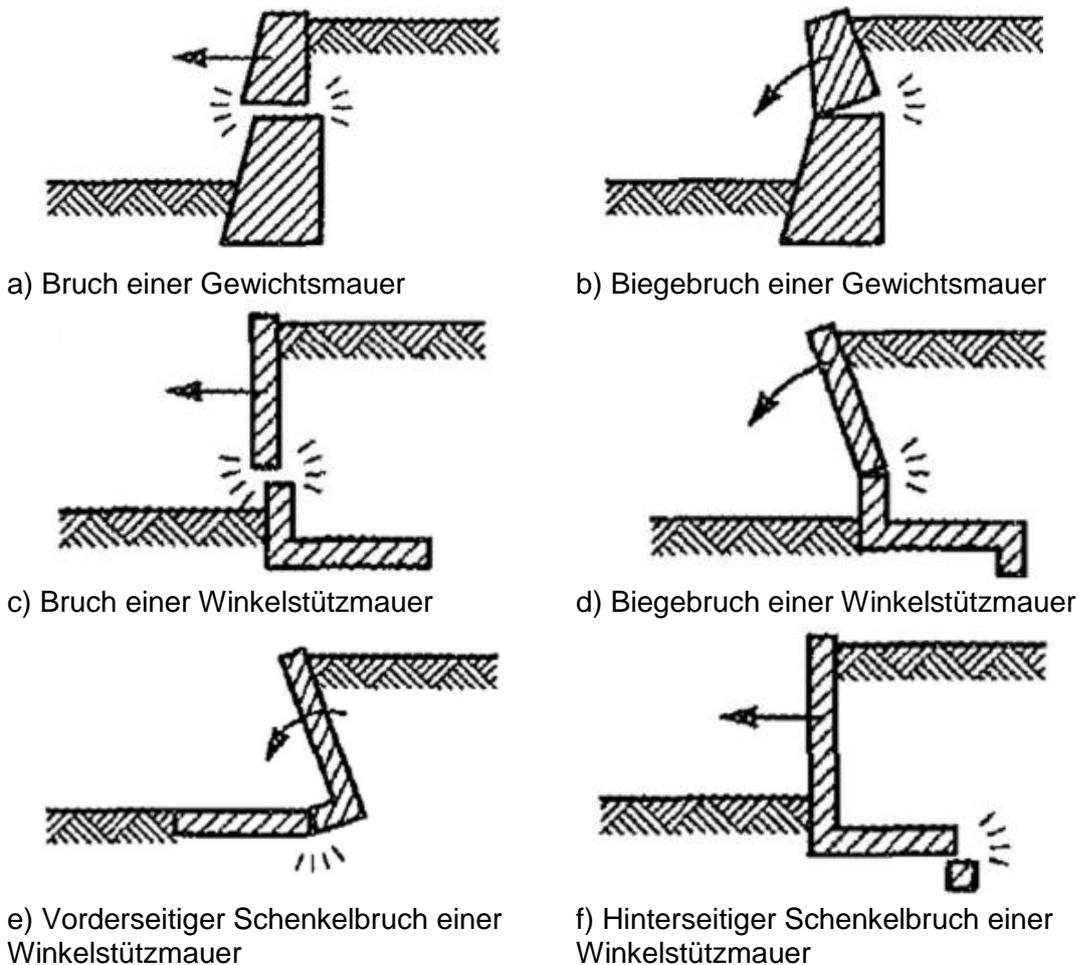


Abb. 41: Innere Versagensmechanismen (ÖNORM EN 1997-1, 2014)

4.3 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit SLS

4.3.1 Allgemein

Für Böschungen, Geländesprünge und den damit verbundenen konstruktiven Bauwerken, muss die Gebrauchstauglichkeit, welche im Wesentlichen eine Begrenzung der Verformungen darstellt, nachgewiesen werden.

Der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit bei Stützbauwerken ist definiert, dass bei Gründungen und Fundamenten keine unverträglichen Setzungen eintreten, eine etwaige horizontale Lageänderung in der Fundamentsohle (Verschiebung Fundament) begrenzt wird und dass die Grenzwerte für Verdrehungen eingehalten werden. (Schmidt, 2014)

Neben dieser „äußeren“ Begrenzung der Verformungen, ist zum anderen auch eine „innere“ Gebrauchstauglichkeit (Verformungsbegrenzung) eines Bauteils oder Tragwerksquerschnitts gefordert. So werden bei der Nachweisführung der Gebrauchstauglichkeit bei Stützkonstruktionen, zusätzlich zu einer Rissbreitenbeschränkung bei Stahlbetonkonstruktionen, auch evtl. weitere bauwerksabhängige Nachweise, welche die Dauerhaftigkeit betreffen, gefordert einzuhalten.

4.3.2 Regelung in ÖNORM EN 1997-1, 2014

Im Eurocode 7 wird im Absatz 9.8.2 angeführt, dass in folgenden Fällen genauere Untersuchungen zur Berechnung von Verschiebungen vorzunehmen sind: (ÖNORM EN 1997 -1, 2014)

- *„wenn benachbarte Gebäude und Leitungen ungewöhnlich verschiebungsempfindlich sind;*
- *wenn keine vergleichbaren Erfahrungen vorliegen;*

Verschiebungsberechnungen sollten auch in folgenden Fällen vorgenommen werden:

- *wenn die Wand einen über 6 m hohen anstehenden bindigen Boden von niedriger Plastizität oder;*
- *wenn die Wand einen über 3 m hoch anstehenden Boden von hoher Plastizität stützt; und*
- *wenn die Wand in weichen Ton einbindet oder dieser unter dem Wandfuß ansteht.“*

Im Gegensatz zum Grenzzustand der Tragfähigkeit werden bei der Betrachtung der Gebrauchstauglichkeit keine Aussagen über mögliche Versagensszenarien getroffen. Es sind jedoch Grenzwerte für Verschiebungen und Verformungen einzuhalten. (Rebhan, 2015)

Der Anhang H des Eurocodes 7 (ÖNORM EN 1997-1, 2017) empfiehlt dabei die zu untersuchenden Arten von Bauwerksverformungen. Neben der Setzung und eventuelle Setzungsunterschiede von Fundamenten, wird unter anderem auch die Drehung, die Verkantung, der Biegestich, und die Horizontalverschiebung erwähnt. Die maximal aufnehmbaren Winkeländerungen für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit von z.B. tragenden Mauerwände, werden zwischen einem Grenzwertbereich von $1/200 \div 1/30$ angeführt. Es sei anzumerken, dass diese Verhältniswerte für den Fall einer Sackung (= Verschiebung) gelten.

5 Schadensbilder bei Stützbauwerken

Das Erfassen von Schäden an Bauwerken, erfolgt hauptsächlich im Rahmen einer planmäßig angesetzten Kontrolle oder Prüfung. Diese sind für unverankerte, bestehende in RVS 13.03.61 (RVS 13.03.61, 2014) näher beschrieben. Zusätzliche Unterlagen und Informationen finden sich ebenfalls in den ÖGG-Empfehlungen zur vertieften Prüfung und Beurteilung bestehender, unverankerter Stützbauwerke (ÖGG-Empfehlungen, 2018)

5.1 Allgemeines

Bei Stützbauwerken ist eine bautechnische Überwachung in Hinblick auf die Zuverlässigkeit und Verkehrssicherheit, zwingend erforderlich. Die in Kapitel 4.2 genannten Versagensmechanismen können, z.B. durch Ankündigen gewisser Mängel und Schäden, erkennbar werden. Eine solche „Schadensankündigung“ bei Stützbauwerken tritt z.B. in Form von Verschiebungen oder Verformungen auf. Auch das Auftreten von Rissen und Abplatzungen bei Betonbauteilen kann ein Indiz dafür sein.

Für die Kontrolle und Prüfung bestehender Stützbauwerke sind unter anderem die technischen Rahmenbedingungen, welche in den Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen geregelt sind, einzuhalten. Die festgelegten Maßnahmen in RVS 13.03.61 – Qualitätssicherung bauliche Erhaltung, Überwachung, Kontrolle und Prüfung von Kunstbauten für nicht geankerte Stützbauwerke (RVS 13.03.61, 2014) – zählt dabei zur standardisierten Methode. Hier werden neben der laufenden Überwachung, der Kontrolle und der Prüfung auch Hinweise zu etwaigen Sonderprüfungen angeführt. Sonderprüfungen indes stellen bereits einen Übergang zu einer individuellen Methode der Untersuchung dar. (Marte et al., 2014)

„Die Erhebung des Erhaltungszustandes wird bezweckt, um Mängel und etwaig eingetretene Schäden rechtzeitig zu erkennen und den Erhaltungsverpflichteten dadurch in die Lage versetzen, diese Mängel und Schäden zu beheben, bevor größerer wirtschaftlicher Schaden eintritt oder die Verkehrssicherheit beeinträchtigt wird.“ (RVS 13.03.61, 2014)

In den nachfolgenden Unterkapiteln soll auf etliche an unverankerten Stützbauwerken häufig anzutreffenden Schäden und die daraus resultierenden Schadensbilder eingegangen werden. Kapitel 6 beschäftigt sich des Weiteren im Speziellen mit Korrosionsschäden an Winkelstützmauern.

Aufgrund der Vielzahl an anzutreffender Fehlstellen, deren Arten und unterschiedlichen Kombinationen, sei zu erwähnen, dass diese Auflistungen nicht als erschöpfend angesehen werden darf.

5.2 Systemverhalten von Stützbauwerken

Damit ein aussagekräftiger Erhaltungszustand und sich ankündigende Schäden beurteilt werden können, ist die Kenntnis von denkbaren Versagensmechanismen, welche sich nach Art der Ankündigung unterscheiden können, zwingend erforderlich. Durch die Berücksichtigung des aktuellen Erhaltungszustandes und des ursprünglichen Sollzustandes einer Stützkonstruktion, kann eine Einteilung in nachfolgende Kategorien erfolgen: (vgl. ÖGG Empfehlungen, 2018)

- **Eindeutige Ankündigung des Versagens** (duktilen Verhalten):

„Im Regelfall erfolgt eine Ankündigung eines Versagens durch eine Neigungsänderung-, Lageveränderung oder Formänderung (zumeist verbunden mit einer sichtbaren oder nicht sichtbaren Rissbildung) des Bauwerks und / oder einzelner Bauteile. Hier können Monitoring- und Überwachungssysteme zweckmäßig verwendet werden.“

- **Keine ausreichende Ankündigung des Versagens** (sprödes Verhalten):

„Das Versagen des Bauwerks tritt ohne Vorankündigung ein. Eine frühzeitige Erkennung des Versagens ist durch ein Monitoring nicht möglich.“

- **Erkennbare zusätzliche Ankündigung vor einem Versagen** (teilduktil. Verhalten):

„Bei der Beurteilung von Bestandsbauwerken ergibt sich oftmals die Situation, dass einem Bauwerk oder Bauteil kein eindeutig duktilen oder sprödes Versagen zugeordnet werden kann. Lässt ein derartiges System ein Verformungspotenzial und eine ausreichende Reaktionszeit bis zum Eintreten des Versagens erwarten, so kann von einem teilduktilen Systemverhalten gesprochen werden.“

Das Systemverhalten bestehender Stützbauwerke verändert sich u.U. über die gesamte Lebensdauer. Mit zunehmenden Alter der Baustoffe und verwendeten Materialien können sich sowohl die Materialeigenschaften (Betonalterung etc.), als auch das System „Stützbauwerk“ verändern. Dies hat zur Folge, dass ein Bauwerk sein nach der Herstellung, ursprünglich, duktilen Verhalten verliert. Durch die angesprochene

Alterung und aufgrund eventuell, eingetretener Schäden über die Zeit, kann sich die Konstruktion zu einem spröde verhaltenden Bauwerk entwickeln. Im weiteren Sinne kann gesagt werden, dass ein Zusammenhang zwischen sich entwickelnder oder aufgetretener Schäden, mit einem etwaigen zukünftigen Versagensform besteht.

Für die Überwachung und zur frühzeitigen Erkennung kann ein Monitoringsystem herangezogen werden. Durch Monitoring können Veränderungen eines Bauwerks (z.B. Grobdetektion von Schäden, Erfassung von Verformungszunahmen) über die Zeit detektiert und beurteilt werden. Das Ziel bei der Verwendung eines Monitorings ist es, die Randbedingungen eines zu untersuchenden Bauwerks und dessen Einflüsse (aus bereits erfassten Schäden) und möglichen Versagensmechanismen gegenüberzustellen und daraus eine Identifikation der Ursachen der Verformungen ableiten zu können. Weiters besteht die Absicht darin, eine bessere Beurteilung der Schadens- und Versagensentwicklung zu prognostizieren. In Abb. 42 ist ein schematischer Ablauf eines Monitoringkonzeptes abgebildet.

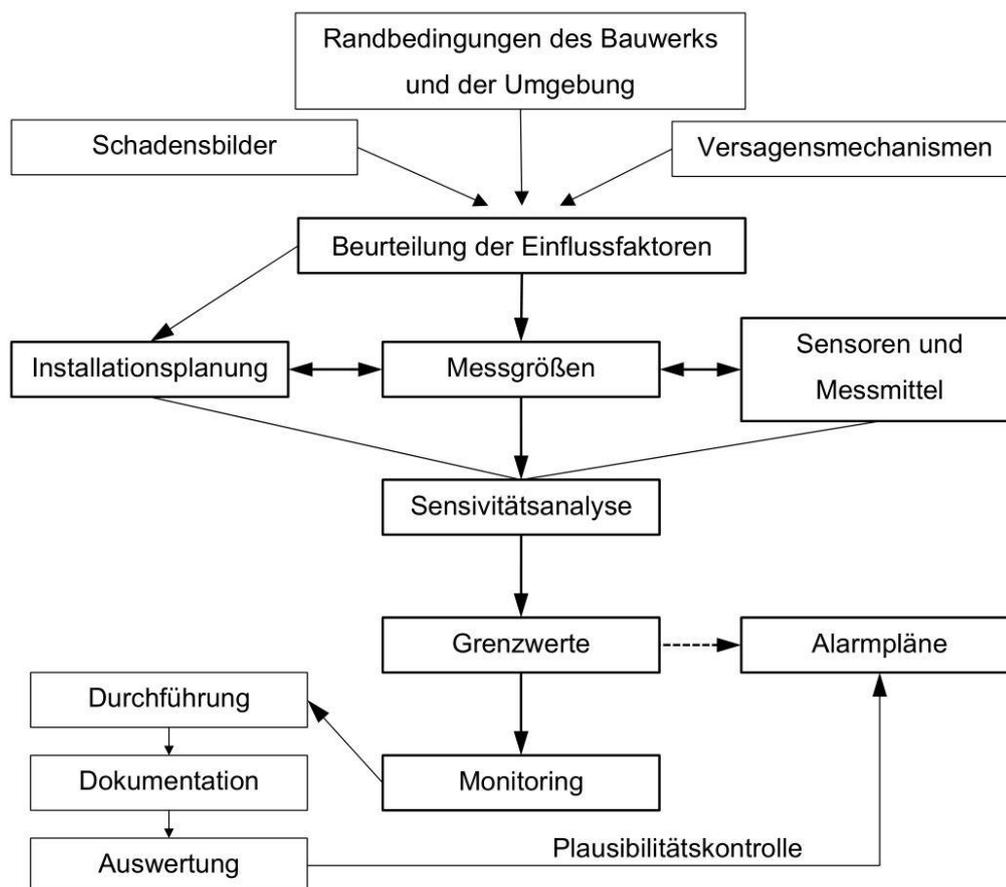


Abb. 42: Beispiel eines Ablaufs zu einem Monitoring (ÖGG Empfehlungen, 2018)

5.3 Schäden an Beton und Stahlbeton

In diesem Unterkapitel wird auf allgemeine, im Stahlbetonbau auftretende, Schäden eingegangen. Eine genauere Beschreibung durch Korrosion verursachte Schädigungen und deren Auswirkungen an Stützbauwerke wird in Kapitel 6 vorgenommen.

Ein für geotechnische Bauwerke sehr häufig verwendeter Baustoffe ist Beton bzw. Stahlbeton. Neben seinen verschiedenen Stärken, wie z.B. Wirtschaftlichkeit und Dauerhaftigkeit, zeichnet sich Beton teilweise nachteilig durch seine vergleichsweise geringe Zugfestigkeit aus. Das Auftreten von Schäden an Betonbauteilen oder Bauwerken entsteht meist infolge von:

- Fehler in der Planungsphase
- unsachgemäßer Einbau des Betons
- betontechnologische Fehler
- Einwirkungen in der Nutzungsphase.

Eine Übersicht von möglichen Schäden an Betonbauteilen zeigen die von Stahr kategorisierten Schadensbilder und deren Ursachen.

Tabelle 2: Übersicht über Schäden und deren Ursachen an Betonbauteilen (Stahr, 2015)

Schadensbild	Ursache		
	1	2	3
Betonabplatzungen	x	x	x
Betonausblühungen	x	x	x
Betonauslaugung	x		
Betonkorrosion	x	x	
Risse		x	
Auftreten von Rostflecken		x	x
Treiben des Betons	x	x	
1 Roh- oder Baustoff mangelhaft, ungeeignet oder falsch eingesetzt			
2 Fehlerhafte Baukonstruktion			
3 Fehlerhafte Betonherstellung oder Verarbeitung			

5.3.1 Betonabplatzungen

Beton ist hochalkalisch und besitzt dadurch eine sogenannte „Passivierungsschicht“, welche sich auf dem eingelegten Bewehrungsstahl bildet (siehe Abb. 43). Dadurch schützt der Beton den Stahl vor einer möglichen Korrosion.

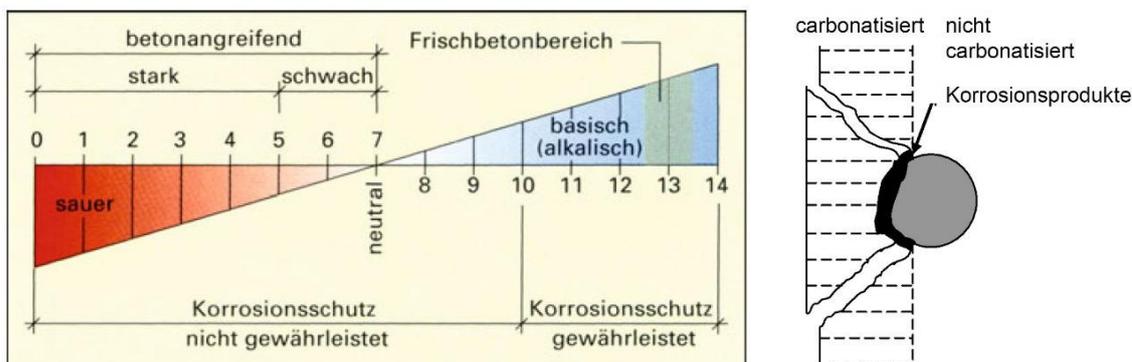


Abb. 43: Links: pH-Wert von Beton; Rechts: Grafik über Karbonatisierungstiefe und entstehende Korrosion an einem Bewehrungsstahl (Baustoffwissen, 2016)

Mit der Zeit verliert der Beton aufgrund seiner Karbonatisierung jedoch an Alkalität. Unter der Karbonatisierung versteht man die chemische Reaktion zwischen dem Zementstein und dem Kohlendioxid, welches in der Umgebungsluft vorkommt. Durch diesen Vorgang verwandelt sich der Zementstein in Calciumcarbonat (=Kalkstein). Das bedeutet der pH-Wert des Zementsteins nimmt nach außen hin sukzessive ab und somit auch der alkalische Schutz der Bewehrung. Sobald kein ausreichender Schutz durch die Betonüberdeckung mehr gegeben ist, kann sich das bildende Korrosionsprodukt des Stahls (Rost), welches ein Vielfaches an Volumen des ursprünglichen Stahl-Querschnitts besitzt, ausdehnen. Der entstehende Druck (auch als „Sprengdruck“ bezeichnet) kann in weiterer Folge zu oberflächlichen Rissen führen und anschließend eine Abplatzung des Betons bewirken. Der Vorgang der chemischen Reaktion ist in Abb. 44 dargestellt:

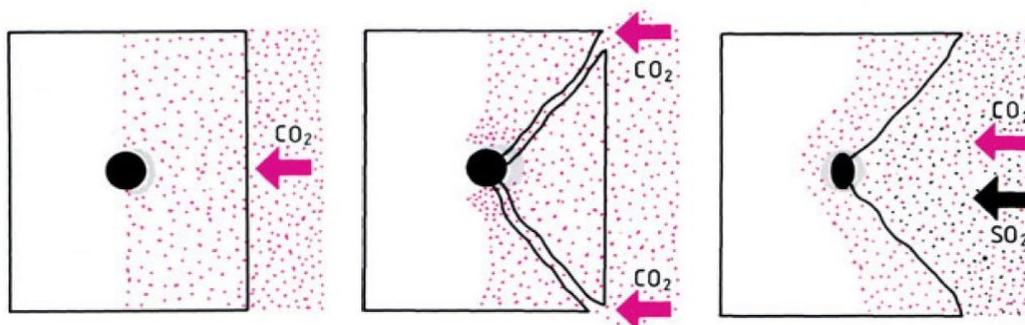


Abb. 44: Chemischer Prozess der Karbonatisierung (Stahr, 2015)

Anhand der in Abb. 45 und Abb. 46 dargestellten Bilder ist ein Abplatzen des Betons, am Fundament einer Stützmauer, ersichtlich. Weiters ist ein Freiliegen der konstruktiven Bewehrung deutlich erkennbar. Neben der Karbonatisierung und der dadurch entstehenden Abplatzung des Betons, können auch mechanische Einwirkungen und eine minderwertige Qualität der Betonoberfläche zu einem derartigen Ablösen führen.



Abb. 45: Beispiel einer Betonabplatzung an einem Stützmauerfundament



Abb. 46: Beispiel einer Betonabplatzung an der Wandoberfläche eines Stützbauwerks

5.3.2 Betonausblühungen

„Kalkschleier“ und krustenartige Kalkablagerungen auf der Betonoberfläche werden Ausblühungen genannt. Diese können einerseits im jungen Betonalter (bedingt durch einen unsachgemäßen Herstellungsprozess) oder andererseits bei chemischer Belastung der Betonoberfläche (chemische Belastung von außen) auftreten.

- Bei der Herstellung bzw. der Zusammensetzung des Betons ist darauf zu achten, dass etwaige Frostschutzmittel oder Erhärtungsbeschleuniger nicht in zu großen Mengen zugesetzt werden. Ebenfalls kann es durch wasserlösliche Salze (meist Sulfate oder Chloride) sowohl im Anmachwasser, als auch in den Zuschlagsstoffen, zu Betonausblühungen kommen. Dies wird als „innere“ Schädigung bezeichnet.
- Liegt eine bereits bestehende Beschädigung an der Betonoberfläche vor, so ist ein Eindringen von Schadstoffen (Wasser, in Wasser gelöste Salze, Gase, chem. und biologische Stoffe) möglich. Diese können dann z.B. in Form von Tausalz oder durch belastetes Grundwasser an die Oberfläche gelangen. Bei einer chemischen Belastung von außen, entstehen in weiterer Folge dieselben Schädigungen, wie durch „innere“ chemische Prozesse.

In Abb. 47 sind derartige Betonausblühungen (auch Kalkausscheidungen) dargestellt.



Abb. 47: Links: Betonausblühung in der Nähe eines Risses im Stahlbetonbauteil;
Rechts: Ausblühungen in unmittelbarer Nähe zur Straße mit Tausalzverwendung

5.3.3 Betonkorrosion

Unter Betonkorrosion wird eine Schädigung der Oberfläche am Beton verstanden, welche durch chemische und witterungsbedingte Angriffe hervorgerufen wird. Sie kann durch die Reaktion von Säure- oder Salzlösungen mit den Kalziumverbindungen des Betons ausgelöst werden, und führt nach langer unbehinderter Einwirkung zu einer erheblichen Abrasion der Oberfläche. Die Auslöser der Betonkorrosion können sein:

- chemischer Angriff
- Frostangriff (mit und ohne Taumittel)
- Mechanischer Angriff (Verschleißbeanspruchung)

In Abb. 48 sind Beispiele von Schädigungen infolge Betonkorrosion angeführt.



Abb. 48: Beispiele einer Schädigung durch Betonkorrosion (Baustoffwissen, 2016)

5.3.4 Rostfahnen

Rostfahnen sind rötliche Verfärbungen der Betonoberfläche und lassen auf korrodierende Stahleinlagen schließen. Das Auftreten von Rostfahnen kann durch freiliegende Bewehrungselemente, zu geringe Betondeckung oder Bewehrungskorrosion im Bereich von Rissen ausgelöst werden. Neben einem etwaigen optischen Mangel, welcher nicht zwingend einen Schaden darstellt, gilt es jedoch zu berücksichtigen, dass es unter Umständen zu einer Schädigung der dahinterliegenden Bewehrung kommen kann.

5.3.5 Risse im Beton

Prinzipiell sind Risse erforderlich, um die Bewehrung zu aktivieren, und somit die Verbundtragfähigkeit des „Verbundbaustoffs Stahlbeton“ zu erreichen. Die hierzu erforderlichen Risse müssen jedoch in der Breite beschränkt werden, um eine gewisse Gebrauchstauglichkeit (Verformung) und Dauerhaftigkeit (Korrosionsschutz) des Objekts gewährleisten zu können. Risse entstehen aus unterschiedlichen, sich teilweise überlagernden Ursachen. Einerseits können äußere Einwirkungen Trenn-, Biege-, Verbund- und/oder Schubrisse herbeiführen. Andererseits kommt es infolge von Zwangsbeanspruchungen (z.B. durch Temperaturweirwirkung oder Schwinden) sehr häufig zu Oberflächen- oder Trennrissen. Des Weiteren können die zuvor beschriebenen chemischen Reaktionen (Karbonatisierung, Chlorideinwirkung etc.) dazu führen, dass es an der Betonoberfläche zu einer konzentrierten Rissbildung kommt. Auch statische oder konstruktive Mängel in der Planung sowie in der Ausführung kann ein übermäßiges Entstehen von Rissen bewirken. In Abb. 49 sind einige schematische Risse nach Weber (2013) dargestellt:

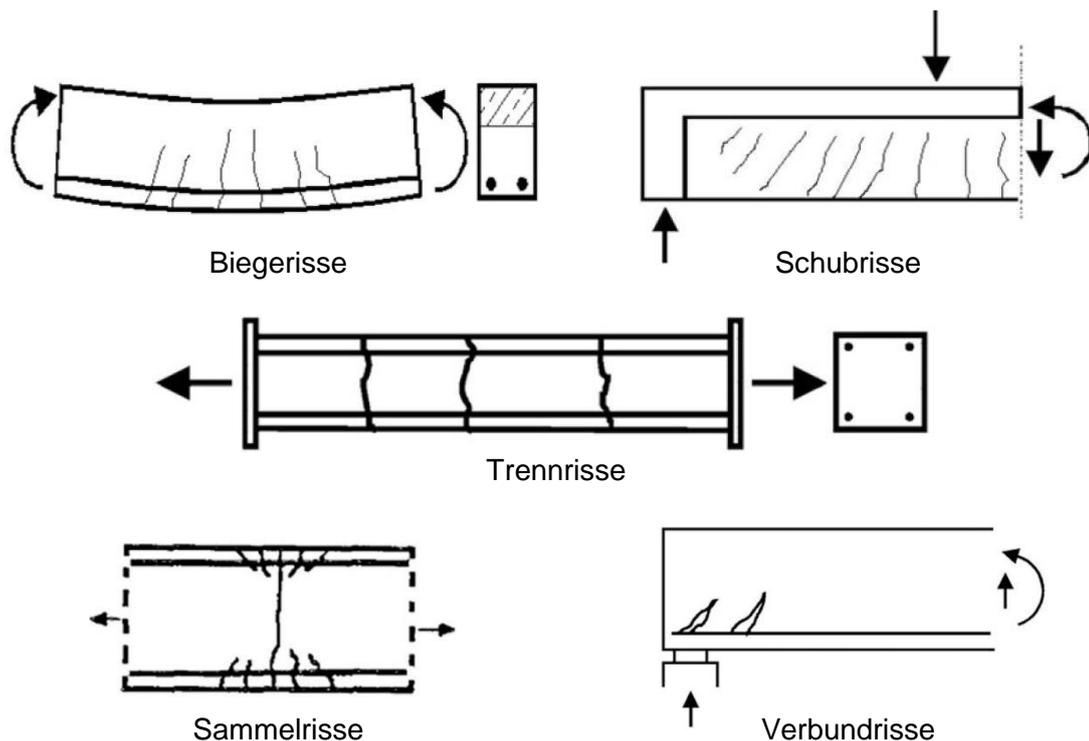


Abb. 49: Schematische Abbildungen von Rissen (Weber, 2013)

5.3.6 Verarbeitungsfehler und Kiesnester

Beim Betonieren von vertikalen Bauteilen zeigen sich des Öfteren Entmischungen am Schalungsfuß (Schalungsunterseite). Diese können entweder durch eine Entmischung des Betons, wenn er über die gesamte Wand- bzw. Schalungshöhe (ohne Verwendung eines Fallrohres) frei fallend eingebracht wird, entstehen. Dabei entmischt sich der Beton, indem die feineren Anteile der Gesteinskörnung und der Zementleim an der Schalung bzw. an den Bewehrungskörben hängen bleiben und das Grobkorn bis zur Schalungsunterseite gelangt. Durch das Fehlen des Zementleims, können bei einer anschließenden Verdichtung mit Rüttler, die größeren Kieskörner nicht sauber umhüllt werden. Weiters kann durch eine unsaubere Positionierung der Schalung (keine ebene Aufstandsfläche), Zementleim durch diese entstandenen Lücken unter der Schalung austreten, und somit zu Kiesnestern führen. (Leitfaden Sichtbeton Holcim, 2011)

In Abb. 50 und Abb. 51 ist ein Beispiel von Kiesnester angeführt.

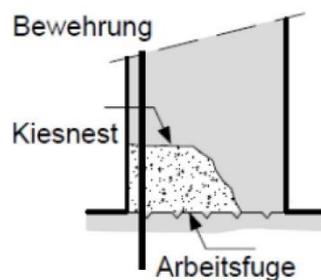


Abb. 50: Skizzenhafte Darstellung eines Kiesnestes (ASTRA 2012)



Abb. 51: Beispiel eines eingebauten Kiesnestes (Holcim, 2011)

5.3.7 Versätze bei Stahlbetonbauteilen

Stützbauwerke und wandartige Konstruktionen werden üblicherweise in Längsrichtung durch Betonierabschnitte oder den Einbau von Dehnfugen begrenzt. Abgesehen von der Bauungenaugkeit bei der Herstellung von Stützbauwerken, hat dies zur Folge, dass bei ungleichmäßiger Belastung (z.B. Beanspruchung aus Erddruck) oder durch ungleichmäßige Widerstände im Untergrund unterschiedlichen Verformungen entstehen. Diese auftretenden Deformationen, welche in Größe unterschiedlich zueinander sind, können als sogenannte „Versätze“ eines Bauwerksabschnittes bezeichnet werden. Es kann zum einen ein über die Wandhöhe konstant verlaufender Versatz (translatorische Verschiebung) auftreten, und sich zum anderen infolge einer Rotation auch ein ungleichmäßiger Versatz ausbilden, welcher in Abb. 52 dargestellt ist.

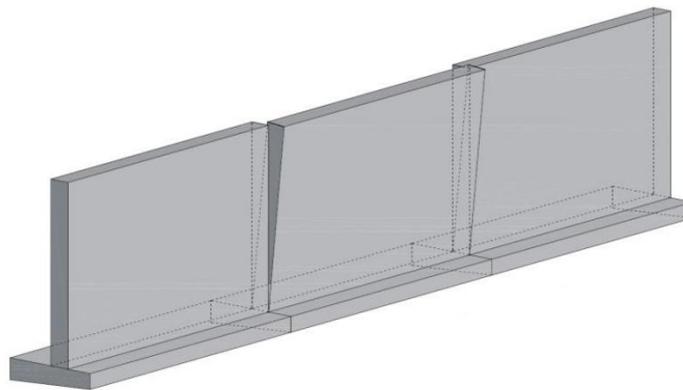


Abb. 52: Skizzenhafte Darstellung einer ungleichmäßigen, Relativverformung von Betonierabschnitten (ETH Zürich, 2017)

Zusätzliche Risse in der Nähe von Bauteilfugen lassen darauf schließen, dass Verformungen infolge unterschiedlicher Bauwerkswiderständen und/oder Belastungen, stattgefunden haben. In Abb. 53 ist ein gleichmäßiger Versatz über die Höhe, einer bestehenden Stützmauer, dargestellt.



Abb. 53: Beispiel eines Versatzes an einer bestehenden Stützmauer

6 Korrosionsschäden an Winkelstützmauern

Eine der maßgeblichen Ursachen für Schäden an Stahlbetonbauwerken stellt die Korrosion der Bewehrung dar. Diese baupraktisch relevanten Korrosionsvorgänge sind vor allem elektrochemische Prozesse, bei denen sich sogenannte Kathoden und Anoden ausbilden. Im Stahlbetonbau treten meist zwei Arten von Korrosion bzw. Ursachen ein:

- örtliche Korrosion bei der Einwirkung von Chloriden
- Korrosion infolge der „Depassivierung“ des Stahls

Über die unterschiedlichen chemischen- und mechanischen Belastungen, und vorherrschenden Randbedingungen, welchen Bauwerke ausgesetzt sein können, wird in den nachfolgenden Kapiteln ein Überblick gegeben.

6.1 Allgemeines über Korrosion

Unter Korrosion versteht man einen Vorgang der an Werkstoffen zu einer messbaren Eigenschaftsänderung führt. Als Korrosion wird eine chemisch-physikalische Reaktion eines metallischen Stoffes mit dessen Umgebung bezeichnet. Die Funktion des metallischen Bauteils oder des zugehörigen Systems, kann durch Korrosion beeinträchtigt werden und bis hin zu einer nachhaltigen Schädigung und Beeinträchtigung führen. Die Reaktion des Metalls mit dem in der Umgebung enthaltenen Angriffsmittel (Gase, Säuren, Laugen), führt zu folgenden Auswirkungen: (Weißbach, 2010)

- Die sich bildenden Korrosionsprodukte (z.B. Rost) können löslich, locker oder fest haftend sein.
- Der auftretende Werkstoffabtrag führt zur Schwächung der Querschnitte und neben einer Zunahme der örtlichen Spannungen stellen sich Dehnungen ein. Diese treten zunächst elastisch auf, und werden bei weiteren Belastung bzw. Querschnittsminderung des Werkstoffs plastisch.
- Eine Volumenvergrößerung infolge der Korrosionsprodukte kann eine Blockierung beweglicher Teile oder eine Sprengwirkung in kleinen Spalten des Materials hervorrufen.
- Bei dynamisch belasteten Bauteilen ist mit einer Verminderung der Dauerhaftigkeit (Kerbwirkung, Schwingungskorrosion) zu rechnen. Durch die Verletzung der Oberfläche können auch optische und dekorative Mängel (Rostflecken etc.) auftreten.

Zur Betrachtung der chemischen und physikalischen Reaktionen ist ein geeignetes Denkmodell zweckmäßig. Der (metallische) Werkstoff und das Medium (Umgebung) wird als System bzw. Einheit gesehen. Dadurch können Einflussgrößen der Korrosion in solche eingeteilt werden, welche das gesamte System (Temperatur, Druck, Potenzial, Zeit) betreffen und in Einflussgrößen die überwiegend werkstoffbezogen (Korngrenzen, Risse, Werkstoffeigenschaften) sind. Abb. 54 zeigt typische Einflussgrößen des Werkstoffs. (Tostmann, 2001)

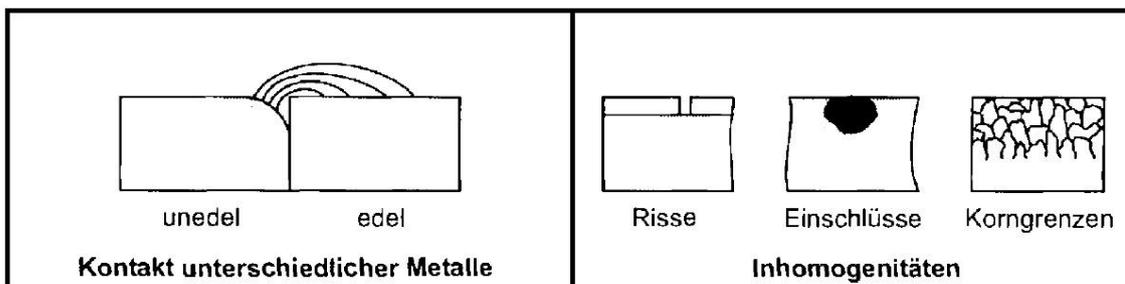


Abb. 54: Einflüsse auf die Korrosion – Einflussgrößen seitens des Werkstoffs (Tostmann, 2001)

Einflüsse welche das Medium betreffen (Konzentration, pH-Wert, Feuchtigkeit, Strömungen) sind in Abb. 55 abgebildet. Im Gegensatz zu den Einflussgrößen des Mediums oder der Umgebung, können jene des Werkstoffs in der Regel besser definiert und eingegrenzt werden, da Werkstoffkennwerte und Erfahrungswerte oft bekannt sind.

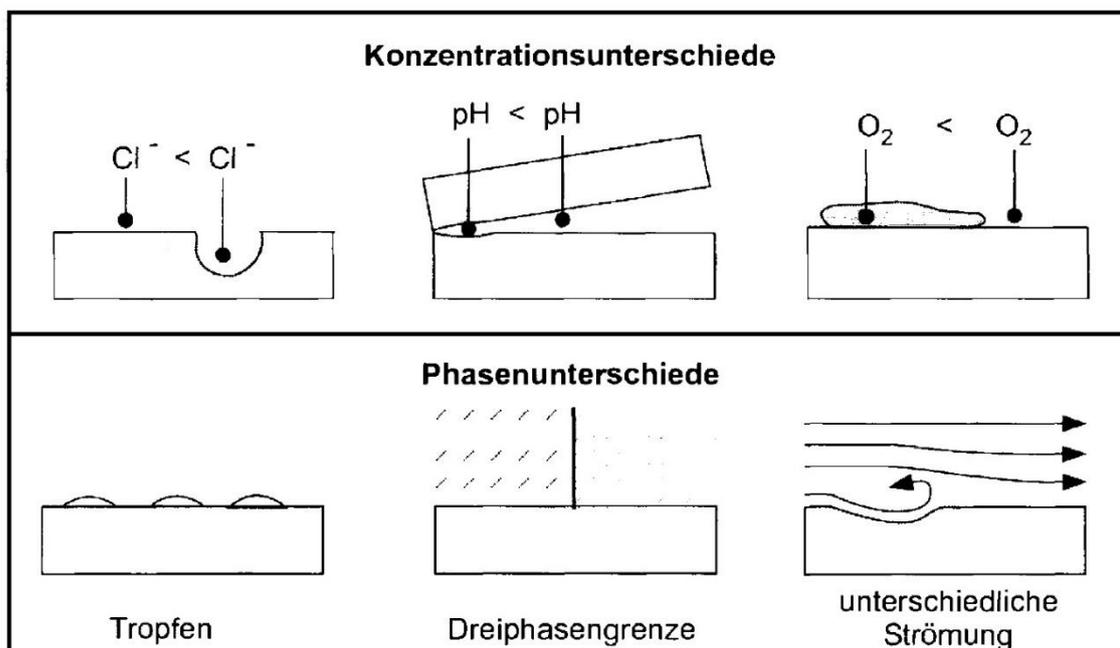


Abb. 55: Einflüsse auf die Korrosion – Einflussgrößen seitens des Mediums (Tostmann, 2001)

Die chemisch-physikalischen Reaktionen können in drei wesentliche Gruppen gegliedert werden (korrosionsauslösende Ursachen):

- Chemische Reaktion
- Metallphysikalische Reaktion
- Elektrochemische Reaktion

Wie eingangs bereits erwähnt, tritt Korrosion am häufigsten in Folge eines elektrochemischen Vorgangs auf. Dies wird in Kapitel 6.4 genauer beschrieben. Die chemischen und metallphysikalischen Vorgänge werden hingegen nur kurz zusammengefasst und erläutert.

6.1.1 Chemische Reaktion

Hierunter versteht man einen rein chemischen Ablauf. Dieser findet vor allem zwischen Metall und heißen Gasen statt (Hochtemperatur- und Heißgaskorrosion). Die chemische Reaktion, welche in der Regel den Korrosionsschaden verursacht, ist eine starke Oxidation. Es findet im Gegensatz zur elektrochemischen Korrosion kein Elektronenfluss statt, da der metallische Werkstoff und das auftretende Gas direkt Elektronen austauschen. Die dabei am häufigsten vorkommenden Korrosionsmittel sind trockene Gase, Säuren, Laugen und ganz besonders Sauerstoff. Sauerstoff ist im Speziellen die Hauptursache für Korrosion durch Oxidationsvorgänge.

Die durch Oxidation entstehenden Korrosionsschäden werden Verzunderung genannt. Dies beschreibt die Bildung von dickeren porösen oder sich ablösenden Schichten an metallischen Bauteilen, wie z.B. Gasturbinenschaufeln, Ofenanlagen und Wärmetauschern. Durch Verbrennungsgase und Stoffen aus der Umgebungs- oder Ansaugluft können sich derartige Oxidschichten, wie in Abb. 56 dargestellt, bilden.

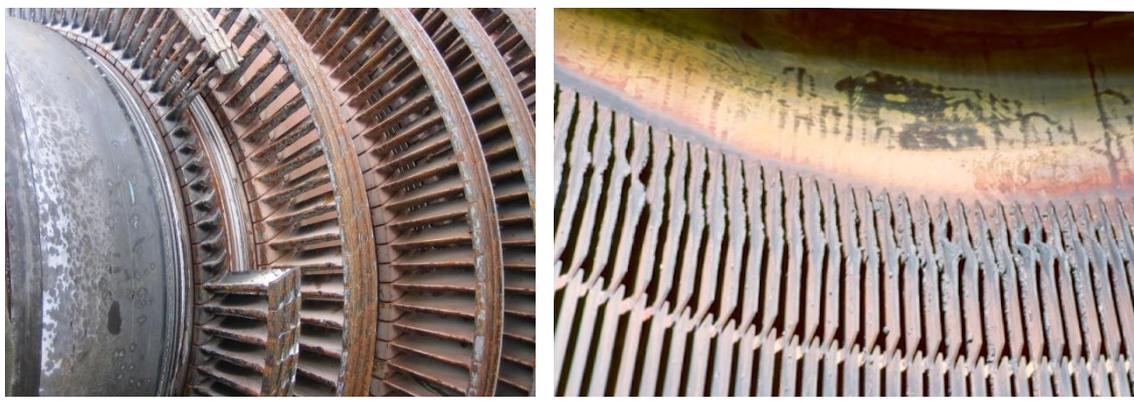


Abb. 56: Links: Hochtemperaturkorrosion einer Gasturbine; Rechts: Heißgaskorrosion bei einem Heizkessel (TH Köln, 2016)

6.1.2 Metallphysikalische Reaktion

Bei der metallphysikalischen Reaktion spielen ausschließlich physikalische Phänomene und keine chemischen Reaktionen die entscheidende Rolle. Diese Art von Korrosion ist im Vergleich zur chemischen und elektrochemischen Korrosion, eine eher selten auftretende Korrosionsform. Als Korrosionsmittel kommen hier absorbierbare Gase (Wasserstoff) oder metallische Schmelzen (bei der Werkstoffherstellung) in Frage. Diese sind in Abb. 57 dargestellt.

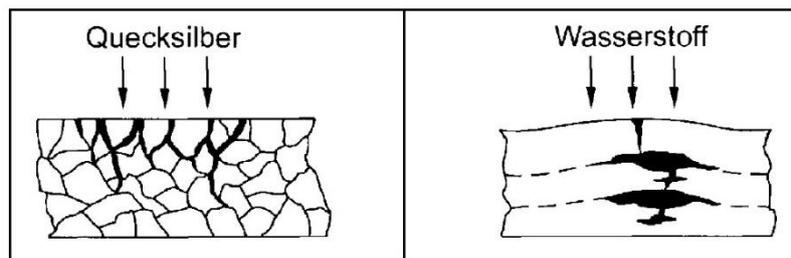


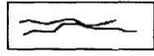
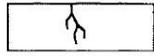
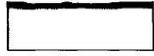
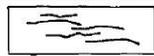
Abb. 57: Metallphysikalische Korrosion durch Metalle und Wasserstoff (Tostmann, 2001)

Im Konkreten versteht man unter dem metallischen Schmelzen das Eindiffundieren von Metallen in die Korngrenzen bei Kontakt mit flüssigen oder leicht diffundierbaren Metallen (z.B. Quecksilber). Auch Gase können vom Metall absorbiert werden und so ist es möglich, dass z.B. Wasserstoff in einen metallischen Werkstoff (Schraubverbindungen, Spannstähle, Litzendrähte, etc.) eindringt und es in weiterer Folge zu einer **Wasserstoffversprödung** kommt. Der Wasserstoff diffundiert im Metall zu Bereichen größter Löslichkeit und kann an mechanisch unbelasteten, oder ggf. bei unter Zug stehenden Bauteilen, Schäden auslösen. Der Übergang von der Metalloberfläche in das Metallgitter wird im Wesentlichen von der Oberflächenbeschaffenheit, einer etwaigen Vorschädigung und der Art der mechanischen Belastung beeinflusst. Diese Vorgänge werden auch bei Normaltemperatur verursacht. (Tostmann, 2001)

Die Absorption von Wasserstoff und die sogenannte wasserstoffinduzierte Rissbildung gehören grundsätzlich zur metallphysikalischen Korrosion, jedoch kann Wasserstoff auch in unterschiedlichen Medien, enthalten sein. Das heißt Metalle können mit Medien – welche Wasserstoff in Form von Protonen, Atomen oder in gasförmigen Molekülen unter Druck enthalten – in verschiedener Weise reagieren und eine Werkstoffschädigung hervorrufen. Die dadurch entstehenden Korrosionsschäden können sowohl an der Oberfläche, als auch im Werkstoffinneren auftreten.

In Tabelle 3 sind die unterschiedlichen Ursachen, Mechanismen und Schäden durch Wasserstoff verursachte Korrosion enthalten. Weiters ist hier eine Unterteilung in chemische und metallphysikalische und die Adsorption durch Gase oder elektrochemischen Reaktion abgebildet. (Tostmann, 2001)

Tabelle 3: Übersicht - wasserstoffinduzierte Korrosion (Tostmann, 2001)

Reaktionen bei wasserstoffinduzierter Korrosion				
Wasserstoffquelle		Aus Gasphasen als H_2 (p_{H_2})	Elektrolytische Reaktion: $2 H^+ + 2e^- = 2 H_{ad}$	
Bedingungen für Absorption		Drücke >700 bar Kerben kritische Dehnung	$R_m > 1200 \text{ N/mm}^2$ Kerben kritische Dehnung Promotoren H_2S , S, CO, usw.	
Mechanismus	Belastung	Vorgang	Schaden	
Physikalisch	Ohne äußere Spannung	Werkstofftrennungen >200°C	Blasen	
		Beizblasen		
		H-Rißkorrosion (HIC)	innere Längsrisse	
	Mit äußerer Spannung	H-Spannungsrißkorrosion (HSCC)	Risse senkrecht zur Spannung	
Chemisch	Ohne äußere Spannung	äußere Hydridbildung	Abtrag	
		innere Hydridbildung	Risse	
		Druckwasserstoffkorrosion >200°C (Reaktion mit Carbiden)	Risse	

Es sei angemerkt, dass die meisten Korrosionsschäden infolge Wasserstoff, metallphysikalische Vorgänge sind, und der Anteil an wasserstoffinduzierten chemischen und elektrochemischen Reaktionen eher gering ist.

Detaillierte und ausführliche Beschreibungen zu den Kapiteln 6.1.1 und 6.1.2 sind in Korrosion - Helmut Tostmann (2001) zu entnehmen.

6.1.3 Elektrochemische Reaktion

Bei dieser Art der Reaktion sind elektrische Ströme am Korrosionsprozess beteiligt. Diese entstehen, wenn Metalle in Kontakt mit „ionenleitenden Medien“ kommen. Ionenleitende Medien sind unter anderem Elektrolytlösungen, Salzschnmelzen (Natriumchlorid, Natriumcarbonat, Kaliumchlorid) oder durch elektrische Felder ionisierte Luft (Blitze, Lichtbögen etc.). In den meisten Fällen stellt

aber Wasser, welches mit Ionen angereichert ist, das Elektrolyt dar und kann dadurch elektrischen Strom transportieren. Sind in der Umgebung metallische Bauteile vorhanden, so ergibt sich ein sogenanntes galvanisches Element. In diesem Element wird elektrische Energie aus Oxidation eines unedlen Metalls gewonnen. Dabei hat ein Metall das Bestreben, durch die Abgabe von Elektronen in Lösung zu gehen. Das bedeutet, die Atome des unedleren Metalls geben Elektronen ab und gehen als positiv geladene Ionen in Lösung. Das unedle Metall wird bei diesem Vorgang zersetzt und der entstandene Elektronenüberschuss fließt über das Medium zum edleren Metall. Diese elektrochemische Reaktion ist aufgrund der Häufigkeit des Auftretens von metallischen Bauteilen mit Wasser, die häufigste und wichtigste Reaktionsart. (Weißbach 2010)

Die Materialauflösung bzw. die Korrosionsgeschwindigkeit werden durch folgende elektrische Größen bestimmt:

- Potenzial (Potentialunterschied der beteiligten Materialien)
- Stromdichte
- Widerstände

Der Potentialunterschied zwischen verschiedenen Metallen wird in Tabelle 4 als elektrochemische Spannungsreihe dargestellt. Dabei sind die Metalle nach ihrem elektrischen Potential (Ladungsunterschied gegenüber Wasserstoff) geordnet.

Tabelle 4: Galvanische Spannungsreihe (Weibach 2010)

Metall	Standard-potential V	Charakter
Gold, Au	1,42	Edel ↑
Silber, Ag	0,80	
Kupfer, Cu	0,34	
Wasserstoff, H	0	
Blei, Pb	-0,13	↓ Unedel
Zinn, Sn	-0,14	
Eisen, Fe (2 ⁺)	-0,44	
Chrom, Cr (3 ⁺)	-0,74	
Zink, Zn	-0,76	
Aluminium, Al	-1,66	
Magnesium, Mg	-2,38	

6.2 Erscheinungsformen von Korrosion - Korrosionsarten

In ÖN EN ISO 8044 (ÖN EN ISO 8044) werden 37 Arten an Korrosionserscheinungen genannt. In den nachfolgenden Unterkapiteln 6.2.1 bis 6.2.7 werden die relevantesten in der Baupraxis vorkommenden Korrosionsarten beschrieben.

Unter Korrosionserscheinungen versteht man die Veränderung eines Korrosionssystems, welches durch das Entstehen von Korrosionsprodukten (Zunder, Rost) gekennzeichnet ist. Korrosionsprodukte können in fester, flüssiger (eher selten) oder auch gasförmiger Form auftreten.

6.2.1 Gleichmäßige Flächenkorrosion

Bei einer gleichmäßigen Flächenkorrosion wird die gesamte Oberfläche eines Bauteils (z.B. Stahlblech unter Witterungseinfluss) durch Korrosion belastet, wobei die Korrosionsgeschwindigkeit über die Fläche gesehen annähernd gleich wirkt. Es kommt zur Ausbildung von anodischen und kathodischen Bereichen über die gesamte Oberfläche des Metalls, welche sich im ständigen Wechsel der Teilbereiche finden (abhängig von Feuchtigkeits- u. Sauerstoffangebot). Die Abtragungsgeschwindigkeit infolge Witterungseinflüsse ist für die Dimensionierung (Querschnittsdicke) ausschlaggebend. In Abb. 58 ist eine gleichmäßige Flächenkorrosion skizzenhaft dargestellt. (Weißbach, 2010)



Abb. 58: Beispiel einer gleichmäßigen Flächenkorrosion (TH Leipzig, 2010)

Zu der örtlichen Korrosionserscheinung gehören die in den Unterkapitel 6.2.2 bis 6.2.5 beschriebenen Korrosionsarten. Diese beschränken sich auf bestimmte Bereiche eines Bauteils und sind im Gegensatz zur gleichmäßigen Flächenkorrosion als gefährlicher anzusehen, da bei einer Flächenkorrosion die Abtragung zumeist kalkulierbar ist und durch eine geeignete (dickere) Querschnittswahl aufgefangen werden kann.

6.2.2 Lochfraßkorrosion

Lochfraßkorrosion kennzeichnet eine tiefe örtliche Abtragung eines metallischen Werkstoffs. Diese besitzt steile Ränder und kann unter Umständen unterhöhlt sein. Sie tritt an Störstellen an der Metalloberfläche infolge eines inhomogenen Werkstoffs, oder durch eine örtliche Verletzung der Passivschicht auf. Induziert wird die Lochkorrosion durch eine kleine Anodenfläche, welche einer großen Kathode gegenübersteht. Dadurch kann der tiefgehende Materialabtrag sehr schnell von statten gehen. Bei Rohrleitungen und Behälterbauten ist diese Art von Korrosion häufig zu sehen.

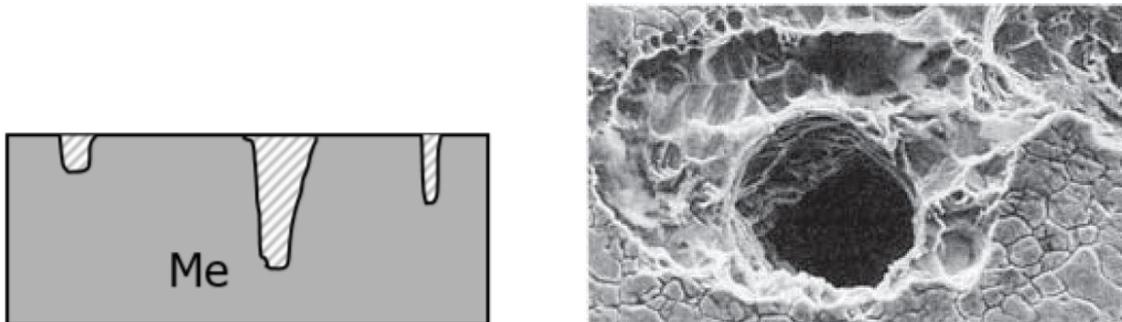


Abb. 59: Beispiel einer Lochfraßkorrosion (TH Leipzig, 2010)

6.2.3 Spaltkorrosion

Darunter werden örtlich verstärkte Korrosionsvorgänge in engen Spalten verstanden. Ursache hierfür können Spalten infolge der Fertigung des Werkstoffes oder konstruktiv bedingt sein. Ähnlich wie Lochfraßkorrosion schreitet der Materialabtrag in der Spaltfläche von innen nach außen fort. Dies kann z.B. bei Überlappungen von Blechen, bei Lochleibungen von Schraubverbindungen oder bei durchgeführten Schweißstümpfen, wie in Abb. 60 skizzenhaft gezeigt, auftreten.

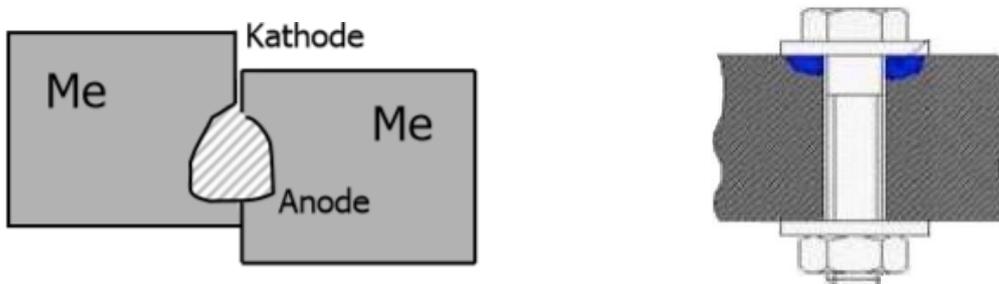


Abb. 60: Skizzenhafte Darstellung einer Spaltkorrosion (TH Leipzig, 2010)

6.2.4 Muldenkorrosion

Die Muldenkorrosion kann als Sonderform der flächigen Korrosionserscheinung angesehen werden. Ist eine gleichmäßige Materialzusammensetzung nicht vorhanden – z.B. durch mechanische Abrasion oder durch eine örtlich verletzte Passivschicht – so kann die Oberfläche des Metalls unregelmäßig, teilweise auch bis in tiefe Lagen, angegriffen werden. Beispiele für Muldenkorrosion sind in Abb. 61 dargestellt.

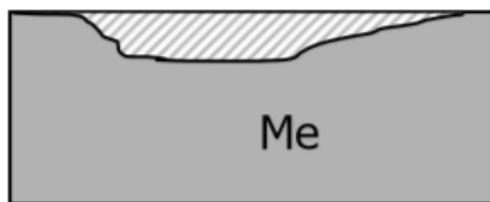


Abb. 61: Beispiel einer Muldenkorrosion (TH Leipzig, 2010)

6.2.5 Bimetall-Korrosion (Kontaktkorrosion)

Diese Korrosionsart tritt auf, wenn Metalle mit unterschiedlichen Potenzialen (siehe galvanische Spannungsreihe, Tabelle 4) elektrisch-leitend in Kontakt stehen und einem Korrosionsmittel als Medium ausgesetzt sind. Das unedlere Metall wird dabei zur Anode und erfährt des Weiteren einen Materialabtrag (siehe Abb. 62).

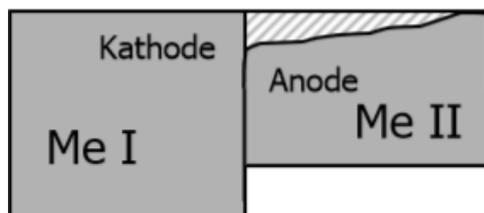


Abb. 62: Beispiel einer Kontaktkorrosion (TH Leipzig, 2010)

Beispielhaft kann sich Kontaktkorrosion zwischen Ankerplatte und Ankerkopf bei verankerten Konstruktionen ausbilden. Wird hier die Ankerkappe z.B. aus (verzinkten) Stahl mittels höherwertigen Edelstahlschrauben an der Ankerplatte befestigt, so führt es durch den oben genannten Potenzialunterschied in weiterer Folge zur Korrosion des unedleren Metalls (Ankerkappe bzw. Ankerplatte).

6.2.6 Spannungsrissskorrosion

Spannungsrissskorrosion tritt auf, wenn ein metallischer Werkstoff oder ein Bauteil statisch vorbelastet ist und ein korrosives Medium einwirkt. Die Belastung kann entweder durch Zugspannungen, welche sich unter dem Plateau der Fließgrenze bewegen (Eigenspannungen z.B. infolge Schweißen) oder bei bestimmten Metall-Medium-Konstellation (kritische Systeme) entstehen. Neben der in Kapitel 6.3 beschriebenen wasserstoffinduzierten Spannungsrissskorrosion, gelten auch Chloride und starke Laugen als Auslöser dieser Art der Korrosion. Nach Ablauf der Inkubationszeit bilden sich zu Beginn mikroskopisch feine Anrisse aus, welche sich später zu sichtbaren Rissen weiterentwickeln. Die entstehenden Risse breiten sich senkrecht zur Richtung der Zugspannungen aus und stellen häufig eine transkristalline Rissbildung dar. Eine interkristalline Rissbildung gilt als eher selten. In Abb. 63 sind diese unterschiedlichen Rissbilder anhand zweier Werkstoffe dargestellt.

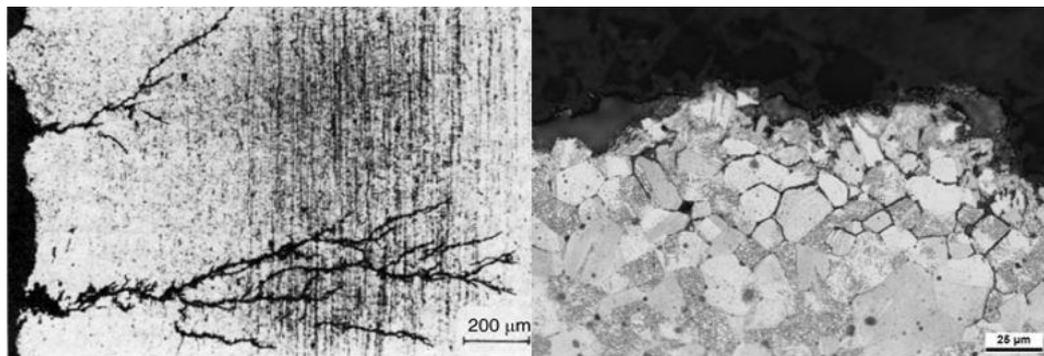


Abb. 63: Links: transkristalline Risse unter Einwirkung chloridhaltiger Lösung; Rechts: interkristalline Rissbildung bei einem Gewindestück aus Messing (Macherauch, 2014)

Spannungsrissskorrosion kann bei weit fortgeschrittenen Rissen – besonders gefährdet sind hier hochfeste Stähle (z.B. Spanndrahtstähle, Schrauben) – zum Bruch des Bauteils führen. Es ist anzumerken, dass bei dieser Art von Korrosion keine sichtbaren Korrosionsprodukte entstehen.

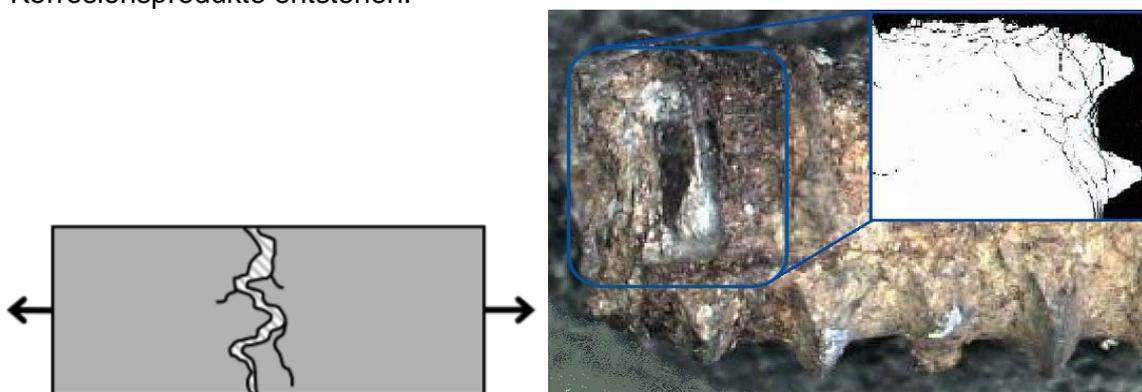


Abb. 64: Links: Skizze Spannungsrissskorrosion (TH Leipzig, 2010); Rechts: Beispiel einer Spannungsrissskorrosion an einem Außengewinde (ThyssenKrupp, 2015)

6.2.7 Erosionskorrosion

Unter der Erosionskorrosion versteht man durch strömende Medien verursachten Materialabtragung an metallischen Werkstoffen. Die Strömungsgeschwindigkeit des korrosiven Mediums ist hier die wesentliche Einflussgröße. Ist das Korrosionsmedium nicht in Bewegung, spricht man von einer sogenannten Stillstandskorrosion und es können Lochfraß- und Spaltkorrosion auftreten (siehe Kapitel 6.5.2 und 6.5.3). Mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit fördert dies jedoch den Korrosionsfortschritt an der betroffenen Oberfläche. Die Abtragungsgeschwindigkeit hängt unter anderem von im Medium mitgeführten Feststoffteilchen ab womit die Abrasionsrate steigt. Diese Erscheinungsform tritt häufig bei Turbinen und Hochwasserrückhaltebauwerken auf.



Abb. 65: Beispiel einer Erosionskorrosion (TH Leipzig, 2010)

Die in Kapitel 6.2 angeführten Erscheinungsformen von Korrosion dienen als Überblick für die im Ingenieurbau häufig auftretenden Korrosionsarten. Zahlreiche weitere Korrosionsformen sind in Korrosion (Tostmann, 2001) angeführt und detailliert beschrieben.

Im anschließenden Kapitel 6.3 wird auf die spezielle Korrosionsproblematik von Winkelstützmauern eingegangen, welche in den vergangenen Jahren zu einer Vertiefung der Untersuchungen und Prüfungen derartiger Bauwerke (auch außerhalb Österreichs) geführt hat.

6.3 Arbeitsfuge Fundament - aufgehender Wandschenkel

Der Zustand älterer Stützbauwerken aus Stahlbeton ist nach einigen Schadenfällen von großem Interesse. Im Rahmen von Untersuchungen an Stützmauern wurde erkannt, dass vor allem bei älteren, bestehenden Winkelstützmauern die innere Standsicherheit (Kapitel 4.2.3), im Übergangsbereich zwischen Fundament und aufgehendem Wandschenkel, als kritisch zu beurteilen ist. Auch im Zuge aktueller Prüfungen wird ein stetiger Anstieg von Korrosionsschäden bei Stützmauern erkennbar. Aufgrund der örtlich hohen Beanspruchung in diesem Bereich der Arbeitsfuge (Betonierfuge), werden klaffende bzw. aufgegangene Fugen befürchtet, welche eine große Gefahr für eine Korrosion der Biegezugbewehrung bedeutet. Abb. 66 zeigt eine skizzenhafte Darstellung dieser Arbeitsfuge.

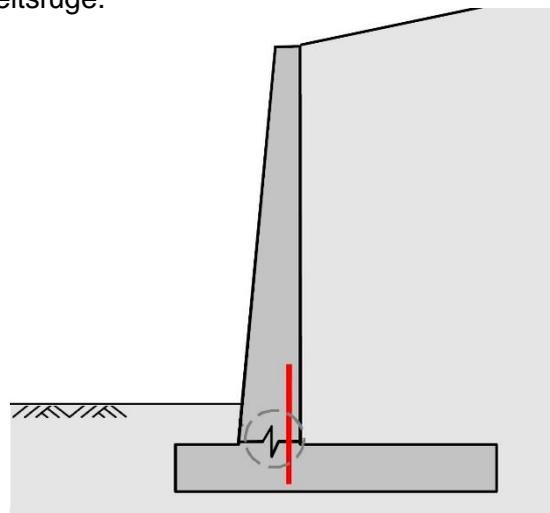


Abb. 66: Skizze Fundament und aufgehender Wandschenkel einer Winkelstützmauer

Die erdseitig eingelegte Bewehrung könnte im dargestellten Anschlussbereich vertikaler Wandschenkel zu Fundament nach mehreren Jahrzehnten Nutzungsdauer, erhebliche Korrosionserscheinungen aufweisen und bei einer zu großen Schädigung der Hauptbewehrung, zu einem nicht erkannten sprödebruchartigen Versagen führen. Als Ursache für Korrosion in diesem Bereich, kann neben einer klaffenden Arbeitsfuge welche sich im Zuge einer Bauwerksverformung ergeben hat, auch eine mangelhafte Betonqualität (Auftreten von Kiesnestern), darstellen. Außerdem ist eine mögliche Kombination mit chloridhaltigen, ggf. auch kupferhaltigen Sickerwässern zu beachten. (Marte et al. 2014)

In Abb. 67 ist ein konkretes Beispiel des kritischen Bereichs der Arbeitsfuge abgebildet. Dieser wurde infolge einer zerstörenden Untersuchung – mittels Hochdruckwasserstrahlen – freigelegt. Es ist ein erheblicher Korrosionsgrad und Querschnittsverlust der Hauptbewehrung zu erkennen.

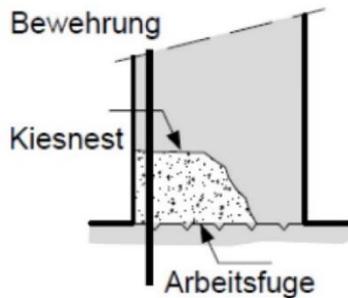


Abb. 67: Links: skizzenhafte Darstellung des problematischen Bereichs Fundament - Wand; Rechts: freigelegte Hauptbewehrung einer Winkelstützmauer (ASTRA, 2014)

Diese destruktiven Untersuchungen in der Schweiz ergaben, dass vor dem Freilegen der Bewehrung (berg- und talseitig) keinerlei oberflächige Anzeichen von Korrosion – etwa Rostfahnen oder Betonabplatzungen – festzustellen waren. Zusätzlich angeordnete Laboruntersuchungen bezüglich chemischer Zusammensetzung des Hangwassers zeigten, dass keine Chlorideinwirkung stattgefunden hat. Infolgedessen kann bei einer zu geringen Betonüberdeckung oder porösen Betonzusammensetzung am Fußpunkt, von der Gefahr einer punktuellen Korrosion ausgegangen werden (TEC21, 2016). Die Ursachen für eine mangelhafte Betonqualität in diesem Bereich sind in Kapitel 5.6.3 beschrieben.

In Abb. 68 sind weitere Beispiele einer korrosionsgeschädigten Biegezugbewehrung bei Winkelstützmauern ersichtlich



Abb. 68: Korrosionsgeschädigte Biegezugbewehrung einer Winkelstützmauer (Geotechnik Schweiz, 2017)

Dadurch, dass bei einer Winkelstützmauer ein Kragarm als statisches System vorliegt, sind an dieser Stelle die maximal auftretenden Biege- und Schubbeanspruchungen zu erwarten. Bei Korrosion der Biegezugbewehrung im Anschluss Fundamentplatte –

aufgehender Wandschenkel, weist diese Schädigung im Stützbauwerk ein erhebliches Risiko für die Tragfähigkeit auf. Zudem verhindern die in Längsachse angeordneten Dehnungsfugen, – bei fehlender Querkraftverdübelung der einzelnen Mauerblöcke und reduzierten Tragfähigkeit infolge Korrosion – dass Kräfte umgelagert werden können. Die Anteile der daraus auftretenden Verschiebungen, lassen sich durch das anormale Verhalten der Stützmauer von außen nur schwer erkennen.

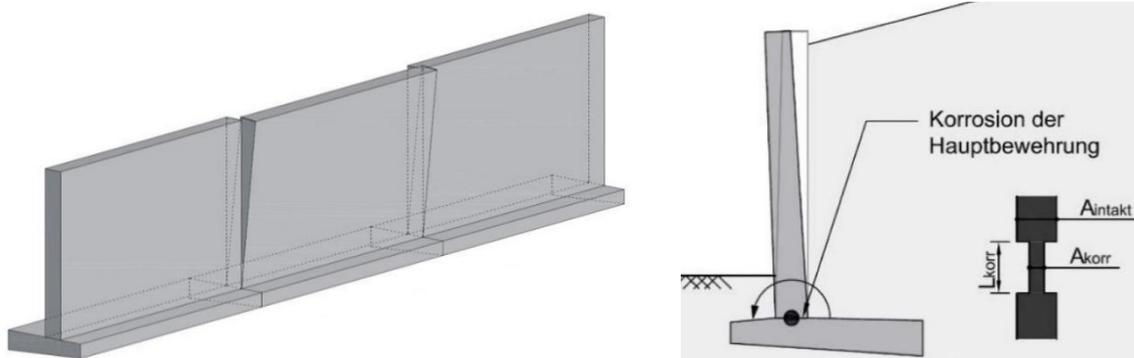


Abb. 69: Links: Systemverhalten in Längsrichtung; Rechts: Modellvorstellung des Rotationsgelenks infolge Bewehrungskorrosion (Geotechnik Schweiz, 2017)

Nachfolgend soll eine Grenzzustandsbetrachtung zwischen der inneren und äußeren Tragfähigkeit von korrosionsgeschädigten Winkelstützmauern reflektiert und der Verformungsmechanismus beschrieben werden.

Infolge eines Biegezugbruchs - in dem durch Korrosion geschwächten Bereich zwischen Fundament und aufgehenden Wandschenkel - verrichtet die Wand eine Rotation bezüglich eines Punkts in der Arbeitsfuge (Modellvorstellung). Liegt eine noch ausreichende Rotationskapazität des Stahlbetonbauwerks vor, kann auch der „äußere“ Grenzzustand (Standicherheit des Bodens) hinter der Winkelstützmauer erreicht werden. Hat sich unterdies eine lokale Korrosion der Biegezugbewehrung über die Zeit ergeben und somit eine Querschnittsschwächung der Bewehrung einstellen können, wird die plastische Rotationskapazität stark reduziert und ein Bruch der Bewehrung kann bei einer viel geringeren Deformation erfolgen. Infolgedessen ist es für die Beurteilung von bestehenden Winkelstützmauern sehr wichtig, die Kenntnis über die deformationsabhängige Entwicklung des Erddrucks, sowie der korrosionsbedingten Abnahme der Rotationskapazität zu besitzen. (Mitteilungen - Geotechnik Schweiz, 2017)

Der Bruchmechanismus wird durch den Querschnittsabtrag der Biegezugbewehrung infolge Korrosion ausgelöst. Durch die Abnahme der Bewehrungsfläche nehmen die Stahlspannungen in der verbleibenden Fläche zu, was wiederum zu größeren Stahldehnungen im Korrosionsgelenk führt. Durch diese Zunahme der Stahldehnung ändert sich die Dehnungsebene und mit ihr die Krümmung des Betonquerschnitts, welche eine luftseitige Verkipfung des aufgehenden Wandschenkels herbeiführt.

7 Versuchsstand SIBS V2 in Graz Raaba

Im Zuge des Forschungsprojektes SIBS – Sicherheitsbewertung bestehender Stützbauwerke – wurden neben der Erfassung der Schäden an Bauwerken, ebenfalls vertiefte Untersuchungen zu Korrosionsschäden an Winkelstützmauern durchgeführt. Ein zu diesem Forschungsprojekt gehörender Versuchsstand SIBS_V2 soll nachträglich kurz beschrieben werden.

Auf den Erkenntnissen des Forschungsprojektes SIBS basierend, wurde ein parametrisiertes Finite-Elemente-Modell einer Winkelstützmauer erstellt. Es wurde ein nichtlineares Werkstoffmodell des Betons herangezogen und eine individuelle Modellierung der Bewehrungsstäbe vorgenommen. Im Vorfeld der Versuchsplanung wurden fünf Prüfkörper – mit identischen geometrischen Abmessungen, jedoch unterschiedlichen Hauptbewehrungsgehalten und verschiedenen Schädigungsraten eruiert. (Vöbu-Forum, 2017)

Einen Überblick über die Versuchsanordnung und das FE-Modell eines Prüfkörpers gibt die nachfolgende Abbildung. Dabei ist links der gesamte Prüfkörper mit vormontierter Lasteinleitungseinheit und rechts ein Detailausschnitt der belasteten Prüfwand mit der dargestellten Rissbildung zu erkennen.

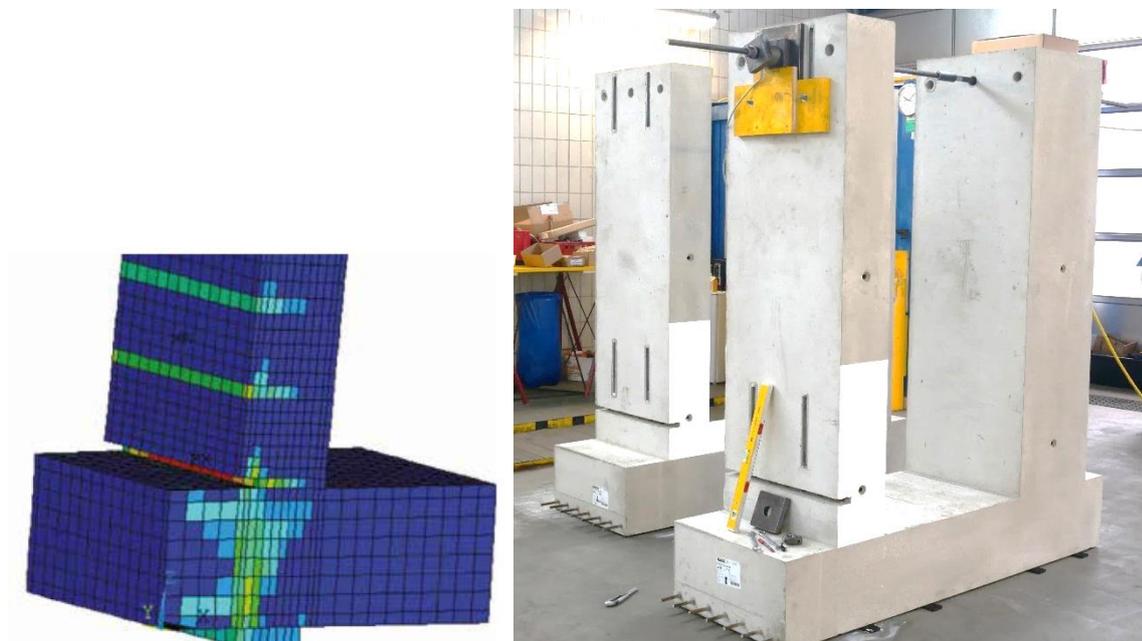


Abb. 70: Modellierung des Versuchsstands zu korrosionsgeschädigten Winkelstützmauern

Die Validierung der aus den numerischen Berechnungen erhaltenen Ergebnisse wurde durch die Umsetzung des Versuchstandes (SIBS_V2) im November und Dezember 2017, realisiert. Das Hauptaugenmerk lag dabei darauf, das Bauwerksverhalten und „Ankündigungspotenzial“ korrosionsgeschädigter Winkelstützmauern zu untersuchen und die Ergebnisse jenen der FE-Berechnungen gegenüberzustellen. Neben der Versuchsdurchführung ergab sich zudem die Möglichkeit, die Anwendung und Positionierung eines neuen Messtechniklayouts und Monitoringkonzepts (siehe Kapitel 7.5.2) für derart geschädigte Bauwerke einer praktischen Anwendung zu unterziehen. Die hierfür zum Einsatz gekommenen Messsysteme sind in Kapitel 7.3 beschrieben.

In den nachfolgenden Abschnitten dieses Kapitels wird der Versuch – von der Planung bis zur Auswertung der Ergebnisse – vorgestellt und beschrieben.

7.1 Planung des Versuchs

Die Erstellung des FE-Modells und die numerischen Berechnungen im Vorfeld, welche eingangs bereits erwähnt wurden, dienten darüber hinaus zur Dimensionierung und Definition der Versuchsparameter der Prüfkörper. Im Zuge dessen konnten so die geometrischen Abmessungen, Betongüte, Bewehrungsgehalt, Definition des Kraftbereichs und der Schadstellen, sowie den Eintrag der Schädigung festgelegt werden. Insgesamt wurden fünf Prüfkörper mit einer Länge von 2,00 m, einer Tiefe von 0,65 m und einer Gesamthöhe von 2,35 m hergestellt (siehe auch Tabelle 5). Das Versuchsschema und die Geometrie eines Prüfkörpers sind in der nächsten Abbildung dargestellt.

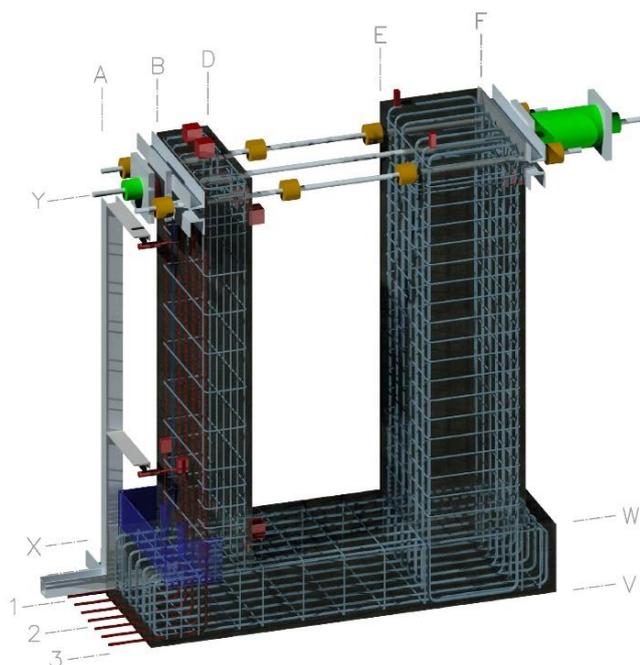


Abb. 71 Übersicht und Geometrie eines Prüfkörpers

Tabelle 5: Eigenschaften Prüfkörper

Beton C30/37	Größe	[]
Querschnittsfläche	2,20	m ²
Volumen	1,43	m ³
Gewicht	3,58	to

Im Wesentlichen setzt sich ein Versuchskörper aus zwei vertikalen Wandschenkeln, bestehend aus der „Prüfwand“ und einer „Widerlagerwand“ und dem Fundament zusammen. Die Prüfwand (Achse B – D) stellt die durch Korrosion geschädigten vertikalen Wand einer Winkelstützmauer dar. Die gegenüberliegende Widerlagerwand (Achse E – F) dient als Widerlager für die Lastaufbringung und ist aus Verformungsgründen in Bezug auf die Prüfwand wesentlich steifer ausgeführt. Das Fundament (Achse V – W) bildet die biegesteife Verbindung der beiden vertikalen Wände. Die Belastung des zu prüfenden Wandschenkels findet auf Höhe der Achse Y statt. Diese wird durch eine hydraulisch betriebene Hohlkolbenpresse, welche mit einem Zugstab entlang der Achse Y verbunden ist, aufgebracht. Um infolge der punktuellen Einleitung in Achse Y/2 eine möglichst gleichmäßige Lastausbreitung im Querschnitt sicherzustellen, sind in den Achsen B und F lastverteilende Verankerungsplatten angeordnet. In der Achse der Belastungseinrichtung befindet sich zudem – für den Fall einer Verkipfung oder eines Versagens der Prüfwand – eine Sicherung mittels Gewindestangen (GR26).

Eine schematische Darstellung des Regelquerschnitts eines Prüfkörpers wird auf der nachfolgenden Seite, in Abb. 72 gezeigt.

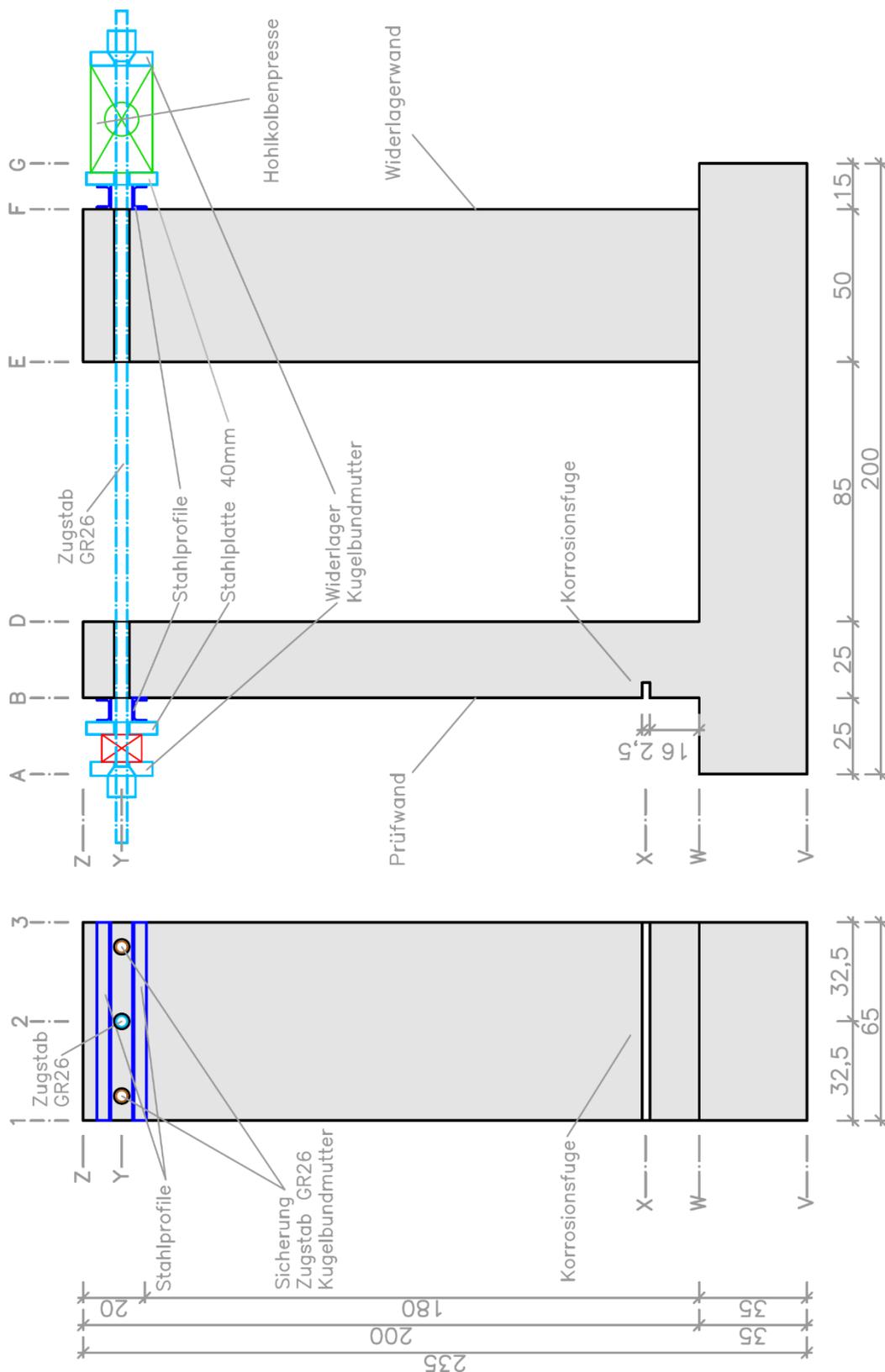


Abb. 72: Schema eines Prüfkörpers; Schnitt und Ansicht

Die Schädigung des Bauteils bzw. der Bewehrung wird durch elektrochemische Korrosion in der Achse X herbeigeführt. Die hierfür benötigte Fuge ist bei der Herstellung der Versuchskörper durch ein aus XPS bestehendes Abschaltungselement erzeugt worden. Diese „Schädigungsfuge“ (Höhe 2,50 cm) wurde in einem Abstand von 0,16 m oberhalb der Fundamentoberkante angeordnet und verläuft über die gesamte Querschnittstiefe. Eine detaillierte Beschreibung hierzu ist im Kapitel 7.1.2 zu finden. Die am Prüfkörper verwendeten Messsysteme und installierten Sensoren werden in Kapitel 7.3 näher beschrieben.

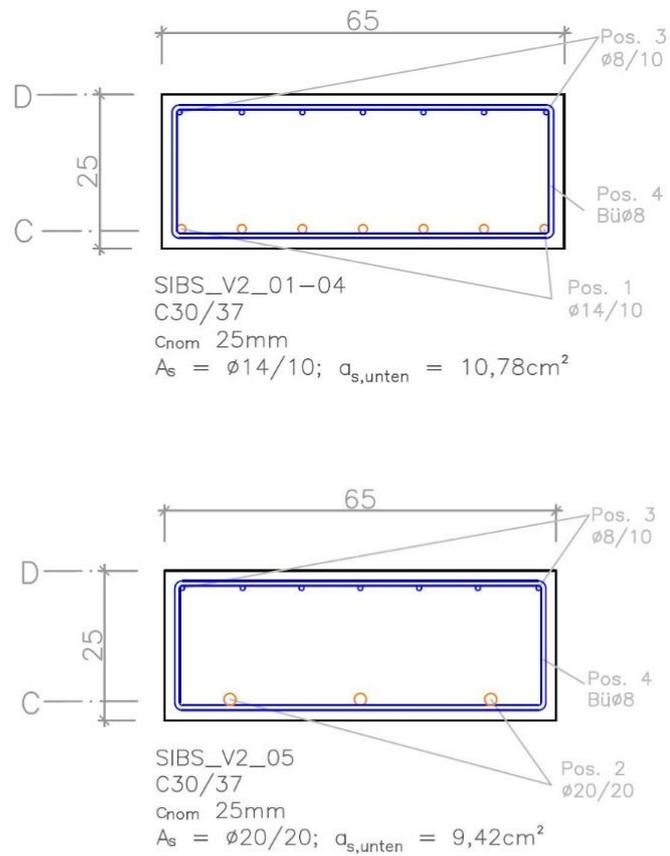
7.1.1 Bewehrungsführung Versuchskörper

Wie eingangs bereits beschrieben, stehen für den Versuchsstand insgesamt fünf dieser Versuchskörper zur Verfügung. Diese besitzen idente geometrische Abmessungen, weisen jedoch zwei unterschiedliche Hauptbewehrungsmengen im Querschnitt der Prüfwand auf. Des Weiteren kommen im gesamten Prüfkörper unterschiedliche Sorten an Bewehrungsstahl zum Einsatz. Einerseits wird ein herkömmlicher BSt 550 verwendet (orange dargestellt) – welcher in der Prüfwand vorhanden ist und als zu korrodierende Biegezug-Bewehrung fungiert – und andererseits Edelstahlbewehrung nach EN1537 (in blau), welche im Fundament und in beiden Wandschenkeln angeordnet ist. Die Ausführung der übrigen Bauteile in Edelstahl ist darin begründet, etwaige Streueinflüsse im Zuge der elektrochemischen Korrosion zu unterbinden und um sicherzustellen, dass die Korrosion nur an den zu korrodierenden Bewehrungseisen bzw. vorwiegend im Bereich der vorgefertigten Fuge stattfindet bzw. es nur dort zu einer Schädigung durch Querschnittsabtrag kommt (siehe Abb.74 Abb. 75).

Die Aufteilung der Versuchskörper hinsichtlich Hauptbewehrungsmenge wurde wie folgt gewählt:

- vier Stück Versuchskörper mit $7\text{Ø}14$ ($A_{s,\text{vorh}}=10,78 \text{ cm}^2$)
- ein Stück Versuchskörper mit $3\text{Ø}20$ ($A_{s,\text{vorh}}=9,42 \text{ cm}^2$)

In Abb. 73 sind diese beiden Bewehrungskonfigurationen dargestellt, wobei die Bewehrung aus BSt 500 in Orange abgebildet ist und die Edelstahlbewehrung nach EN1537 in Blau gehalten ist.


 Abb. 73: Bewehrungskonfigurationen Prüfwand (Schnitt A-A); Links: 4 x $\varnothing 14$; Rechts: 1 x $\varnothing 20$

In den nachfolgenden Abbildungen ist weiters die schematische Bewehrungsführung im Versuchskörper (orange - BSt 500; blau - Edelstahl) dargestellt

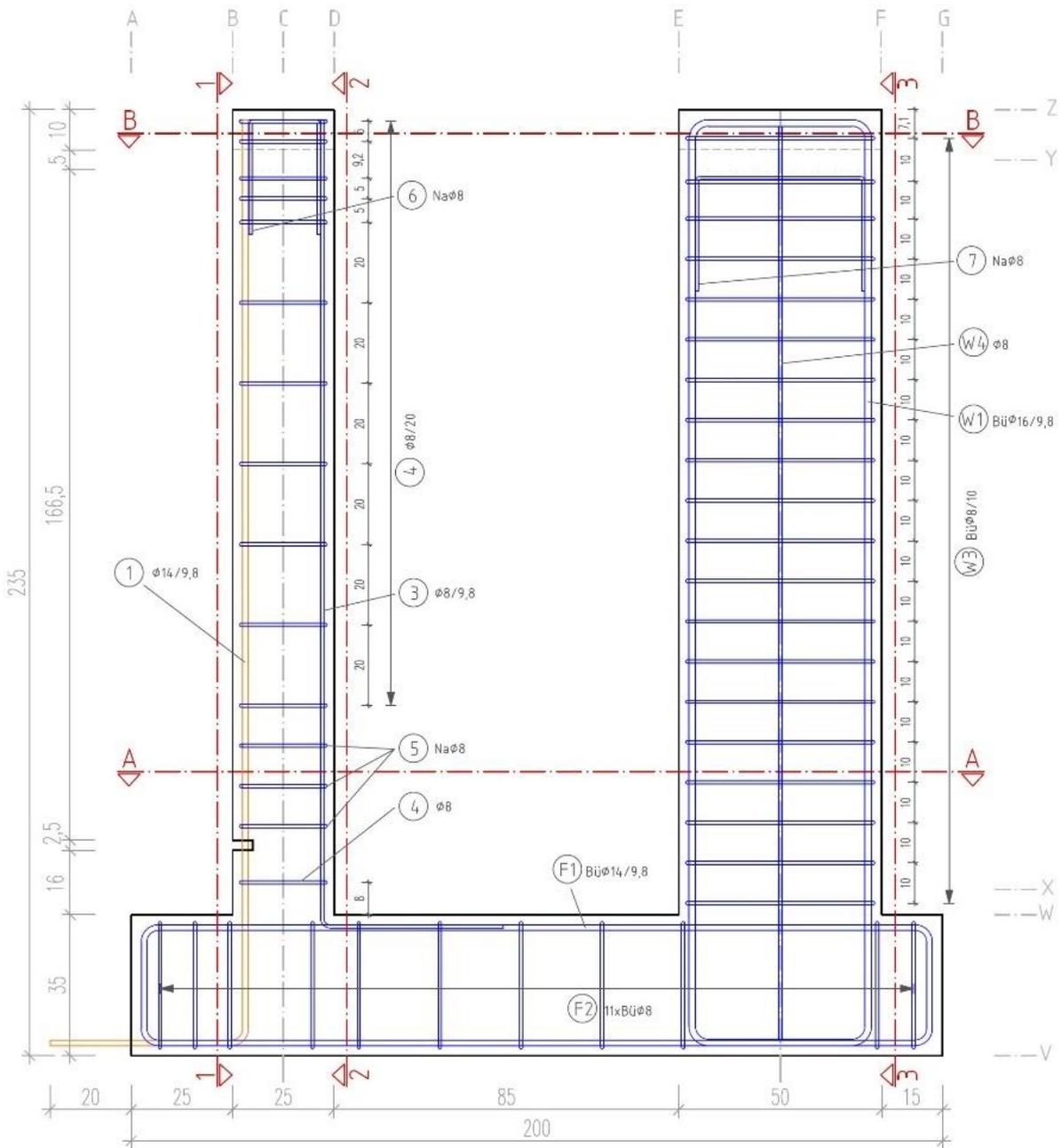


Abb. 74: Darstellung der Bewehrungsführung - Längsschnitt Achse 2

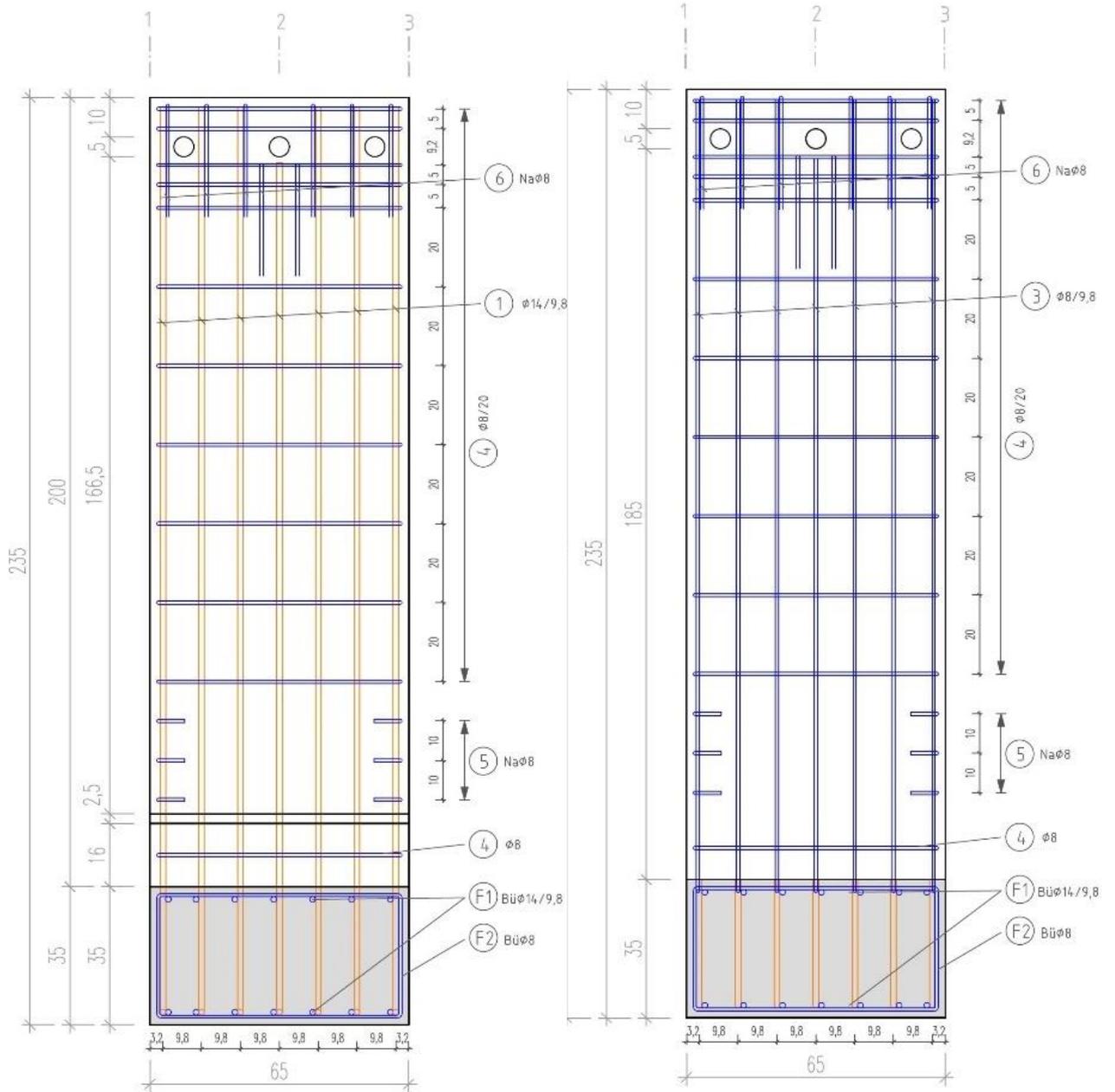


Abb. 75: Darstellung der Bewehrungsführung; Links: Schnitt 1-1; Rechts: Schnitt 2-2

7.1.2 Anordnung der Korrosionsfuge und Detail Korrosionswanne

Die Simulation der Bewehrungskorrosion bzw. die Schädigung der Prüfwand wird mithilfe elektrochemischer Korrosion (siehe Kapitel 6.1.3) in Achse X durchgeführt. Diese liegt ausgehend von der Fundamentoberkante in einem vertikalen Abstand von 16 cm, besitzt eine Tiefe von 5 cm, eine Höhe von 2,5 cm und verläuft über die gesamte Querschnittsbreite des Prüfkörpers von 65 cm. Diese stellt den für die Prüfwand künstlich simulierten Riss dar und ermöglicht die geplante Schädigung der dort freiliegenden Bewehrung. Bauwerkseitig wird der elektrochemische Korrosionsvorgang durch eine an den Prüfkörper passgenau angebrachte „Korrosionswanne“ herbeigeführt. Sie beinhaltet das Elektrolyt in Form einer Natriumchloridlösung (Salzwasser als Medium), welches den Untersuchungsbereich bzw. die freiliegende Bewehrung umhüllt. Die Bewehrung wird bei der elektrochemischen Korrosion zu einer sogenannten „Opferanode“ umgewandelt. Als Kathode fungiert ein Kupferblech, welches beweglich im Korrosionsbecken montiert wurde. Durch das Elektrolyt wird nun sichergestellt, dass die Kathode mit der Anode in Kontakt steht und somit ein Elektronenfluss – und daraus folgend Korrosion – stattfinden kann. In der nachfolgenden Abbildung ist die Detailausführung und Anordnung der „Korrosionswanne“, welche für die elektrochemische Korrosion zwingend erforderlich ist, abgebildet.

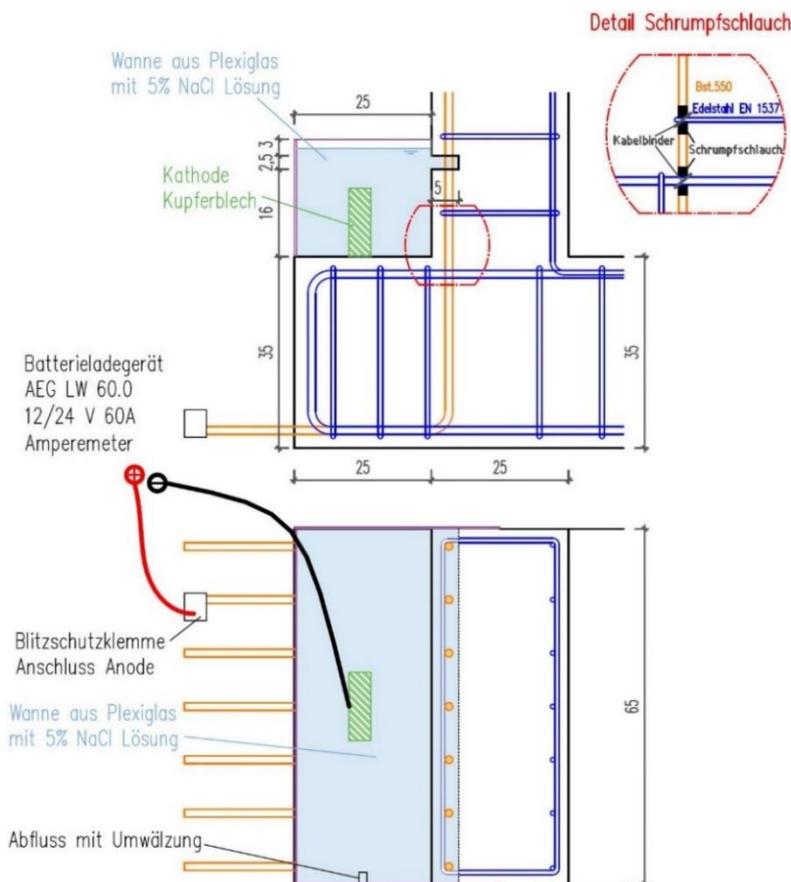


Abb. 76: Schematische Darstellung der Korrosionswanne und Detail Schumpfschlauch

Zusätzlich zur Ausführung der Bewehrung der Bauteile in Edelstahl, um mögliche Streueinflüsse infolge der elektrischen Leitfähigkeit der Bewehrung zu vermeiden, sind an den Kontaktflächen bzw. Verbindungspunkten zwischen der freiliegenden Bewehrung und der Edelstahlbewehrung, Schrumpfschläuche (Abb.76 rechts oben) angebracht worden. Dies wurde im Zuge der Herstellung der Bewehrungskörbe durchgeführt.

7.2 Vorversuche

Mit Vorversuchen, welche im Speziellen die Simulation der Korrosion betreffen, sollte aufgezeigt werden, dass die Möglichkeit besteht, Bewehrungselemente in einer gewissen Zeit künstlich korrodieren zu lassen und somit „kontrolliert“ zu schädigen. Zudem dienten die in den Vorversuchen gewonnenen Erkenntnisse der Planung der oben beschriebenen Korrosionswanne samt ihrer Einbauten. Des Weiteren liegt den Vorversuchen derselbe elektrochemische Korrosionsvorgang zu Grunde, welcher für die Versuchsdurchführung erprobt wurde.

Nachfolgend werden die Erkenntnisse aus den Vorversuchen zusammengefasst und kurz beschrieben. Es wurden grundsätzlich zwei unterschiedliche Arten an Vorversuchen zur Korrosion durchgeführt.

7.2.1 Korrosion am nackten Bewehrungsstab

Bei diesen Vorversuchen wurde mit unterschiedlichen Aufbauten und Halterungen für Kathode und Anode, die Korrosion an einzelnen Bewehrungsstäben simuliert. Folgende Erkenntnisse konnten bei der Durchführung dieser Vorversuche festgestellt werden:

- Korrosion bzw. ein Querschnittsabtrag findet nur an denjenigen metallischen Bauteilen statt, an denen ein Spannungsunterschied angebracht wird. Andere im Elektrolyt vorhandene Bauteile werden davon nicht in Mitleidenschaft gezogen – oder erfahren aufgrund des geringen Spannungsunterschiedes ausschließlich geringe Abstraten;
- Der Abstand zwischen Bewehrungseisen (Anode) und der Kathode aus Kupfer hat einen Einfluss auf die Korrosionsgeschwindigkeit;
- Der Gehalt bzw. die Konzentration des Korrosionsmediums, welches in allen Versuchsanordnungen ein Elektrolyt aus NaCl (3% - 5%) darstellt, hat bei großen Spannungsunterschieden keinen Einfluss auf die Korrosion;
- Die Abrostrate des zu korrodierenden Bewehrungsstabes hängt von der mit Elektrolyt umgebenden Fläche ab;

Einen Überblick über die verwendeten Bauteile und Materialien zur Durchführung eines derartigen Vorversuchs ist in Abb. 77 dargestellt. Der Fortschritt des Korrosionsvorgangs und des Massenabtrags konnte mithilfe einer Präzessionswaage festgestellt werden.



Abb. 77: Versuchsanordnung bei reiner Korrosion am Bewehrungsstab (Rebhan, 2017)

7.2.2 Korrosion an Bauteilen

Ebenso wurden an Bauteilen (z.B. Betonwürfel oder Winkelmauer) ähnliche Vorversuche, wie an den einzelnen Bewehrungseisen, durchgeführt. Beispielhaft hierfür wird ein Vorversuch anhand einer Winkelmauer näher beschrieben. Hierbei wurde die im Betonquerschnitt vorhandene Bewehrung, durch zwei horizontale Schlitze freigelegt. Die im unteren Schlitz freigelegte Bewehrung soll korrodiert werden. Der Anschluss der Anode wird durch den oberen Schlitz sichergestellt. Nach dem Freistimmen der Bewehrungsstäbe und dem anschließenden Säubern mittels Druckluft konnte ein vorgefertigtes Korrosionsbecken aus Plexiglas dicht an die Betonoberfläche der Winkelmauer montiert werden. Dies ist in nachfolgender Abbildung dargestellt.



Abb. 78: Vorversuch Winkelmauer

Des Weiteren erfolgt neben der Installation der Kupferkathode im Korrosionsbecken, der Anschluss der Blitzschutzklemmen an die oben freigelegten Bewehrungsstäbe – welche mit dem Pluspol (+) eines Batterieladegerätes verbunden wurde. Nach dem Auffüllen des Beckens mit Elektrolyt wird die Kathode mit der Leitung des Minuspols (-) verbunden. Abb. 79 zeigt die fertiggestellte Anordnung und Durchführung des Vorversuchs an der Winkelmauer.



Abb. 79: Vorversuch zur Korrosionsgeschwindigkeit an einer Winkelmauer

Neben den Erkenntnissen aus „Korrosion am nackten Bewehrungsstäben“ konnte zusätzlich folgendes erkannt werden:

- Die Korrosionsgeschwindigkeit hängt von der Fläche der Opferanode (Bewehrungsfläche) ab, welche dem Elektrolyt ausgesetzt ist;
- Eine gegenseitige Beeinflussung der Bewehrungselemente selbst konnte nicht festgestellt werden, jedoch bewirken abweichende Spannungsunterschiede der Eisen untereinander, geringfügig unterschiedliche Abrostraten;
- Bei der Versuchsanordnung, bei welcher nur ein gezieltes Bewehrungs Eisen korrodiert bzw. geschädigt werden soll – Kupferkathode wurde rings um den definierten Bewehrungsstab angeordnet – konnte ein geringfügiger Materialabtrag der direkt angrenzenden Bewehrungsstäbe festgestellt werden.

In Abb. 80 ist dieser Aufbau zur Herstellung einer Korrosionsschädigung eines einzelnen Bewehrungsstabes und das Ergebnis dieses Vorversuchs dargestellt.



Abb. 80: Vorversuch; Schädigung eines gezielt ausgewählten Bewehrungsstabs

Mit diesen vorab gewonnenen Erkenntnissen, konnten etwaige Probleme während der Versuchsdurchführung frühzeitig erkannt werden und es ergab sich dadurch eine zielgerichtete Planung der Versuche.

7.3 Verwendete Messtechnik

Zur Erfassung der Versuchsergebnisse und der damit verbundenen Bauwerksveränderungen, sowie zur Validierung als mögliches Messkonzept wurden die in Tabelle 6. angeführten Sensoren und messtechnischen Ausstattungen verwendet.

Tabelle 6: Messtechnische Ausstattung und Sensoren des Versuchsstandes

Bezeichnung	Lage	Beschreibung	Messgröße
SIBS_V2_S01	B/2/Y	Kraftmesszelle Belastungseinrichtung	Kraft
SIBS_V2_S02a	D/1/Y	Neigungssensor Rückwand	Neigung
SIBS_V2_S02b	D/3/Y	Neigungssensor Rückwand	Neigung
SIBS_V2_S03a	B/1/X	Wegaufnehmer Korrosionsbereich	Wegänderung
SIBS_V2_S03b	B/3/X	Wegaufnehmer Korrosionsbereich	Wegänderung
SIBS_V2_04	D/1-3/X	Fiber Bragg Sensor	Betonstauchung
SIBS_V2_05	D/2/X	Neigungssensor Bodenplatte	Neigung
SIBS_V2_06	A/1-3/V-W	Neigungssensor Fundamentkippen	Neigung
SIBS_V2_07	B/1-3/W-Z	Oberflächenscan Rückseite	Oberflächenänderungen (Krümmung, Neigung, etc.)
SIBS_V2_08	E/1-3/Y-Z	Oberflächenscan oder Targets Widerlagerwand	Oberflächenänderungen (Krümmung, Neigung, etc.)
SIBS_V2_09	E/2/Y	Neigungssensor Widerlagerwand	Neigung

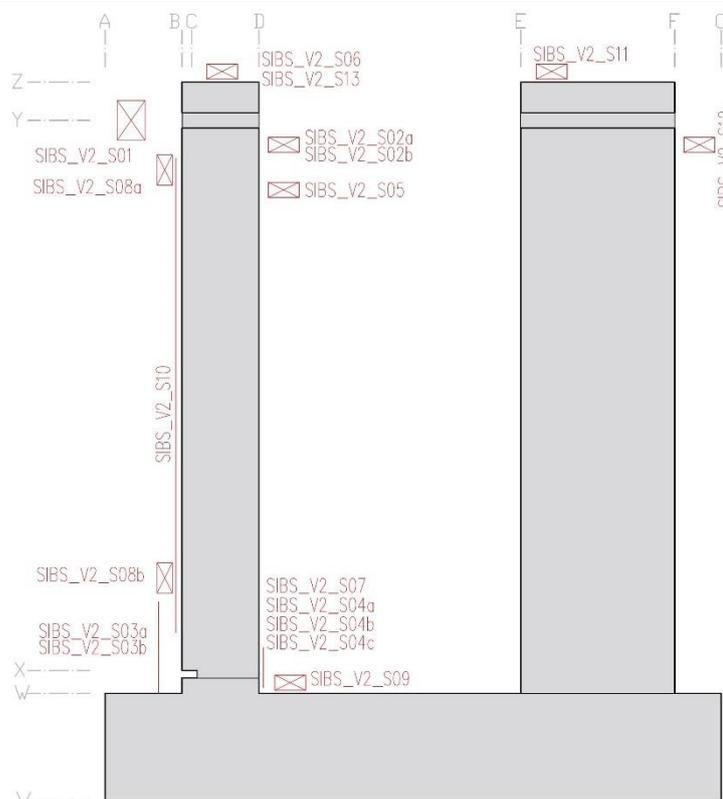


Abb. 81: Schematische Darstellung der Anordnung der geplanten Messtechnik

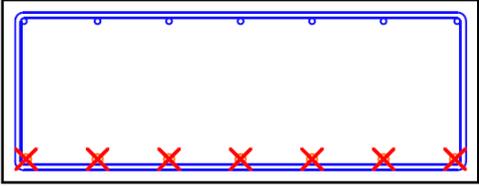
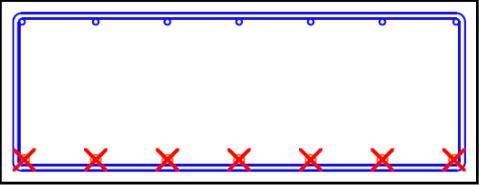
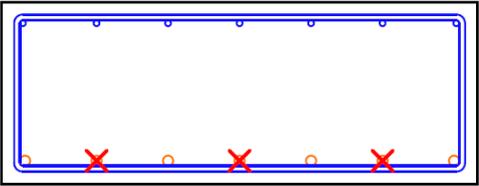
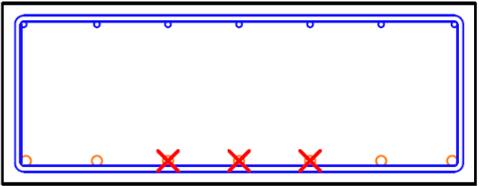
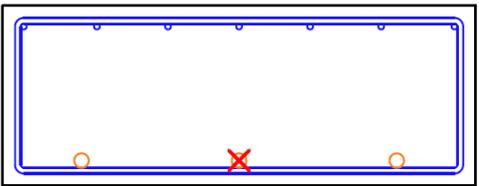
Es sei zusätzlich zu erwähnen, dass sogenannte Impact-Versuche während der Versuchsdurchführung stattgefunden haben, welche zur Ermittlung der ersten Eigenfrequenzen der geschädigten Bauwerke herangezogen werden sollen. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden hier jedoch nicht näher ausgeführt.

7.4 Konfigurationen der Versuche

Die Versuche bestehen aus fünf Versuchskonfigurationen, welche in der Einführung kurz erwähnt wurden. Zum einen setzen sich diese aus unterschiedlichen Querschnittausführungen (Hauptbewehrungsgrade) und zum anderen aus verschiedenen Korrosionsbeanspruchungen (Anzahl und Lage der korrodierten Bewehrungsstäbe) zusammen. Die Querschnitte der unterschiedlichen Versuchsreihen sind in Tabelle 7 dargestellt.

- **SIBS_V2_01** – gleichmäßige Korrosion (1-7)
- **SIBS_V2_02** – gleichmäßige Korrosion vertikale Anordnung der Dehnungsaufnehmer (1-7)
- **SIBS_V2_03** – Korrosion an jedem zweiten Bewehrungsseisen (2, 4, 6)
- **SIBS_V2_04** – Korrosion konzentriert an den mittleren Bewehrungsseisen (3, 4, 5)
- **SIBS_V2_05** – mittige Korrosion an höhergradig bewehrten Prüfkörper (2)

Tabelle 7: Querschnitt- und Versuchskonfigurationen

#	Bez.	Querschnitt	Beschreibung
1	V2_01	SIBS_V2_01 gleichmäßig 	7 Stk. Ø14/10 (10,77cm ²) gleichmäßig korrodiert (1-7)
2	V2_02	SIBS_V2_02 gleichmäßig 	7 Stk. Ø14/10 (10,77cm ²) gleichmäßig korrodiert (1-7)
3	V2_03	SIBS_V2_03 ungleichmäßig Pilgerschritt 	7 Stk. Ø14/10 (10,77cm ²) jedes zweite Eisen korrodiert (2,4,6)
4	V2_04	SIBS_V2_04 ungleichmäßig zentral 	7 Stk. Ø14/10 (10,77cm ²) mittige Korrosion (3,4,5)
5	V2_05	SIBS_V2_05 gleichmäßig 	3 Stk. Ø20 (9,42cm ²) mittiges Eisen korrodiert (2)

Des Weiteren sind unterschiedliche Lastschemata – welche auf die numerischen Berechnungen abgeleitet sind für die jeweiligen Versuchskörper vordefiniert und werden im Zuge der Versuchsdurchführung möglichst ident nachgefahren. Grundsätzlich lässt sich das Lastschema in folgende vier Bereiche unterteilen:

- Erst- u. Wiederbelastung – Belastung bis Rissmoment (Zustand II)
- Korrosionsstart – Beginn der Korrosionsbelastung entsprechend dem Korrosionsbild
- Laststufen – Erreichen der erforderlichen Korrosionsrate für die jeweilige Laststufe
- Bruchbelastung – Erreichen des maximalen Korrosionsniveaus und größte Belastung

Diese Bereiche sind Anhand eines exemplarischen Lastschemas in Abb. 82 dargestellt.

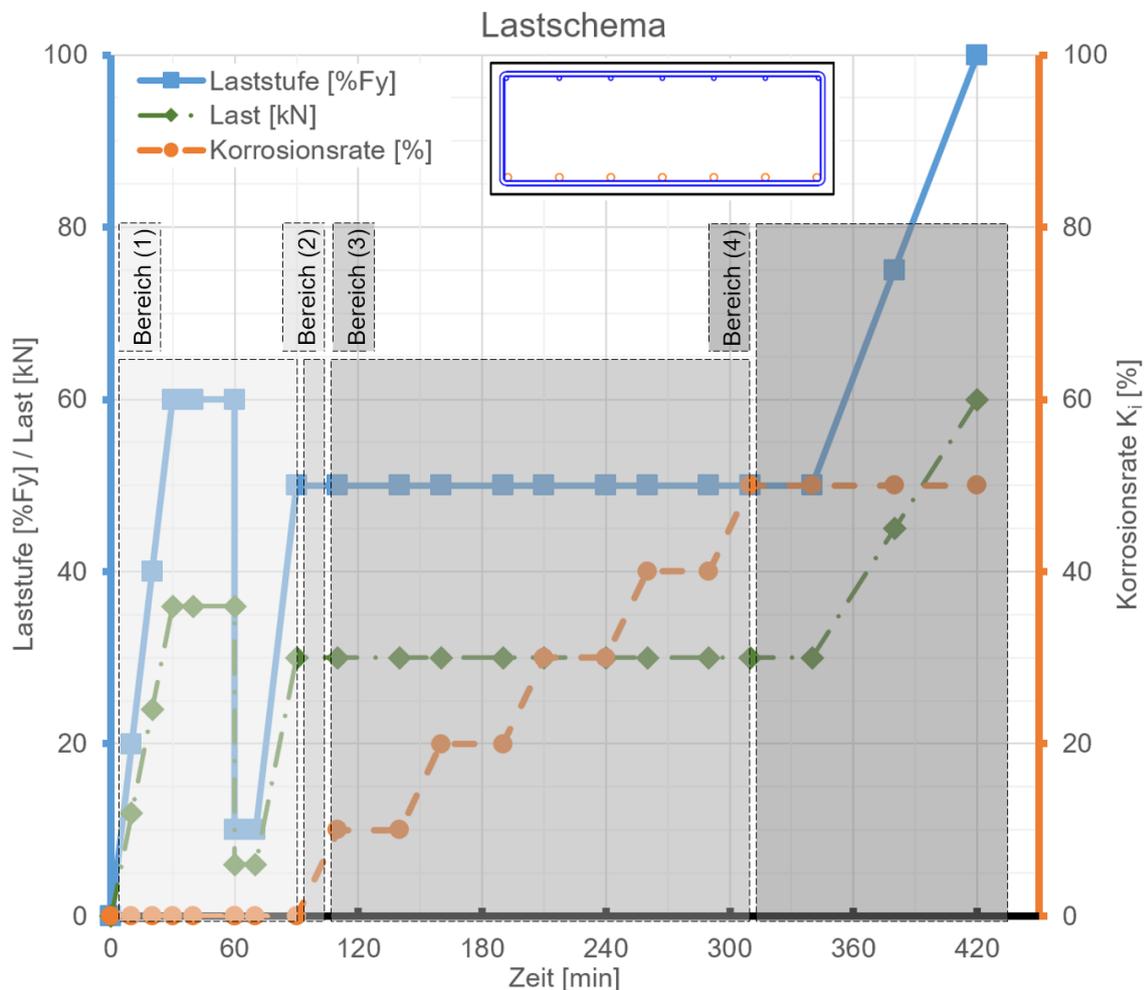


Abb. 82: Erläuterung der Bereiche innerhalb eines Lastschemas

- **Bereich (1) – Erst- und Wiederbelastung:** Um den gerissenen Zustand II in der künstlich erstellten Korrosionsfuge zu erreichen, wird eine Erstbelastung bis hin zum Rissmoment des Betonquerschnitts aufgebracht. Nach Erreichen von Zustand II erfolgt ein Absenken der Last auf ein Niveau von ca. 5 kN. Nach eingehender Prüfung des Versuchskörpers auf Risse und die Dokumentation des Rissbildes erfolgt anschließend eine Steigerung der Last auf das vordefinierte Lastniveau (Bereich 3)
- **Bereich (2) – Beginn Korrosionsvorgang:** Die für die jeweilige Korrosionsbeanspruchung bestimmte Anordnung (Korrosionswanne, Installation Kupferkathode, Anschlüsse Anode) wird installiert, geprüft und anschließend wird der Korrosionsprozess (Bereich 3) gestartet.
- **Bereich (3) – Laststufen:** In diesem Abschnitt wird das Erreichen der erforderlichen Korrosionsraten für die jeweiligen Laststufen sichergestellt. Dazu erfolgt eine sukzessive Messung des Korrosionsfortschrittes (Aufnahme des Querschnittsverlustes der korrodierten Bewehrungseisen) während der Durchführung des Versuches.
- **Bereich (4) – Erreichen des Bruchzustandes:** Der letzte Abschnitt auf der Zeitschiene der Versuchsdurchführung beschreibt das Erreichen der maximalen Korrosionsrate und das herbeigeführte Versagen des Bauteils durch weitere Laststeigerung.

In den nachfolgenden Unterkapiteln wird die Versuchsdurchführung für jeden Prüfkörper und dessen Versuchskonfiguration dargestellt.

7.4.1 SIBS V2_01

Nachfolgend wird das Lastschema für den Versuch SIBS V2_01 dargestellt. Es erfolgt eine gleichmäßige Korrosion der vorhandenen Bewehrung (7 Stk. Ø14/10; 10,77cm²). Die maximale Korrosionsrate wurde bei 50% des Bewehrungsdurchmessers festgelegt. Die Impact-Versuche werden bei den Korrosionsstufen 0%, 10%, 20%, 30%, 40% und 45% durchgeführt.

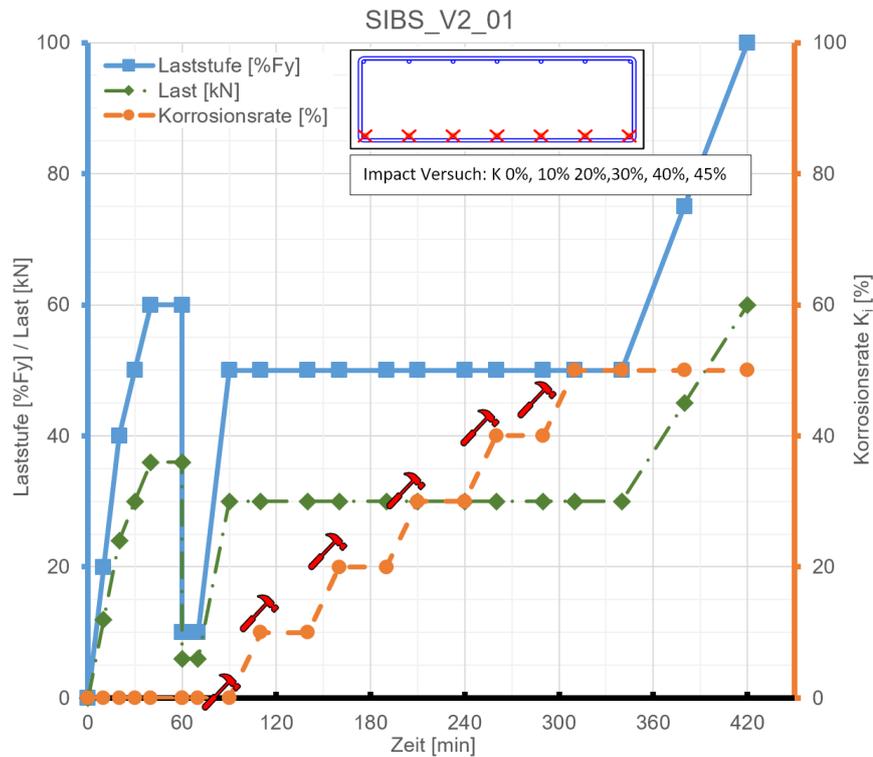


Abb. 83: Lastschema für SIBS V2_01



Abb. 84: Versuchsdurchführung SIBS_V2_01

7.4.2 SIBS V2_02

Nachfolgend wird das Lastschema für den Versuch SIBS V2_02 dargestellt. Es erfolgt eine gleichmäßige Korrosion der vorhandenen Bewehrung (7 Stk. Ø14/10; 10,77 cm²), jedoch unterscheidet sich diese in den geplanten Laststufen im Vergleich zu SIBS_V2_01. Die maximale Korrosionsrate ist ebenso bei 50% der Bewehrungsfläche festgelegt. Die Durchführung von Impact-Versuchen erfolgt bei 0%, 10%, 20%, 30%, 40% und 50% der Korrosionsstufen.

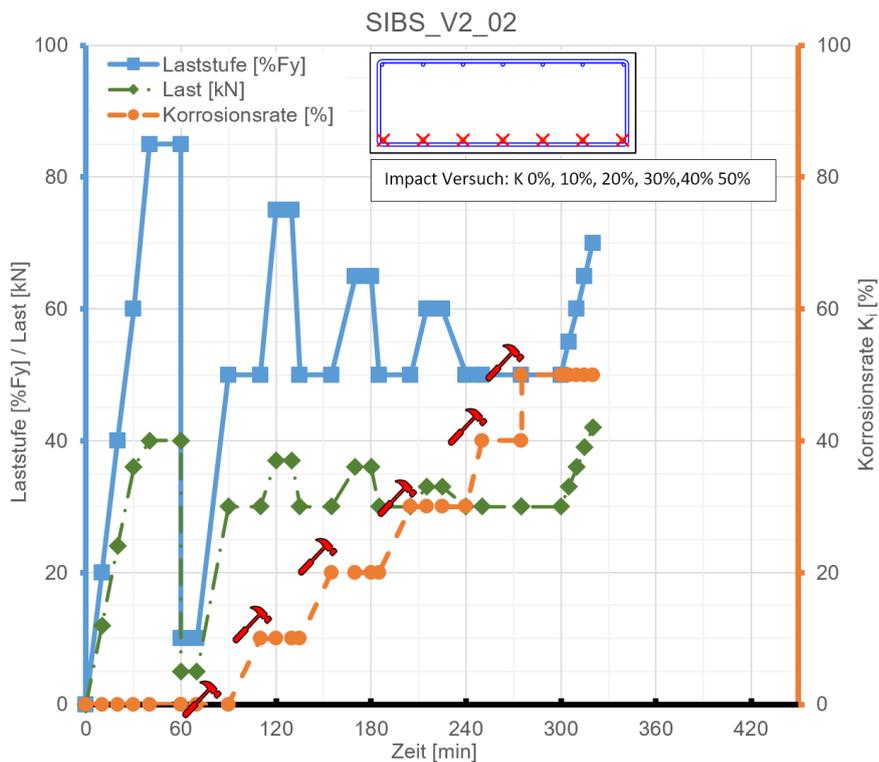


Abb. 85: Lastschema für SIBS V2_02



Abb. 86: Versuchsdurchführung SIBS_V2_02

7.4.3 SIBS V2_03

Nachfolgend wird das Lastschema für den Versuch SIBS V2_03 dargestellt. In dieser Versuchsanordnung wurde die Korrosion an drei Bewehrungsseisen durchgeführt. Somit wurden 3 Stk. Ø14 des Prüfwandquerschnitts geschädigt und mit einer maximalen Korrosionsrate von 70% beaufschlagt. Die Impact-Versuche finden bei einer Korrosionsschädigung von 0%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, und 70% statt.

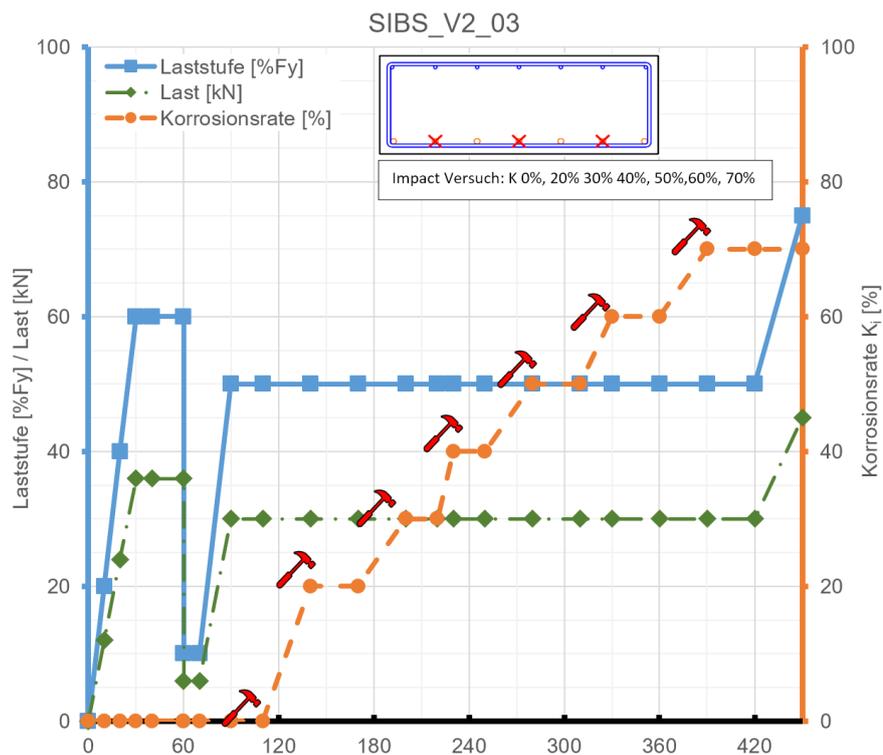


Abb. 87: Lastschema für SIBS V2_03



Abb. 88: Versuchsdurchführung SIBS_V2_03

7.4.4 SIBS V2_04

Im Versuch SIBS V2_04 soll die Korrosionsbelastung zentral erfolgen. Aus diesen Grund werden die drei im Prüfwandquerschnitt mittig gelegenen Bewehrungsseisen korrodiert. Der maximale Querschnittsverlust wurde mit 60% des Bewehrungsdurchmessers festgelegt. Die Impact-Versuche finden bei einer Korrosionsschädigung von 0%, 20%, 30%, 40%, 50%, und 60% statt.

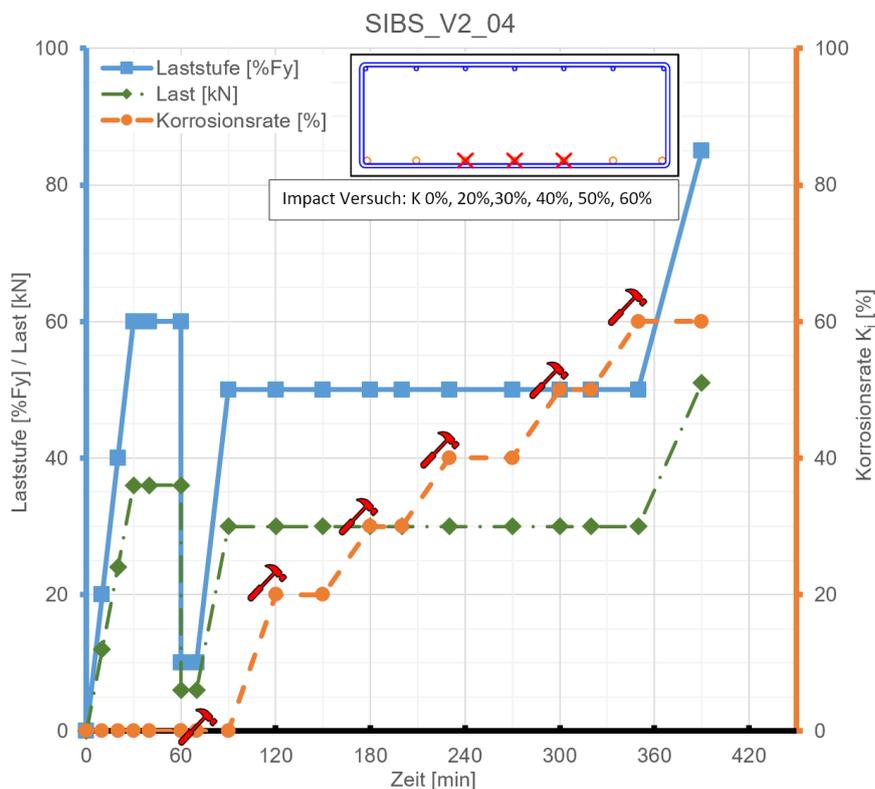


Abb. 89: Lastschema für SIBS V2_04

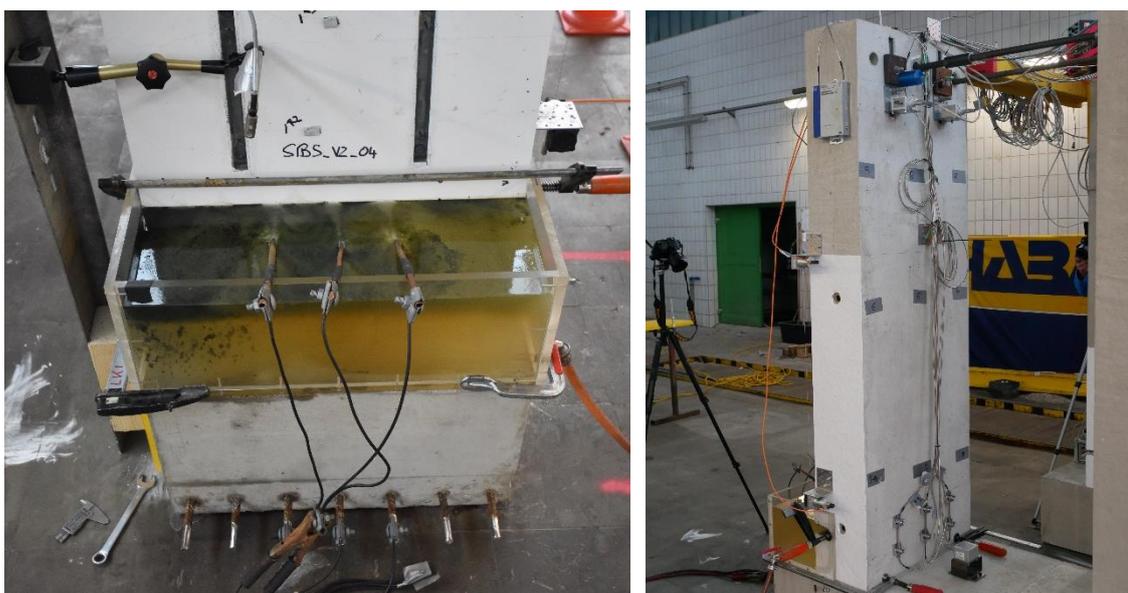


Abb. 90: Versuchsdurchführung SIBS_V2_04

7.4.5 SIBS V2_05

Nachfolgend wird das Lastschema für den letzten Versuch SIBS V2_05 dargestellt. Der zu prüfende Versuchskörper ist im Gegensatz zu den anderen Querschnitten mit einer Hauptbiegezugbewehrung von 3 Ø20 (9,42 cm²) bewehrt. Es soll eine Korrosionsbelastung des mittleren Bewehrungselements simuliert werden, welches eine maximale Schädigung von 60% des Durchmessers erfährt. Die Impact-Versuche finden in konstanten Schritten zu 0%, 20%, 40% und 60% der Querschnittsminderung statt.

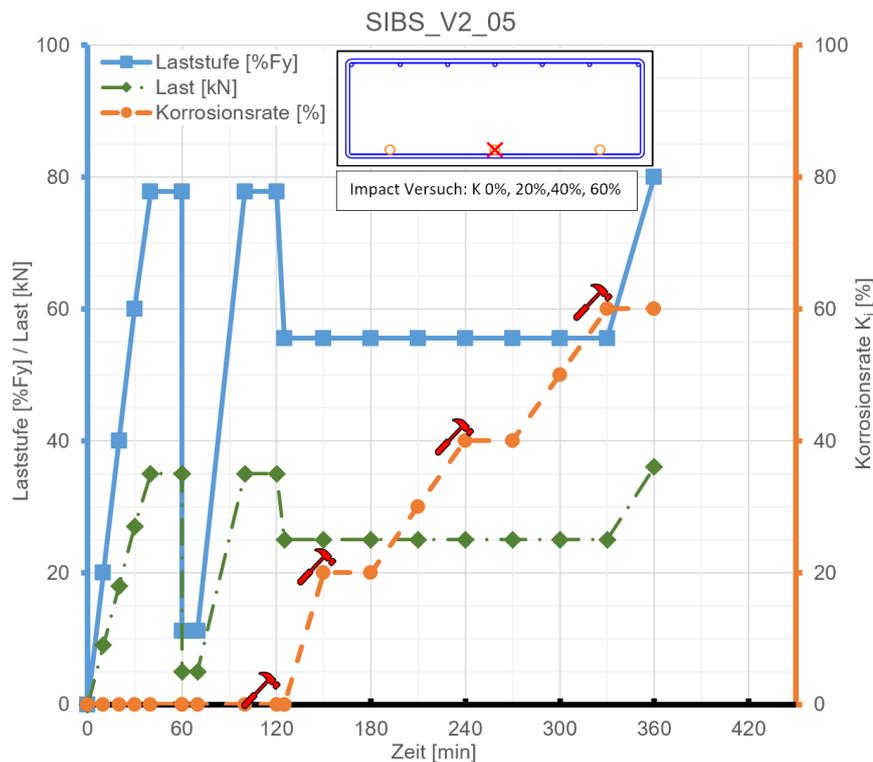


Abb. 91: Lastschema für SIBS V2_05



Abb. 92: Versuchsdurchführung SIBS_V2_05

7.5 Auswertung der Messergebnisse

Wie in Kapitel 7.3 beschrieben, kam eine Vielzahl an Sensoren und messtechnischer Ausrüstung bei der Umsetzung des Versuchsstandes SIBS_V2 zur Anwendung. Nachfolgend sollen nur jene, für die Erfassung der Korrosionsschädigung des Bauteils relevanten Sensoren und deren Messergebnisse ausgewertet werden. Dies sind im Speziellen folgende Sensoren:

- SIBS_V2_S04: Dehnungsaufnehmer
- SIBS_V2_S02: Neigungsaufnehmer

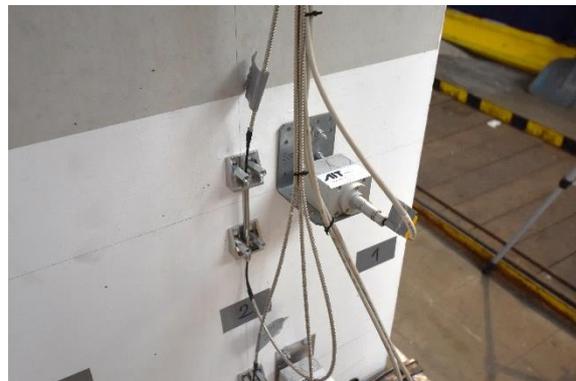
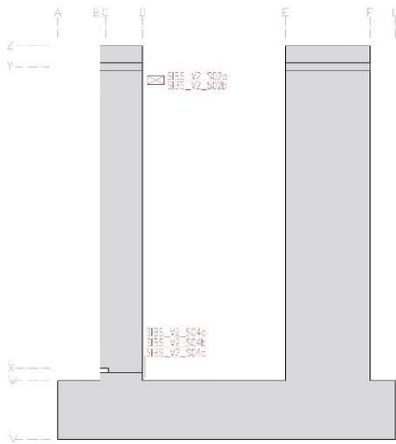


Abb. 93: Schematische Darstellung der Sensorpositionen und der Sensoren

Um den Einfluss der Korrosion auf das Verhalten der Versuchskörper besser darstellen zu können, werden nachfolgend lediglich die Untersuchungszyklen für Korrosion näher betrachtet. Jene Phasen, in denen die Erstbelastung aufgebracht wurde, oder in denen die Last bis zum Versagen gesteigert wurde sind aus Skalierungsgründen nicht in diesem Kapitel enthalten. Eine Übersicht zu allen erfassten Messwerten und Messergebnissen findet sich im Anhang dieser Arbeit.

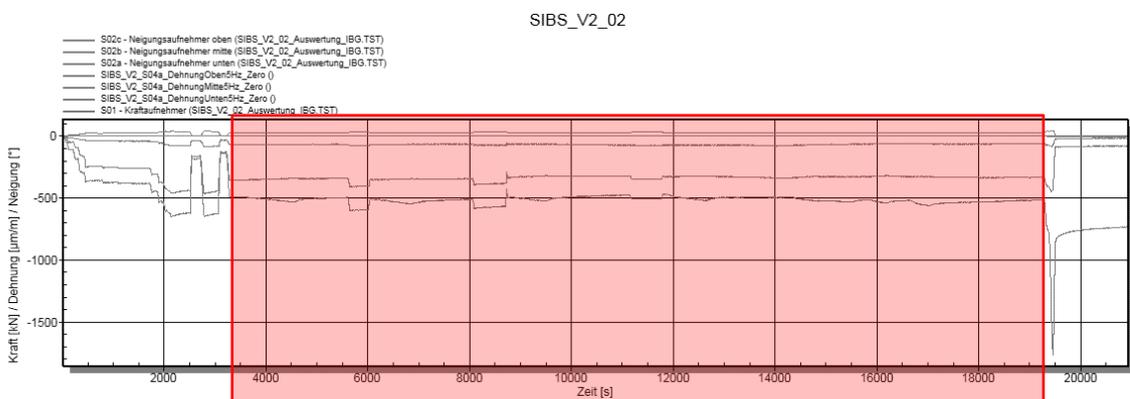


Abb. 94: Betrachteter Messbereich zur Auswertung der Versuche (SIBS_V2_02)

7.5.1 SIBS_V2_01

Nachfolgend sollen die Messergebnisse des Versuches SIBS_V2_01 kurz aufbereitet und dargestellt werden.

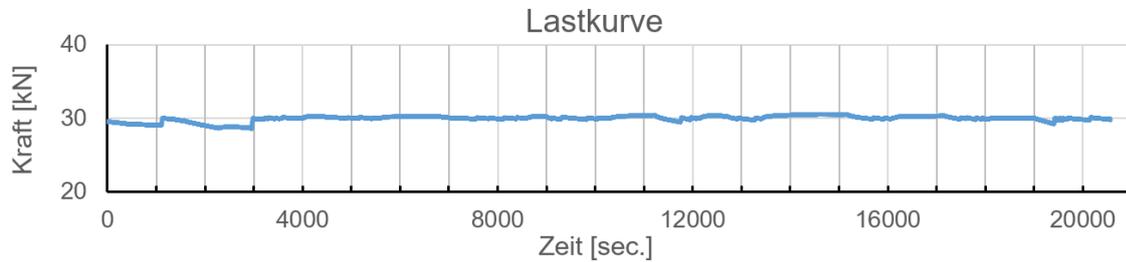


Abb. 95: SIBS_V2_01 – Kurve Last [kN] im Untersuchungsbereich

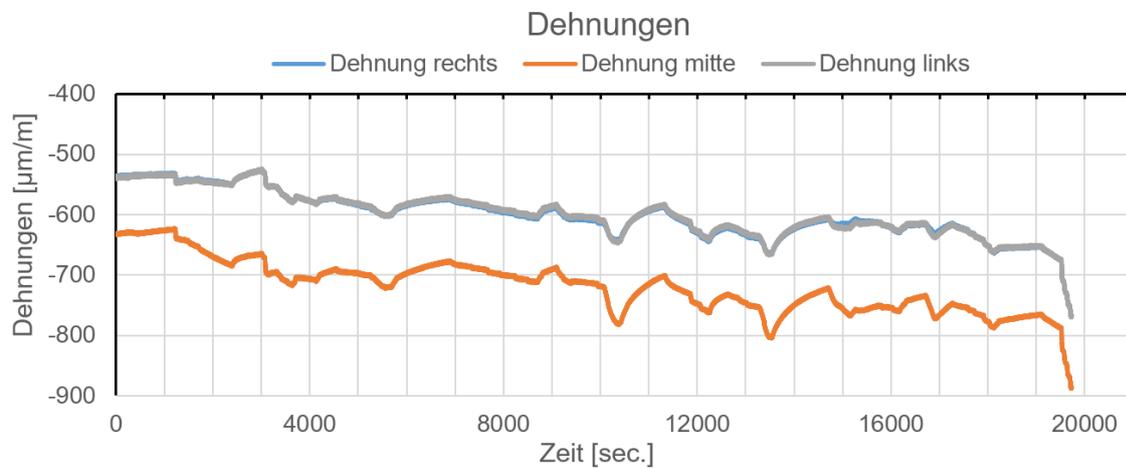


Abb. 96: SIBS-V2_01 – Kurve Dehnungen [$\mu\text{m/m}$] im Untersuchungsbereich

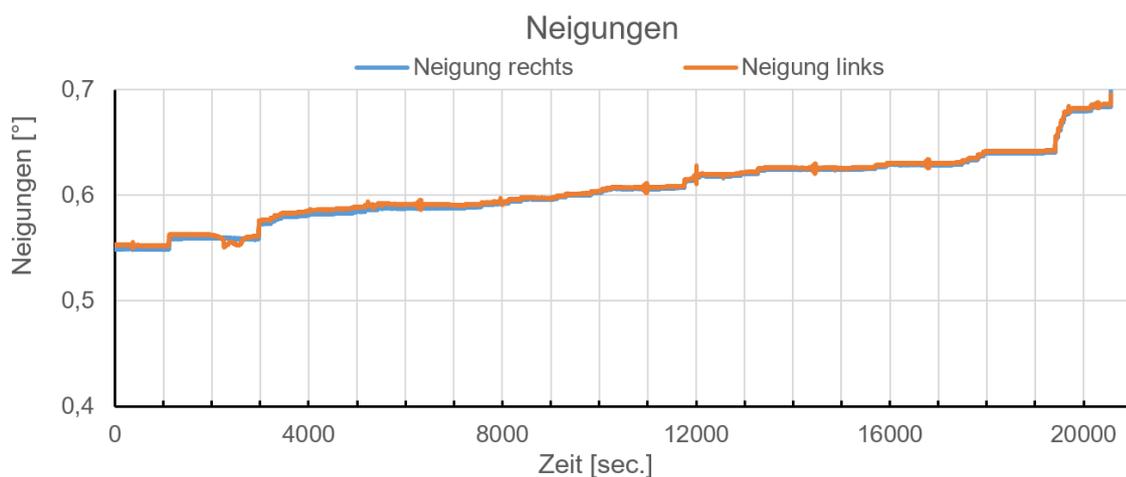
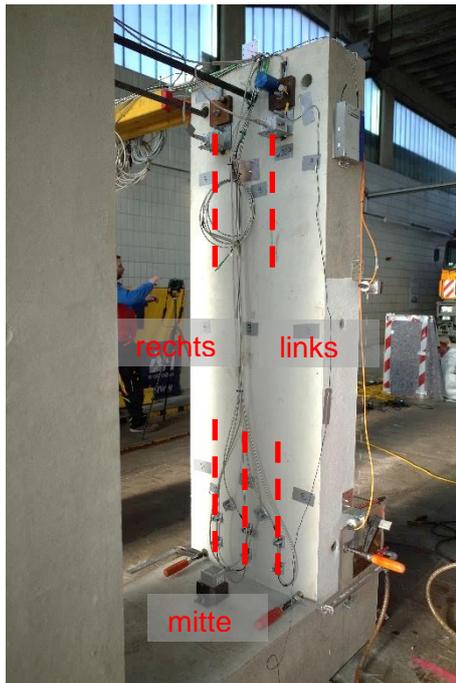


Abb. 97: SIBS-V2_01 – Kurve Neigung [$^\circ$] im Untersuchungsbereich

▪ Sensorübersicht und Anmerkungen



Ein Offset der Messwerte wurde nicht vorgenommen. Der Anfangswert der Messreihen ist daher ungleich Null und gibt den Messwert zum Zeitpunkt des Beginnes der Korrosionsphase wieder.

▪ Kraft vs. Dehnung

Bei der oben dargestellten Versuchskonfiguration erfolgte eine horizontale Anordnung der drei Dehnungssensoren auf Höhe der Korrosionsfuge. Dies spiegelt sich in den Messergebnissen wieder. Die Sensoren reagieren gleichmäßig auf eine Änderung der Laststufe über die Querschnittsbreite. Mit fortschreitender Lastkonstanthaltung ist des Weiteren eine Stauchungszunahme in der Betondruckzone zu erkennen. Der Versatz der „Dehnung mitte“ (orange Linie Abb. 96) lässt sich durch einen Offset des Dehnungsaufnehmers erklären.

▪ Kraft vs. Neigung

Die Prüfwandneigung wird in diesem Versuch von zwei weiter obenliegenden, horizontal nebeneinander angeordneten Neigungssensoren ermittelt. Die Erfassung des Korrosionsprozesses im Neigungsdiagramm (Abb. 97) ist nicht ausreichend genau möglich, jedoch ist ein progressiver Anstieg der Neigung zu erkennen. Zudem lassen sich die durchgeführten Zeitpunkte der Impact-Echo-Messung – durch kurzzeitigen Ausschlag der Neigungs- Amplituden – feststellen.

▪ Korrelation Dehnung und Neigung

Ein Korrosionsfortschritt, durch den Vergleich der Dehnungen in der Querschnittsebene und den Neigungen der Wand kann aufgrund des Messtechniklayouts nicht getroffen werden.

7.5.2 SIBS_V2_02

Nachfolgend sollen die Messergebnisse des Versuches SIBS_V2_02 kurz aufbereitet und dargestellt werden.

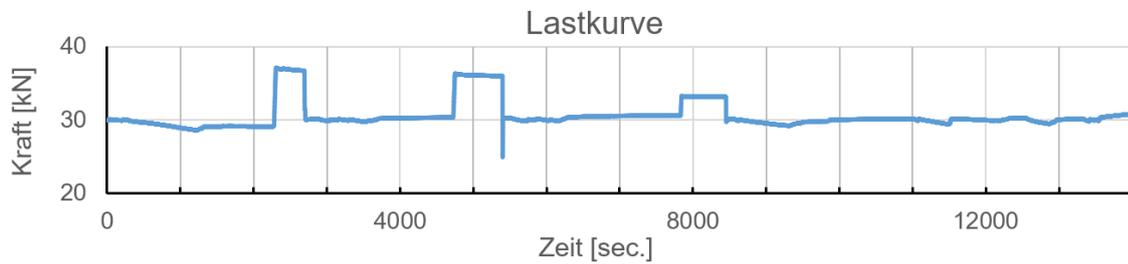


Abb. 98: SIBS_V2_02 – Kurve Last [kN] im Untersuchungsbereich

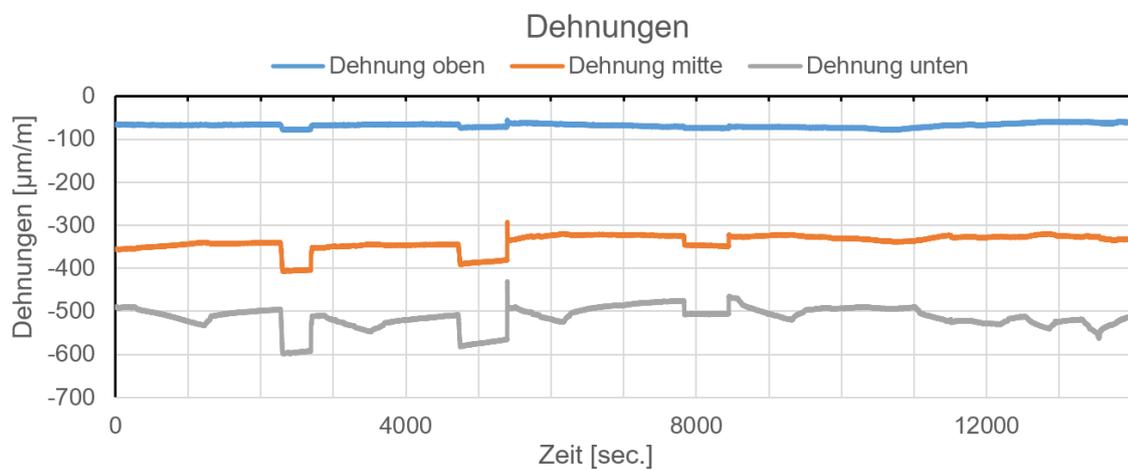


Abb. 99: SIBS-V2_02 – Kurve Dehnungen [µm/m] im Untersuchungsbereich

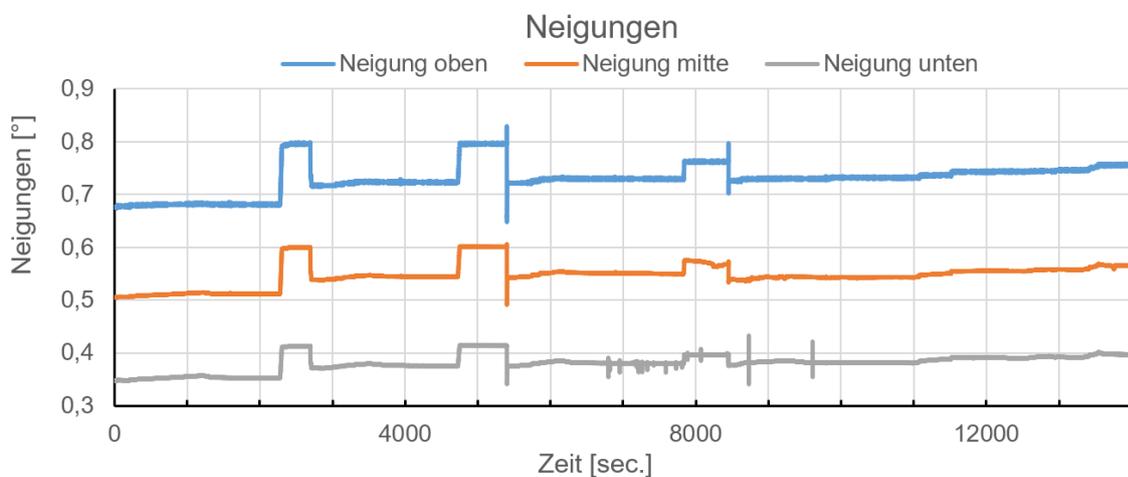
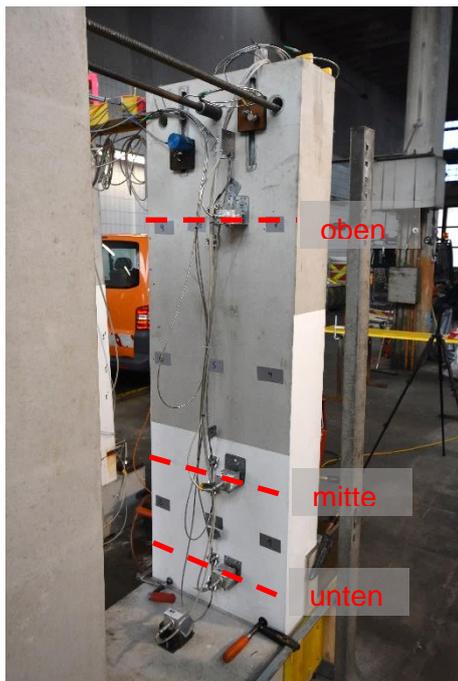


Abb. 100: SIBS-V2_02 – Kurve Neigung [°] im Untersuchungsbereich

▪ Sensorübersicht und Anmerkungen



Ein Offset der Messwerte wurde nicht vorgenommen. Der Anfangswert der Messreihen ist daher ungleich Null und gibt den Messwert zum Zeitpunkt des Beginnes der Korrosionsphase wieder.

Die Ergebnisse des Neigungssensors unten müssen invertiert interpretiert werden, da hierfür ein Nullabgleich erforderlich war.

Bei den unten folgenden Anmerkungen zur Auswertung ist die im Vergleich zu den anderen Versuchsreihen geänderte Positionierung der Sensoren zu beachten!

▪ Kraft vs. Dehnung

Bei der Dehnung ist hier vor allem die unterschiedliche Anordnung der Sensoren zu beachten. Eine Änderung (Erhöhung) der Laststufe ist in allen drei Sensoren zu erkennen, wobei die Amplitude mit zunehmender Tiefe (Dehnungsebene im Querschnitt) nach unten hin zunimmt. Weiters ist zu erkennen, dass die Dehnungsaufnehmer auf ein Fortschreiten des Korrosionsprozesses reagieren. Eindeutig ist dies im Vergleich zwischen der grauen (im Korrosionsbereich) und der orangen Linie in Abb. 99 zu erkennen.

▪ Kraft vs. Neigung

Im Vergleich zur Dehnung weisen die Neigungssensoren eine sehr geringe Erfassungsmöglichkeit des Korrosionsprozesses auf. Jedoch lassen diese Sensoren einen Anstieg der aufgetragenen Last eindeutig erkennen.

▪ Korrelation Dehnung und Neigung

Bei der Kombination der Dehnungs- und Neigungsaufnehmer ist zu erkennen, dass bei diesem Layout zur Sensorpositionierung mit der Erfassung der Dehnungen entlang des Querschnittes eine Aussage über ein Fortschreiten der Korrosion getroffen werden kann. Während die Neigungssensoren zur Erfassung von Last (und bedingt auch Temperaturänderungen) herangezogen werden können.

7.5.3 SIBS_V2_03

Nachfolgend sollen die Messergebnisse des Versuches SIBS_V2_03 kurz aufbereitet und dargestellt werden.

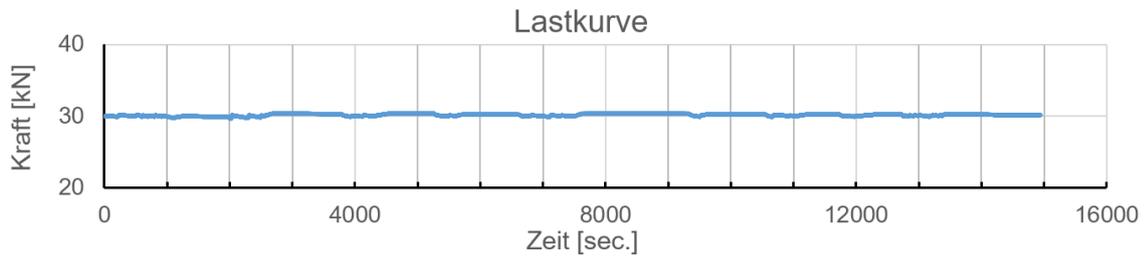


Abb. 102: SIBS_V2_03 – Kurve Last [kN] im Untersuchungsbereich

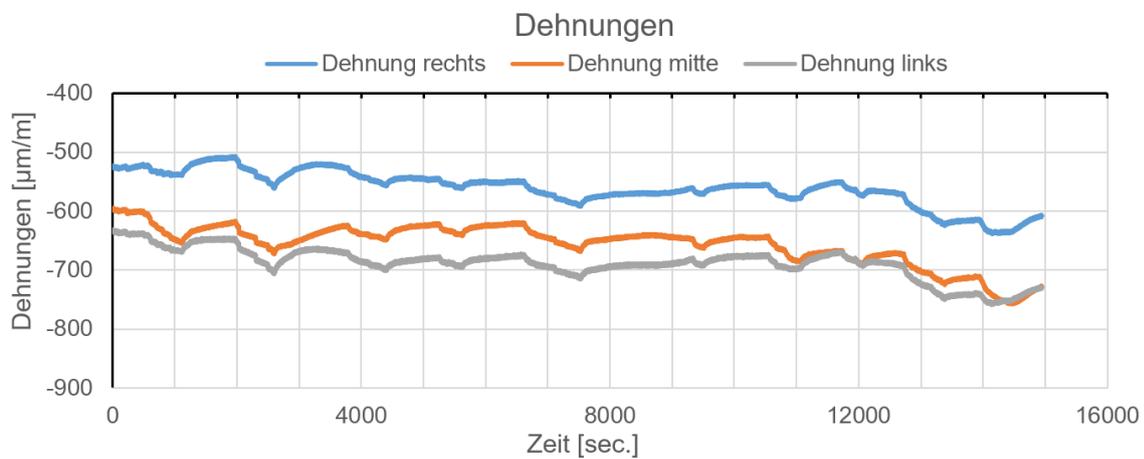


Abb. 101: SIBS-V2_03 – Kurve Dehnungen [µm/m] im Untersuchungsbereich

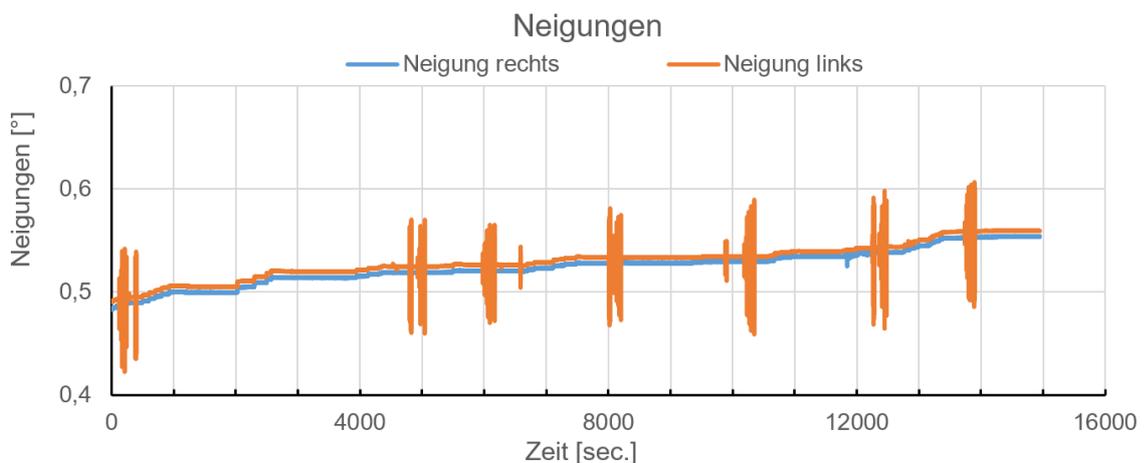
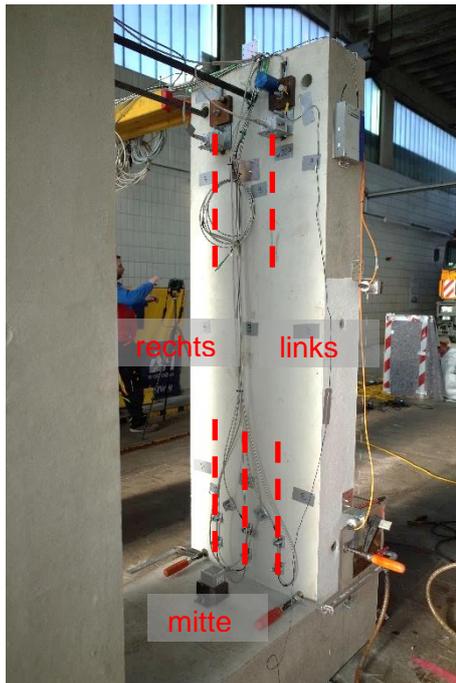


Abb. 103: SIBS-V2_03 – Kurve Neigung [°] im Untersuchungsbereich

- **Sensorübersicht und Anmerkungen**



Ein Offset der Messwerte wurde nicht vorgenommen. Der Anfangswert der Messreihen ist daher ungleich Null und gibt den Messwert zum Zeitpunkt des Beginnes der Korrosionsphase wieder.

- **Kraft vs. Dehnung**

Die Dehnungsaufnehmer sind ident zu Versuch SIBS_V2_01 angeordnet, sodass nur der Verlauf der Dehnung bzw. Betonstauchung in einer bestimmten Querschnittshöhe (Höhe Korrosionsfuge) erfasst werden kann. Mit Schädigungszunahme der Bewehrungseisen ist ein Anstieg der Dehnung im Querschnitt zu erkennen.

- **Kraft vs. Neigung**

Ein sukzessiver Anstieg der Prüfwandneigung ist mit Fortschreiten der Korrosionsbelastung festzustellen, jedoch lässt sich der Korrosionsprozess durch den Neigungsverlauf nicht genauer beschreiben. Die Zeitpunkte für die Impact-Echo-Messungen sind wiederum sehr deutlich zu erkennen (Ausschläge der Amplituden).

- **Korrelation Dehnung und Neigung**

Ein Korrosionsfortschritt, durch Kombination der Dehnungen in der Querschnittsebene mit den Neigungen kann aufgrund des Messtechniklayouts nicht getroffen werden.

7.5.4 SIBS_V2_04

Nachfolgend sollen die Messergebnisse des Versuches SIBS_V2_04 kurz aufbereitet und dargestellt werden.

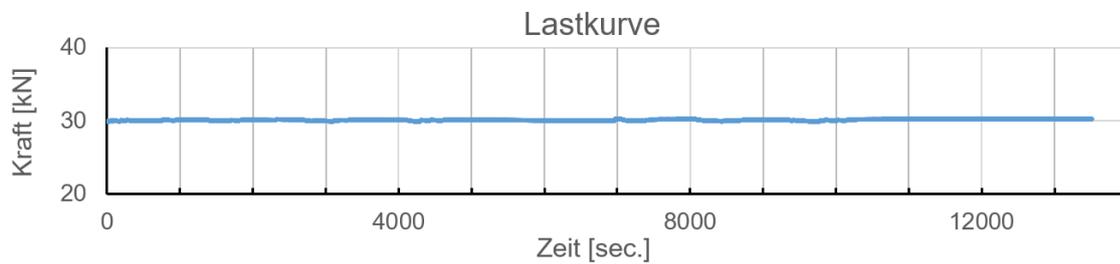


Abb. 104: SIBS_V2_04 – Kurve Last [kN] im Untersuchungsbereich

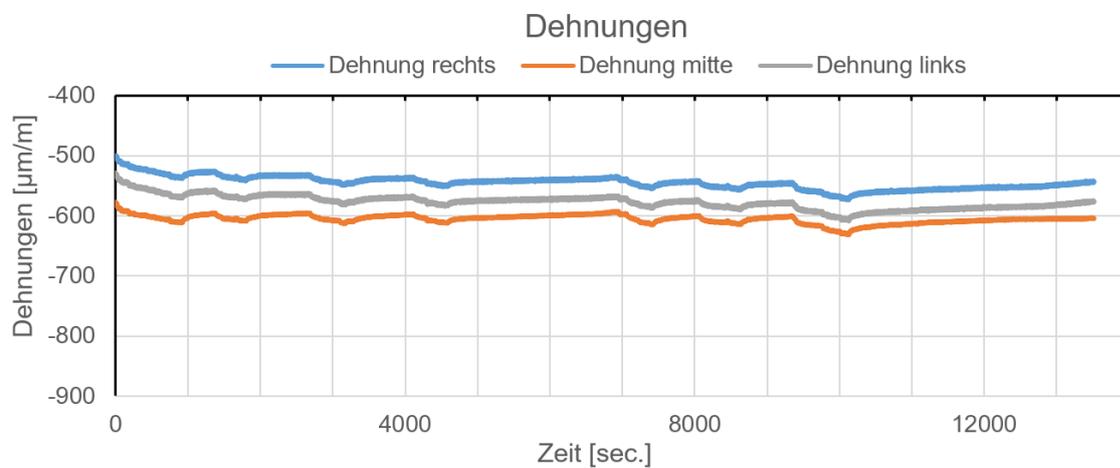


Abb. 105: Kurve Dehnungen [µm/m] im Untersuchungsbereich

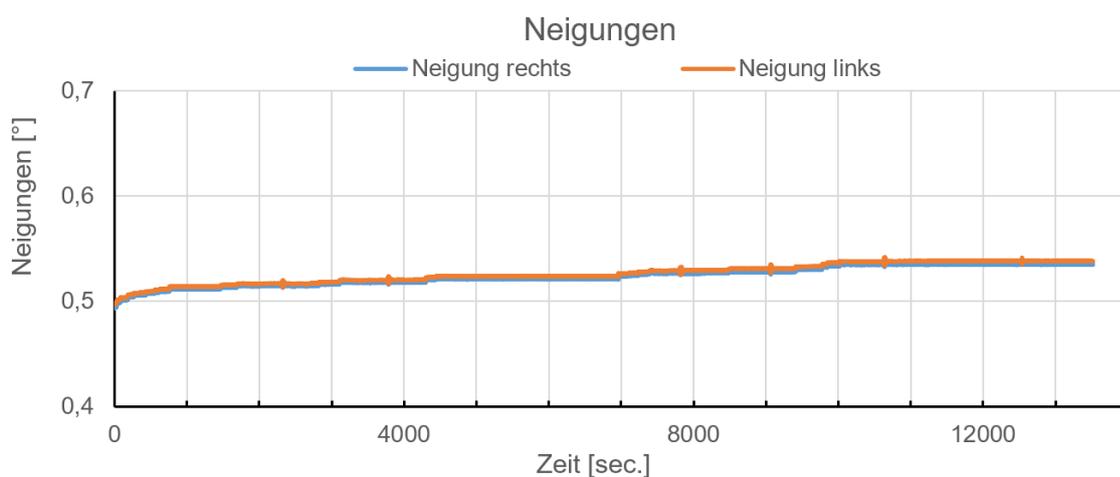
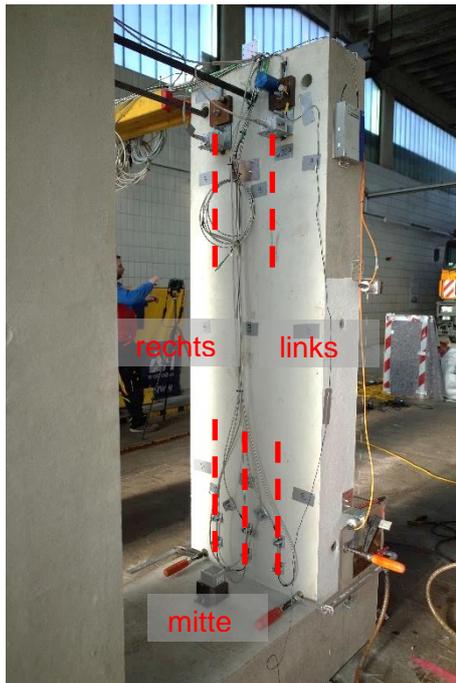


Abb. 106: SIBS-V2_04 – Kurve Neigung [°] im Untersuchungsbereich

▪ Sensorübersicht und Anmerkungen



Ein Offset der Messwerte wurde nicht vorgenommen. Der Anfangswert der Messreihen ist daher ungleich Null und gibt den Messwert zum Zeitpunkt des Beginnes der Korrosionsphase wieder.

▪ Kraft vs. Dehnung

In diesem Versuch - in welchem eine zentral angeordneten Schädigung durch Korrosion nachgebildet wurde ist eine Dehnungszunahme in Querschnittsmitte (höchster Absolutwert „Dehnung mitte“), bei annähernd konstantem Lastniveau zu erkennen. Hierbei weisen die äußeren Dehnungsaufnehmer eine geringere Stauchung des Querschnitts auf. Dies ist aus der Spannungsumlagerung der mittleren auf die äußeren Bewehrungseisen zu begründen. Der vorhandene Unterschied in den Dehnungen zwischen links und rechts lässt sich durch eine leicht exzentrische Lasteinleitung begründen.

▪ Kraft vs. Neigung

Mit konstant gehaltenem Lastniveau und bei fortschreitender Korrosion lässt sich eine deutliche Tendenz der Neigungszunahme erkennen. Zudem lassen sich die Zeitpunkte der Impact-Echo-Messung durch die kurzzeitigen Ausschläge der Neigungs-Amplituden feststellen.

▪ Korrelation Dehnung und Neigung

Eine Kombination aus Dehnungen über die Querschnittsbreite und den Wandneigungen, bei horizontal positionierte Dehnungssensoren, lässt keine Aussage über den Fortschritt der Korrosion zu.

.

7.5.5 SIBS_V2_05

Nachfolgend sollen die Messergebnisse des Versuches SIBS_V2_05 kurz aufbereitet und dargestellt werden.

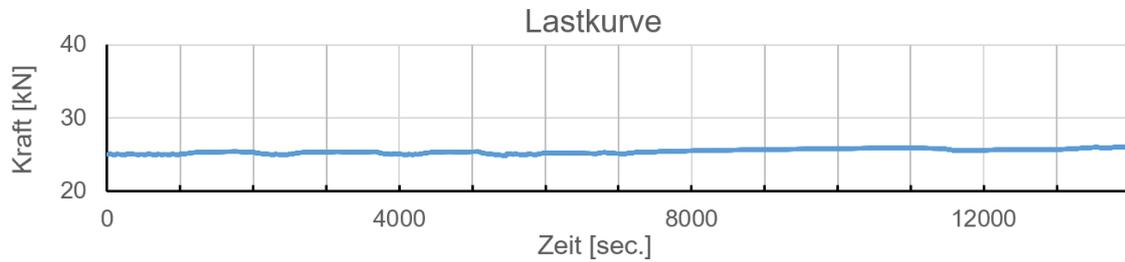


Abb. 107: SIBS_V2_05 – Kurve Last [kN] im Untersuchungsbereich

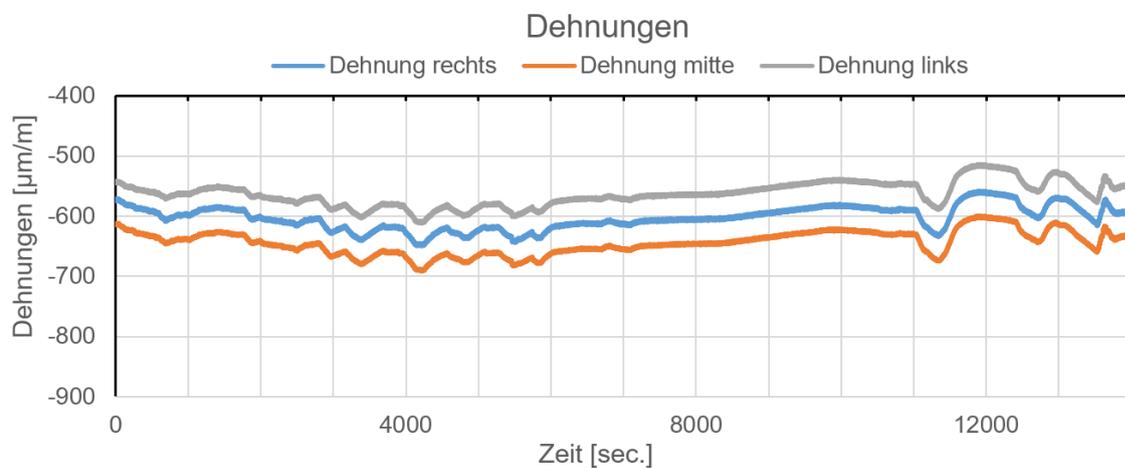


Abb. 108: SIBS-V2_05 – Kurve Dehnungen [µm/m] im Untersuchungsbereich

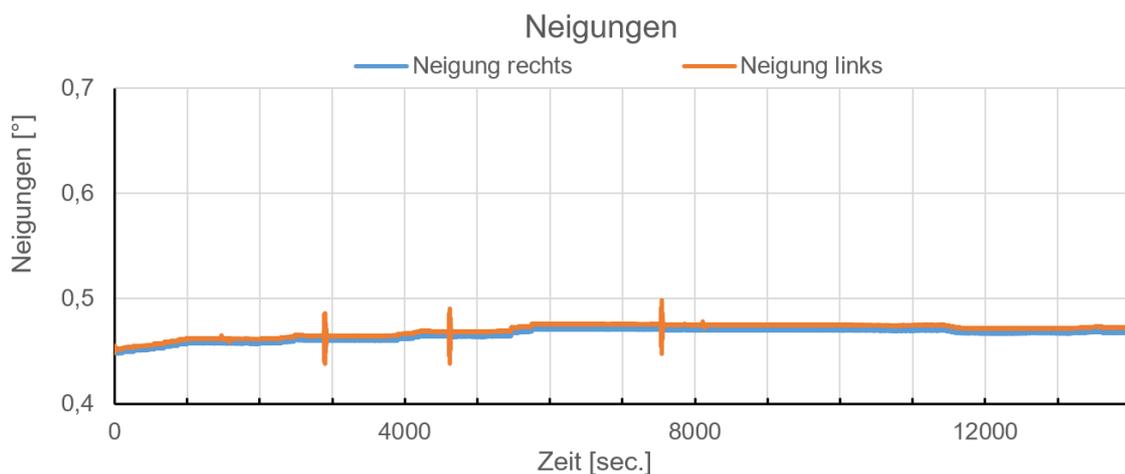
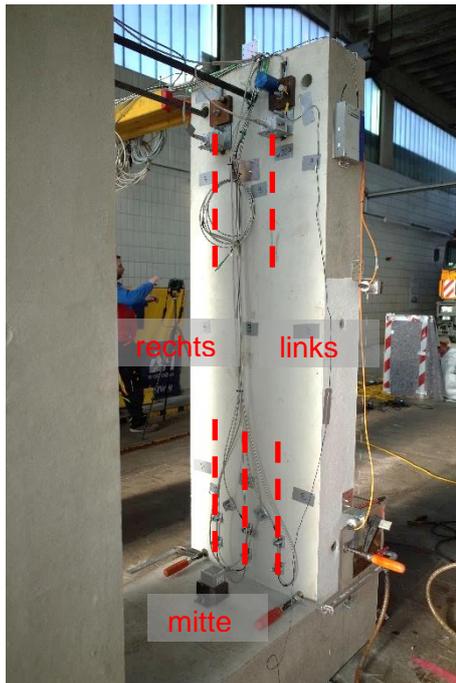


Abb. 109: SIBS-V2_05 – Kurve Neigung [°] im Untersuchungsbereich

▪ Sensorübersicht und Anmerkungen



Ein Offset der Messwerte wurde nicht vorgenommen. Der Anfangswert der Messreihen ist daher ungleich Null und gibt den Messwert zum Zeitpunkt des Beginnes der Korrosionsphase wieder.

▪ Kraft vs. Dehnung

Im Versuch SIBS_V2_05, in welchem eine Schwächung des mittleren Bewehrungsseisens ($\varnothing 20$) abgebildet wird, ist eine ähnliche Dehnungszunahme in Querschnittsmitte, bei annähernd konstanten Lastniveau, zu erkennen. Die äußeren Dehnungsaufnehmer weisen eine geringere Dehnung auf, was wiederum aus der Spannungsumlagerung der mittleren auf die äußere Bewehrung zu begründen ist.

▪ Kraft vs. Neigung

Mit konstant gehaltenem Lastniveau und fortschreitender Korrosion ist hier lediglich eine sehr geringe Neigungszunahme zu erkennen. Die Zeitpunkte der Impact-Echo-Messung lassen sich anhand der kurzzeitigen Ausschläge der Neigungs-Amplituden feststellen.

▪ Korrelation Dehnung und Neigung

Eine Kombination aus Dehnungen und den Wandneigungen – bei horizontal positionierte Dehnungssensoren – lässt keine Aussage über den Fortschritt der Korrosion zu.

7.6 Erkenntnisse aus den Versuchen und der Auswertung der Messergebnisse

Anhand der Versuche konnte ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Einfluss der Korrosion an den Bewehrungselementen und dem Verhalten der Versuchskörper festgestellt werden. Durch die fortschreitende Querschnittsschwächung findet eine deutliche Änderung der Steifigkeit des Bauteils statt, welche sich in einer Verformungszunahme der Wand äußert. Die sich durch den Steifigkeitsverlust ändernde Dehnungsebene im Prüfquerschnitt bewirkt einen Anstieg der Krümmung und somit eine Zunahme der Wandneigung. Die Beobachtungen während der Versuchsdurchführung zeigten zudem, dass durch dieses „weniger steife Verhalten“ eine ständige Nachregelung der Belastungseinrichtung erforderlich war, um das festgelegte Lastniveau halten zu können. Weiters ließ sich feststellen, dass sich bei einer gleichmäßigen Schädigung sämtlicher Bewehrungsstäbe eine verhältnismäßig größere Wandneigung einstellt. Werden hingegen nur bestimmte Bewehrungsseisen einer Korrosionsbelastung ausgesetzt, das heißt es wird eine konzentrierte Korrosionsschädigung einzelner Bewehrungsstäbe erzwungen, findet eine Umlagerung der Kräfte auf die intakte Bewehrung statt. Dementsprechend geringer ist die auftretende Wandneigung und es kommt zu einem über die Versuchskörperbreite gleichmäßige Verdrehung der Wand.

Zusammenfassend kann die Aussage getroffen werden, dass zur verbleibenden Bauteilsteifigkeit, neben dem Korrosionsszenario (und Schädigungsgrad) auch etwaige (Spannungs-) Umlagerungen einen Einfluss haben und somit die Tragfähigkeit des Bauteils begrenzt wird.

Weiters wurde mit dem Versuchsstand SIBS_V2 gezeigt, dass sich Korrosionsschäden an Stützbauwerken – und im Allgemeinen an Betonbaukonstruktionen – durch elektrochemische Korrosion nachbilden lassen. Dies ist sowohl für eine gleichmäßige Korrosion als auch für eine in der Realität beobachtete ungleichmäßige Korrosion möglich.

8 Ergebnisse, Resümee, Ausblick

8.1 Korrosionsgeschädigte Stützbauwerke

Die Zustandserfassung von bestehenden Stützbauwerken ist in den letzten Jahren ein wichtiges Thema geworden. Im Rahmen von Untersuchungen wurde im Besonderen bei älteren, bestehenden Winkelstützmauern erkannt, dass die Arbeitsfuge (Übergangsbereich) zwischen Fundament und aufgehender Wand, als kritisch zu beurteilen ist. Dieser Bereich stellt infolge der örtlich hohen Beanspruchung, wo klaffende bzw. aufgehende Fugen zu erwarten sind, eine große Gefahr für eine Korrosion der Biegezugbewehrung dar. Die erdseitig eingelegte Bewehrung könnte nach mehreren Jahrzehnten Nutzungsdauer erhebliche Korrosionserscheinungen aufweisen. Dies hätte zur Folge, dass bei einer zu großen Schädigung zufolge Korrosion aufgrund einer nur geringen Neigungsänderung des Wandschenkels, ein spröbruchartiges Versagen der Hauptbewehrung und somit der Wand eintreten könnte. Die Ursachen hierfür können neben einer klaffenden Arbeitsfuge, welche im Zuge einer Bauwerksverformung eingetreten ist, auch eine mangelhafte Betonqualität (Kiesnester) sein. Dieser sich als problematisch erweisende Bereich (der Betonierfuge) hat somit einen maßgeblichen Einfluss auf die Tragfähigkeit und stellt Ingenieure und Techniker bei der Beurteilung derartiger Bauwerke vor eine Herausforderung.

8.2 Versuchsstand SIBS_V2

Durch die Planung und die durchdachten Arbeitsschritte im Vorfeld der Versuche, konnte bei der Durchführung an den Prüfkörpern anschaulich gezeigt werden, dass Korrosion an (eingebauten) Bewehrungselementen nachbildbar ist. Durch die spezielle Anordnung und Fertigung der Bauteile, welche für die künstlich herbeigeführte Korrosion notwendig war, ließen sich darüber hinaus unterschiedliche Korrosionsszenarien und Schädigungsbilder erzeugen. Mithilfe dieser Versuchsanordnung (Korrosionswanne etc.) konnten somit bestimmte Korrosionsbelastungen und Schädigungsgrade am Prüfkörper simuliert werden, welche in weiterer Folge durch ein umfangreiches Messtechniklayout ausgestattet wurde und eine Erfassung des Bauwerksverhaltens ermöglichten.

Im Zuge der Versuche konnten jedoch auch Fehler und Verbesserungsvorschläge eingearbeitet werden, welche zu Weiterentwicklungen und Verbesserungen in der Versuchsdurchführung führten. Zu erwähnen ist hier das überarbeitete Messkonzept, in welchem eine Anordnung von vertikal verteilten Dehnungs- und Neigungssensoren vorgeschlagen wird.

Durch diese Optimierung des Messlayouts könnte sich z.B. in weiteren Versuchen, aber besonders auch bei in der Realität bestehenden Bauwerken, ein Monitoringsystem ableiten. Demzufolge könnte durch die zuvor beschriebene Anordnung der Sensoren eine einerseits lastinduzierte und andererseits schädigungsinduzierte – oder aber auch eine temperaturbedingte – Verformung unterschieden werden.



Abb. 110: Optimiertes Messtechniklayout

8.3 Weitere Entwicklungen

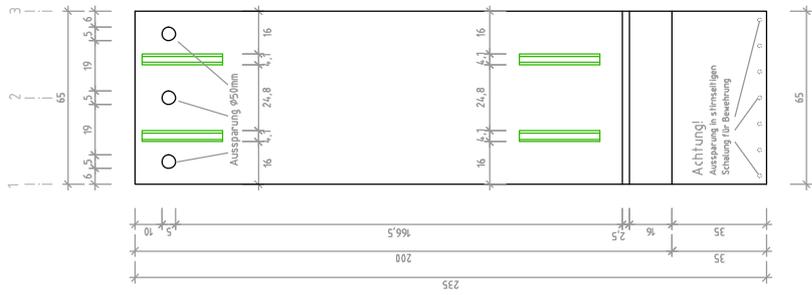
Mit dem in Kapitel 7 beschriebenen Versuchsstand und den im Zuge dieser Untersuchungen stattgefundenen Messungen konnte festgestellt werden, dass ein Monitoring oder eine Überwachung bei korrosionsgeschädigten Stützbauwerken möglich sein könnte. Durch die Kombination von Dehnungs- und Neigungssensoren wäre es hierbei möglich, sowohl das Verhalten des Bauwerks zu Folge Last- und Temperaturänderungen zu erfassen, als auch die Einflüsse zu Folge einer stattfindenden Korrosion zu erfassen. Zur Validierung dieses Messkonzeptes und Layouts wären weitere Grundlagenversuche an Stahlbetonbauteile erforderlich, um die Anwendbarkeit dieses Messkonzeptes zu bestätigen und mögliche Randeinflüsse und Anforderungen an die Umsetzung abzuklären.

9 Literatur

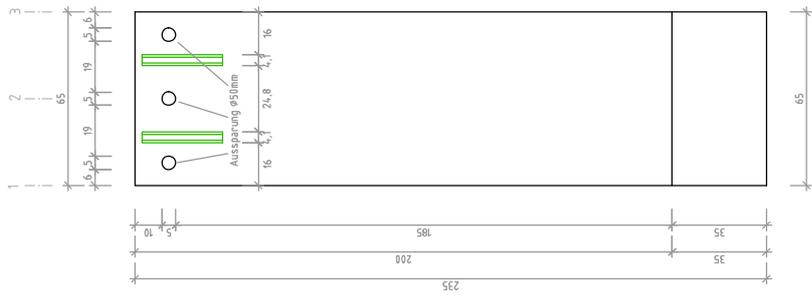
- Adam et al. (2007),
 Stützbauwerke, In: Betonkalender 2007, Teil 1, 96. Ausgabe, Berlin: Ernst & Sohn,
 2007, S. 265–352
- Boley et al. (2012)
 Handbuch Geotechnik. München, Deutschland: Vieweg+Teubner Verlag Springer
 Fachmedien Wiesbaden GmbH.
- Brandl, H. (2009)
 Stützbauwerke und konstruktive Hangsicherungen. In K. J. Witt, Grundbau-
 Taschenbuch, Teil 3: Gründungen und geotechnische Bauwerke, 7. Auflage (S.
 747-901). Weimar, Deutschland: Ernst & Sohn.
- Externbrink, H., Müller, Ch. (2014) Online aufgerufen 03.01.2018 unter:
 Die Geschichte des Baustoffes Beton.
[http://www.baustoffwissen.de/wissenbaustoffe/
 baustoffknowhow/grundstoffe/beton/baustoff-beton-geschichte/](http://www.baustoffwissen.de/wissenbaustoffe/baustoffknowhow/grundstoffe/beton/baustoff-beton-geschichte/)
- Holcim (Süddeutschland) GmbH (2011)
 Leitfaden für Sichtbeton, Tipps aus der Praxis für Planung und Herstellung, 1.
 Auflage, Dotternhausen, Deutschland
- Lumesberger, A. (2017)
 Untersuchungen zum Systemverhalten von bestehenden, schadhafte
 Gewichtsmauern
- Marte, R. et al., (2014)
 Überprüfung und Bewertung des Ist-Zustands älterer Stützbauwerke im
 Straßennetz der ASFINAG. Beiträge zum 29. Christian Veder Kolloquium –
 Stützmaßnahmen in der Geotechnik. TU Graz, Gruppe Geotechnik Graz, 2014
- Mitteilungen der Geotechnik Schweiz
 Stützmauern, Herbsttagung 2017, Nr. 175
- ÖGG Empfehlungen zur Prüfung und Beurteilung bestehender, unverankerter
 Stützbauwerke. (Stand: 02. 2018) Salzburg, Österreich: Österreichische
 Gesellschaft für Geomechanik.
- ÖNORM EN 1997-1. (2014)
 Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik. Teil 1:
 Allgemeine Regeln. Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1997-1 und
 nationale Ergänzungen. Ausgabe 2013-09-01. Wien, Österreich: Austrian
 Standards Institute.
- ÖNORM EN 1990. (2003). Eurocode - Grundlagen der Tragwerksplanung. Wien:
 Austrian Standards.
- ÖNORM EN 1991. (2011). Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke. Wien: Austrian
 Standards.

- Rebhan et al. (2017)
Geomechanics and Tunneling. Sicherheitsbewertung bestehender Stützbauwerke. Ernst & Sohn Verlag für technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, Deutschland
- RVS 13.03.61 (2014)
Qualitätssicherung bauliche Erhaltung – Überwachung, Kontrolle und Prüfung von Kunstbauten – Nicht geankerte Stützbauwerke. Österreichische Forschungsgesellschaft Straße, Schiene, Verkehr. Wien, 2014.
- Schär, P. (2016)
Verletzliche Stützbauwerke. Schweizerische Bauzeitung, Nr. 40
- Schmidt et al. (2014)
Grundlagen der Geotechnik. Geotechnik nach Eurocode. 4. Auflage. Stuttgart, Deutschland: Springer Fachmedien Wiesbaden
- Stahr, M. (2015)
Betoninstandsetzung: Baustoff-Schadensfeststellung-Instandsetzung, 2. Auflage, Stuttgart, Deutschland: Springer Vieweg
- Schweizerische Eidgenossenschaft – Bundesamt für Straßen (2017)
Fachhandbuch Tunnel/Geotechnik, Technisches Merkblatt Stützbauwerke, ASTRA, V2.13, 2017
- Tostmann, K. (2001)
Korrosion: Ursachen und Vermeidung. Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim
- Vöbu Forum (2017)
Österreichischer Bohr-, Brunnenbau und Spezialtiefbauunternehmungen: Neues aus der Branche,
- Weber, S. (2013)
Bausanierung: Erkennen und Beheben von Bauschäden, 6. Auflage, Leipzig, Deutschland: Springer Vieweg.
- Weißbach, W. (2010)
Werkstoffkunde Strukturen, Eigenschaften, Prüfung: Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden
- Ziegler, M. (2012)
Geotechnische Nachweise nach EC7 und DIN 1054 Einführung mit Beispielen, 3. Auflage, Berlin: Ernst & Sohn, 2012.

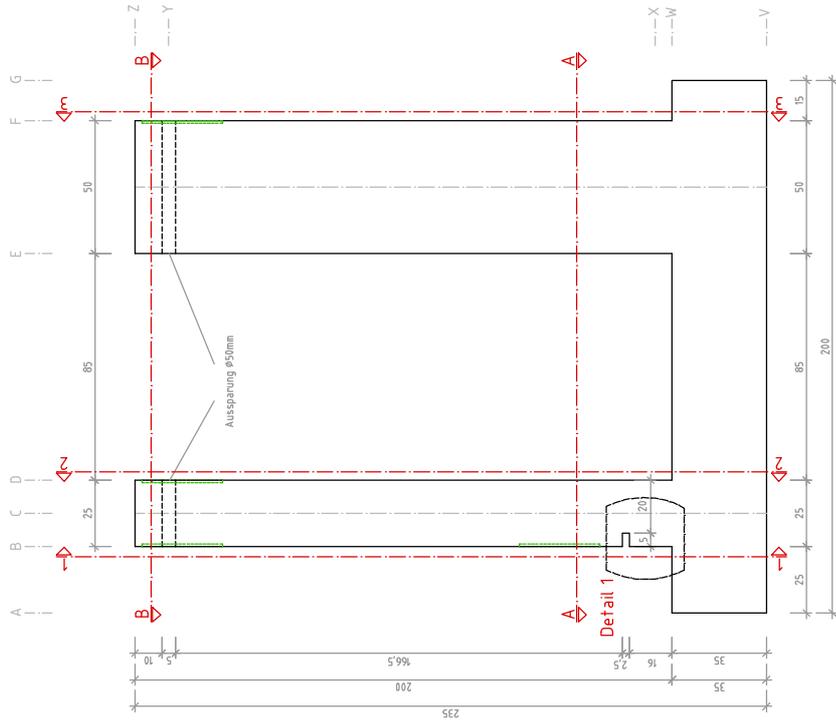
Ansicht 1:
M 1:100



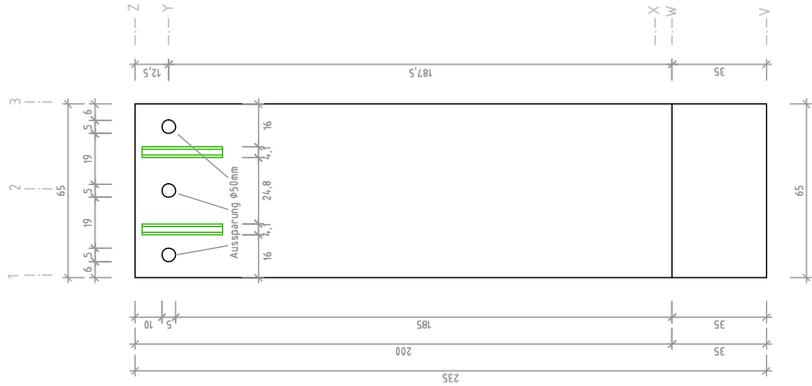
Ansicht 2:
M 1:100



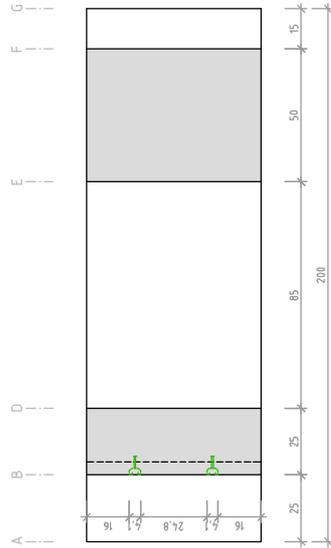
Draufsicht:
M 1:100



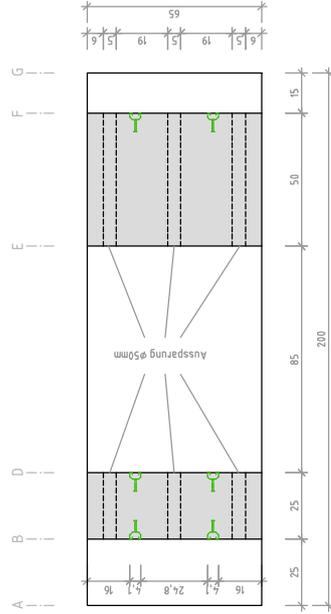
Ansicht 3:
M 1:100



Schnitt A:
M 1:100



Schnitt B:
M 1:100



Detail 1:
M 1:25

