

# Approaches to increase the load-bearing behavior of longitudinal tubing joints

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of  
Diplom-Ingenieur / Diplom-Ingenieurin  
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

---

DIPLOMARBEIT

## Möglichkeiten zur Erhöhung der Tragfähigkeit von Tübbing-Längsfugen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines / einer  
Diplom-Ingenieurs/ Diplom-Ingenieurin  
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

**Stefan Messlehner BSc.**  
Matr.Nr.: 01129173

unter der Anleitung von

**o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Johann Kollegger**  
**Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Hannes Wolfger**

Institut für Tragkonstruktionen  
Forschungsbereich Stahlbeton- und Massivbau  
Technische Universität Wien,  
Karlsplatz 13/E212-2, A-1040 Wien

Wien, im Jänner 2020

---

# Vorwort

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich während meines Studiums unterstützt haben.

Das Verfassen der Diplomarbeit und das Durchführen der zugehörigen Versuche waren eine sehr lehrreiche und interessante Zeit, die mir die Forschung nähergebracht haben. Für die Chance, meine Diplomarbeit am Institut für Tragkonstruktionen – Betonbau verfassen zu können, möchte ich mich bei Herrn Professor Kollegger recht herzlich bedanken.

Großer Dank gilt meinem Betreuer und Freund Hannes Wolfger für die gute Zusammenarbeit, das unkomplizierte Miteinander und die vielen Stunden im Labor und bei fachlichen Diskursen. Ohne dies wäre mir das Verfassen der Diplomarbeit um einiges schwerer gefallen.

Ein weiterer Dank gilt meinen Studienkollegen und Freunden, mit denen ich zahlreiche Stunden auf der Universität verbringen konnte. Aber auch in etlichen anderen Lokalitäten, um Ablenkung vom fordernden Uni- und Arbeitsalltag zu bekommen.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Eltern, die mir schon von klein auf jeden erdenklichen Bildungsweg ebneten und dabei selbst zurückstecken mussten. Ohne den Rückhalt wäre es mir nicht möglich gewesen, meinen Bildungsweg mit einem Studium zu beenden.

Meinem Bruder und besten Freund Philip gilt nicht nur ein großer Dank für die Unterstützung im Studium, sei es Hilfe in Mathematik oder das Gründen einer WG mit mir. Auch abseits der Universität musste er mit meinen launischen Phasen in stressigen und schweren Uni- und Arbeitszeiten klarkommen und nahm mir diese Phasen nicht übel.

Meiner Schwägerin und WG-Mitglied Kati möchte ich auch Dank aussprechen. Für die vielen spannenden Abende auf der Couch, die Zeit, in der ich unsere Wohnküche in ein Büro umfunktioniert habe und nur passiv anwesend war und dafür, dass wir uns schon als Familienangehörige und nicht nur als Freunde sehen.

Des Weiteren möchte ich mich bei all meinen anderen Freunden bedanken, die es mit mir schon so lange aushalten und mir trotzdem nicht von der Seite weichen. Im Speziellen Isi und meiner Teilzeit WG-Kollegin Eva – für das Verständnis in der Endphase meiner Diplomarbeit, in der ich mit Abwesenheit glänzte.

# Kurzfassung

Der Baustoff Stahlbeton hat seinen Stand als führendes Bauprodukt, den er in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts erreicht hat, noch immer nicht verloren. In Bezug auf hohe Dauerhaftigkeit, Tragverhalten und die zahlreichen Variationsmöglichkeiten ist Stahlbeton eine sehr gute Wahl für die unterschiedlichsten Arten von Bauvorhaben. Im Tunnelbau kommt Stahlbeton seine Dauerhaftigkeit und das Tragverhalten auf Druck zugute. Da der Mensch – und somit auch seine Bauwerke – nach immer mehr streben, wird auch dem Tunnelbau immer mehr abverlangt. Einerseits wird bei erhöhten Belastungen der Tunnelröhre eine Vergrößerung der Tübbingdicke und somit eine Vergrößerung des Ausbruchquerschnittes notwendig. Andererseits will in bereits erreichten Tiefen eine wirtschaftlichere Herstellung der Tunnelröhre gewährleistet werden. Diese Aspekte versucht man mit einem neuentwickelten Tübbing (Typ MT), der am Institut für Tragkonstruktionen Forschungsbereich Stahlbeton- und Massivbau entwickelt und patentiert wurde, gerecht zu werden.

Diese Arbeit dient der Erforschung des neuen Tübbingtypen. Aus diesem Grund wird zu Beginn der Arbeit ein Einblick in die aktuelle Normenlage geboten, Berechnungsansätze der Tragfähigkeit der Tübbing-Längsfuge aufgelistet und bereits patentierte Möglichkeiten zur Erhöhung der Tragfähigkeit von Tübbing-Längsfugen betrachtet, um schlussendlich mit den erhaltenen Erkenntnissen den Tübbing MT zu beschreiben.

Kern dieser Arbeit stellen vier Versuche dar. Zwei Versuche wurden mit dem in Österreich im Regelfall verwendeten Tübbingtypen (Typ RT) durchgeführt und die anderen beiden mit dem neupatentierten Tübbing MT. Die Tübbinge werden bis zum Versagen im Prüfrahmen gegeneinandergedrückt. Diese experimentelle Untersuchung mit der Konzeption und Herstellung der Tübbinge und der Versuchsaufbau und Versuchsablauf werden detailliert beschrieben.

Im Anschluss an die experimentelle Untersuchung werden die Ergebnisse der Experimente präsentiert und die Vorgehensweise zum Erzielen der Ergebnisse beschrieben.

Mit den in den Grundlagen erwähnten Berechnungsmodellen für die Tragfähigkeit der Tübbing-Längsfuge werden Traglasten berechnet und mit den Bruchlasten, welche aus den Versuchen gewonnen werden konnten, verglichen.

Laut den gewonnenen Erkenntnissen dieser Diplomarbeit ist eine Tragfähigkeitssteigerung zutreffend. Um eine genauere Aussage zur Erhöhung der Tragfähigkeit der Tübbing-Längsfuge durch den Einsatz vom Tübbing Typ MT treffen zu können, sind weiterführende Versuche notwendig. Eine genauere Betrachtung der Leiterabstände und der Bewehrungsführung der Druckstäbe werden jedoch erforderlich, um auch eine Adaption der Berechnung der Tragfähigkeit der Tübbing-Längsfugen zu ermöglichen.

# Abstract

Since the second half of the 20th century, reinforced concrete is the most-widely used construction material due to its durability, its load-bearing behavior and the different possibilities of usage. Therefore, it is used for different types of buildings, especially for tunnels. For tunnels, the most positive aspects of concrete are the durability and the load-bearing behavior under compressive stress. As humanity strives towards greatness in all spheres, perfection is also demanded as regards the construction of tunnels. On the one hand, the increasing of the loads need more sustainable tubbings, by making them thicker the tubbings get more sustainable but also need more space for the construction, which means more costs.

On the other hand, companies also want to ensure that constructions are economical and reasonable. In order to achieve these goals, the department of Structural Engineering at TU Wien newly developed a tubing and also obtained a patent for it.

The following thesis aims at providing research on this tubing. First, the fundamentals, such as the development of the standards, the basic information about tunnels and the equations for calculating the longitudinal tubing joints, are described.

Four different trials are at focus of the project at hand: two of them using the tubing that is generally used in Austria, the other two using the newly developed tubing type. The tubbings were pressed against each other, till their load capacity was reached. Detailed information about the idea of the tubing and the preparation and production of the tubbings are given. After those trials, the theoretical load capacity of the longitudinal tubing joints were calculated and compared with the results from the tests.

The results of these experimental tests will be closely examined in the following thesis. After making all these explorations, an increase of the load capacity, by using the new tubing type, was confirmed. For a more detailed statement, more tests with a variety of the reinforcement are required.

# Inhaltsverzeichnis

|   |            |
|---|------------|
| <b>Vorwort</b> .....  | <b>II</b>  |
| <b>Kurzfassung</b> .....  | <b>III</b> |
| <b>Abstract</b> .....   | <b>IV</b>  |
| <b>Inhaltsverzeichnis</b> .....   | <b>V</b>   |
| <b>1. Einleitung</b> .....  | <b>1</b>   |
| 1.1. Problemstellung .....  | 1          |
| 1.2. Zielsetzung .....  | 1          |
| <b>2. Grundlagen</b> .....  | <b>3</b>   |
| 2.1. Tunnelbau .....  | 3          |
| 2.1.1. Tunnelausbau mittels Tübbinge .....  | 3          |
| 2.2. Normen und Richtlinien .....   | 6          |
| 2.2.1. Einwirkungsseite .....   | 6          |
| 2.2.2. Widerstandsseite .....   | 6          |
| 2.2.3. Richtlinien .....  | 7          |
| 2.3. Berechnungsansätze für die Tragfähigkeit von Tübbing-Längsfugen .....              | 8          |
| 2.3.1. EC 2 Abschnitt 6.7 [5, 6] .....  | 8          |
| 2.3.2. DAUB [2] .....   | 9          |
| 2.3.3. SIA 262 Abschnitt 4.2.1.8 [12] .....   | 10         |
| 2.3.4. SIA 262 Abschnitt 4.2.1.8 mit Ergänzungen Kaufmann [13] .....                    | 11         |
| 2.3.5. EC 2 Abschnitt 3.1.9 [5], mit Ergänzungen Kaufmann und Querdruck .....           | 13         |
| 2.3.6. SIA 262 Abschnitt 4.2.1.8 mit Ergänzungen Kaufmann-Kollegger .....               | 15         |
| 2.3.7. EC 2 Abschnitt 3.1.9 [5] mit Ergänzungen Kaufmann-Kollegger und Querdruck .....  | 16         |
| 2.3.8. Berechnung der Tragfähigkeit laut Schmidt-Thrö et al. [20] .....                 | 16         |
| 2.4. Bekannte Möglichkeiten zur Erhöhung der Tragfähigkeit von Tübbing-Längsfugen ..... | 16         |
| 2.4.1. Tragfähigkeitssteigerung lt. AT 518 840 A1 [14] .....                            | 17         |
| 2.4.2. Tragfähigkeitssteigerung lt. EP 1 243 753 A1 [15] .....                          | 18         |
| 2.4.3. Tragfähigkeitssteigerung lt. DE 25 22 789 C3 [16] .....                          | 18         |
| 2.4.4. Tragfähigkeitssteigerung lt. US 1 969 810 [17] .....                             | 18         |
| 2.4.5. Tragfähigkeitssteigerung lt. GB 1 502 207 [18] .....                             | 19         |
| 2.4.6. Tübbinge aus Stahlfaserbeton [19] .....  | 19         |
| 2.5. Neue Möglichkeit zur Erhöhung der Tragfähigkeit von Tübbing-Längsfugen .....       | 19         |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>3. Experimentelle Untersuchungen.....</b>   | <b>21</b> |
| 3.1. Allgemeines .....   | 21        |
| 3.2. Versuchskörper .....  | 22        |
| 3.2.1. Abmessungen und Bewehrungsführung.....  | 23        |
| 3.2.2. Herstellung .....   | 24        |
| 3.3. Baustoffe .....   | 26        |
| 3.3.1. Beton.....  | 26        |
| 3.3.2. Bewehrungsstahl.....  | 27        |
| 3.3.3. Vergussmörtel zum Ausgleich der Längentoleranz der Druckstäbe .....             | 27        |
| 3.4. Versuchsdurchführung .....  | 28        |
| 3.4.1. Zeitlicher Ablauf.....  | 28        |
| 3.4.2. Versuchsaufbau .....  | 29        |
| 3.4.3. Versuchsablauf .....  | 30        |
| 3.4.4. Messsystem .....  | 32        |
| <b>4. Ergebnisse.....</b>  | <b>34</b> |
| 4.1. Typ RT .....  | 34        |
| 4.1.1. Last-Verformungsbeziehung .....   | 34        |
| 4.1.2. Rissentwicklung.....  | 36        |
| 4.2. Typ MT .....  | 40        |
| 4.2.1. Last-Verformungsbeziehung .....   | 41        |
| 4.2.2. Rissentwicklung.....  | 42        |
| 4.3. Vergleich der Versuchsserien .....  | 46        |
| 4.3.1. Vergleich SLS (Serviceability Limit State).....                                 | 46        |
| 4.3.2. Vergleich ULS (Ultimate Limit State).....                                       | 48        |
| <b>5. Nachrechnung und Interpretation .....</b>  | <b>51</b> |
| 5.1. Allgemeines .....   | 51        |
| 5.2. Nachrechnung der Traglasten .....   | 51        |
| 5.2.1. EC 2 Abschnitt 6.7 [5, 6].....  | 52        |
| 5.2.2. SIA 262 Abschnitt 4.2.1.8 [12] mit Ergänzungen Kaufmann [13] .....              | 53        |
| 5.2.3. EC 2 Abschnitt 3.1.9 [5, 6] mit Ergänzungen Kaufmann und Querdruck .....        | 54        |
| 5.2.4. SIA 262 Abschnitt 4.2.1.8 [12] mit Ergänzungen Kaufmann-Kollegger .....         | 55        |
| 5.2.5. EC 2 Abschnitt 3.1.9 [5, 6] mit Ergänzungen Kaufmann-Kollegger und Querdruck .. | 56        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 5.2.6.    | Traglast laut Schmidt-Thrö et al. [20]..... | 57         |
| 5.2.7.    | Zusammenfassung der Traglasten.....         | 58         |
| 5.2.8.    | ATENA 2D®.....                              | 60         |
| 5.3.      | Diskussion .....                            | 66         |
| 5.3.1.    | Traglastberechnungen .....                  | 66         |
| 5.3.2.    | Resümee Typ MT .....                        | 67         |
| 5.3.3.    | Ausblick .....                              | 67         |
| <b>6.</b> | <b>Zusammenfassung .....</b>                | <b>69</b>  |
|           | <b>Literaturverzeichnis.....</b>            | <b>71</b>  |
|           | <b>Abbildungsverzeichnis .....</b>          | <b>73</b>  |
|           | <b>Tabellenverzeichnis.....</b>             | <b>76</b>  |
| <b>A.</b> | <b>Geometrie und Bewehrungsführung.....</b> | <b>77</b>  |
| A.1.      | Schalplan .....                             | 77         |
| A.2.      | Bewehrungsplan.....                         | 78         |
| <b>B.</b> | <b>Materialparameter .....</b>              | <b>80</b>  |
| B.1.      | Materialprüfung Beton .....                 | 80         |
| B.2.      | Materialprüfung Vergussmörtel.....          | 84         |
| <b>C.</b> | <b>Typ RT.....</b>                          | <b>85</b>  |
| C.1.      | RT V01 .....                                | 85         |
| C.1.1     | Auswertung hydraulische Presse .....        | 85         |
| C.1.2     | Auswertung Aramis .....                     | 86         |
| C.1.3     | Händische Rissaufzeichnung.....             | 90         |
| C.2.      | RT V02.....                                 | 92         |
| C.2.1     | Auswertung hydraulische Presse .....        | 92         |
| C.2.2     | Auswertung Aramis .....                     | 93         |
| C.2.3     | Händische Rissaufzeichnung.....             | 98         |
| <b>D.</b> | <b>Typ MT.....</b>                          | <b>100</b> |
| D.1.      | MT V01 .....                                | 100        |
| D.1.1     | Auswertung hydraulische Presse .....        | 100        |
| D.1.2     | Auswertung Aramis .....                     | 101        |
| D.1.3     | Händische Rissaufzeichnung.....             | 102        |
| D.2.      | MT V02.....                                 | 104        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| D.2.1     | Auswertung hydraulische Presse .....   | 104        |
| D.2.2     | Auswertung Aramis .....  | 105        |
| D.2.3     | Händische Rissaufzeichnung .....   | 110        |
| D.3.      | Vergleich Versuchsserien .....   | 112        |
| <b>E.</b> | <b>Ergebnisse Nachrechnung .....</b>   | <b>114</b> |
| E.1.      | Berechnung EC 2, Abschnitt 6.7 [5, 6] .....  | 114        |
| E.2.      | Berechnung SIA 262 Abschnitt 4.2.1.8 [12] mit Ergänzungen Kauf. und Querdruck... 115 |            |
| E.3.      | Berechnung EC 2 [5, 6] mit Ergänzungen Kauf. und Querdruck .....                     | 118        |
| E.4.      | Berechnung SIA 262 4.2.1.8 [12] mit Ergänzungen Kauf.-Kol. und Querdruck.....        | 121        |
| E.5.      | Berechnung EC 2 [5, 6] mit Ergänzungen Kauf.-Kol. und Querdruck .....                | 124        |
| E.6.      | Berechnung laut Schmidt-Thrö et al. [20] .....                                       | 127        |



---

# 1. Einleitung

Stahlbeton ist der dominierende Baustoff in der gesamten Baubranche. Durch seine Vorteile in Bezug auf Dauerhaftigkeit, gutes Tragverhalten unter Druckbelastung und die Eigenschaft, dass sich das Material auch in gekrümmte Formen bringen lässt, ist es der vorherrschende Baustoff im Tunnelbau. 1855 wurden erste Entwicklungen durch den Bau eines Eisenbetonbootes durch Joseph-Louis Lambot gemacht und durch das Patent im Jahre 1865 von Joseph Monier, der Blumentöpfe aus Eisenbeton herstellte, wurden diese Entwicklungen weiter vorangetrieben. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurde der noch immer andauernde Höhepunkt in der Stahlbetonbauweise erreicht.

Seit Ende des 19. Jahrhunderts wurde Beton auch zum Ausbaumaterial im Tunnelbau. Hier werden die guten Eigenschaften bezüglich des Tragverhaltens unter Druckbelastung ausgenutzt, stellen aber in den Fugen – speziell den Längsfugen aufgrund der konstruktiv erforderlichen Querschnittsverjüngung – Probleme dar. Die Tunnelröhre wird durch einwirkende Druckkräfte in radialer Richtung durch das angrenzende Gebirgs- bzw. Bodenmaterial und ihr Eigengewicht belastet. Die Druckkräfte können im Verlauf der Längserstreckung der Tunnelröhre stark variieren. Tübbingfertigteile werden im Verlauf der Tunnelröhre an die örtlichen Gegebenheiten angepasst, bei sehr hochbelasteten Bereichen können auch Stahltübbinge verwendet werden.

## 1.1. Problemstellung

Die bestehenden Tübbingsystemen mit den unterschiedlichen Möglichkeiten zu einer Erhöhung der Tragfähigkeit haben Nachteile betreffend Dauerhaftigkeit, Einbauaufwand und anfallende Kosten. Es gibt noch Spielraum bei den bestehenden Tübbingsystemen für ressourcenschonendere bzw. tragfähigere Adaptionen. Die bereits adaptierten Systeme weisen zudem eine Schwachstelle bezüglich der Dauerhaftigkeit auf – im Speziellen hier der Widerstand gegen Korrosion – und ein negatives Verhalten im Brandfall. Im Vergleich zu den normalen Tübbingen bringt der Einsatz von Stahltübbingen außerdem einen negativen Einfluss auf die Kosten (=Mehrkosten).

Ein Problem stellt zudem der Bereich der Längsfuge dar. Längsfugen dienen dem Schluss des Tübbingtragrings und sind die Kontaktfläche Tübbing zu Tübbing. Hier werden die Schnittkräfte von Tübbing zu Tübbing übertragen. Die Längsfuge wird als eine Verjüngung des Querschnittes ausgebildet, um so die Wirkung eines Gelenkes zu simulieren, stellt dadurch aber eine Schwachstelle im Tunnelquerschnitt dar. Diese Querschnittsverjüngung verhindert das Abplatzen von Ecken und Kanten, die Bereiche die mit konstruktiver Bewehrung nicht abzudecken sind, aufgrund von möglichen Querschnittsverdrehungen.

## 1.2. Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung und der Vergleich der Tragfähigkeit von Tübbing-Längsfugen eines Tübbings wie er in der Realität zum Einsatz kommt sowie eines modifizierten Tübbings, der am Institut für Tragkonstruktionen Forschungsbereich Stahlbeton- und Massivbau entwickelt und patentiert wurde. Im Rückschluss kann bei gleichbleibender Traglast die Dicke der Tübbinge reduziert werden, was zu einer Ressourcenschonung führen kann. Des Weiteren ist eine höhere Dauerhaftigkeit und ein

höherer Widerstand gegen den Verlust der Tragfähigkeit im Brandfall in Bezug auf bereits veröffentlichte Möglichkeiten zur Erhöhung der Tragfähigkeit von Tübbing-Längsfugen anzustreben. Es wurden sowohl theoretische und auch experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um am Ende eine Empfehlung hinsichtlich des neu modifizierten Tübbings geben zu können.

Einführend werden in Kapitel 2 Informationen über den Tunnelbau und die Normenentwicklung wiedergegeben, die Berechnungsmodelle, die für die Berechnung der Tragfähigkeit der Längsfuge bekannt sind, aufgezeigt, bevor auf bereits adaptierte Tübbingsysteme eingegangen wird und anschließend die Idee der bis zur Betondeckung reichenden Druckstäbe und deren statische Wirkung adressiert.

Kern dieser Arbeit und auch die Grundlage für die Findung einer Conclusio stellen die in Kapitel 3 beschriebenen Versuche im Labor des Betonbauinstitutes der TU Wien dar. Der Versuchsaufbau bringt die Tübbinge unter einer reinen Druckbelastung bis zum Erreichen ihrer maximalen Traglast. Aus den verwendeten Messsystemen konnte dann eine Auswertung der Messdaten hinsichtlich der Stauchungen und der sich ergebenden Rissbilder unter den einwirkenden Kräften durchgeführt werden.

Die Nachrechnung und Modellierung der Versuche und schlussendlich die Interpretation der gewonnenen Ergebnisse bilden den Abschluss der Untersuchungen. Auf Basis der erhaltenen Informationen können Aussagen über die Empfehlung bezüglich der neu konzipierten Tübbinge getroffen werden bzw. Vorschläge für die weitere Vorgehensweise in der Erforschung der Tübbinge angeboten werden. Mit den vergleichenden Nachrechnungen und den Versuchsergebnissen kann auch ein Vorschlag für Adaptionen bereits vorhandener Rechenmodelle für die Berechnung der Tragfähigkeit von Tübbing-Längsfugen gemacht werden.

---

## 2. Grundlagen

In den Grundlagen wird ein kurzer Einblick in die Tunnelbauweise gewährt, die Entwicklung der genormten Literatur in Österreich und Europa aufgezeigt, die Entstehung erster Tübbingkonfigurationen erläutert und die Funktionsweise der Kraftübertragung über Spitzendruck erklärt, die im patentierten Tübbing der TU Wien zum Einsatz kommt.

### 2.1. Tunnelbau

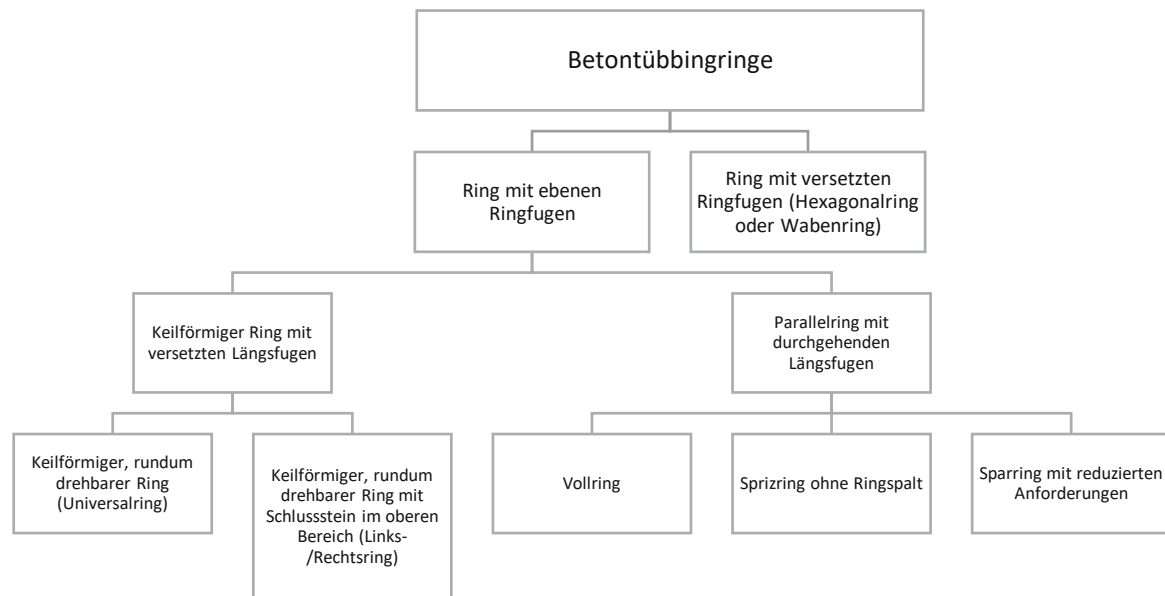
Durch die rasche Entwicklung der Eisenbahn im 19. Jahrhundert stieg der Bedarf an Tunnelbauwerken rasant an. Erst Ende des 19. Jahrhunderts kam Beton als Ausbaumaterial vor, davor wurden Blocksteinmauerungen und Ziegelmauerungen in deutscher Bauweise (Kernbauweise), belgischer Bauweise (Unterfangungsbauweise), englischer Bauweise (Längsträgerbauweise) und mittels alter österreichischer Bauweise (Ringbetriebsbauweise bzw. Multiple Drift Method) verwendet. Die Vortriebsleistung im 19. Jahrhundert war auf ca. 0,75 Meter/Tag beschränkt, da es noch keine Bohrmaschinen gab. Bereits nach Entwicklung der ersten Bohrmaschine konnte die Vortriebsleistung auf 3 Meter/Tag erhöht werden. Nach Ende des Zweiten Weltkrieges ging die Entwicklung des Tunnelbaus rasch voran. Die „Neue Österreichische Tunnelbauweise“ (NÖT), die zu den bergmännischen Tunnelbauweisen zählt, wurde weltweit angewendet. Das Konzept hinter der „NÖT“ besteht darin, dass das anstehende Gebirge um den Hohlraum durch Aktivierung eines Gebirgstragringes zum Mittragen herangezogen wird und somit zu einem Bauteil wird. Die Stützmaßnahmen müssen zeitnah nach dem Ausbruch angebracht werden, um eine Entspannung und Auflockerung des Gebirges zu verhindern. Wie oben erwähnt gibt es einen bergmännischen Vortrieb (zyklischer Vortrieb), der in einen Arbeitszyklus mit den Schritten Ausbruch, Sichern und Schuttern (Förderung des Ausbruchmaterials) eingeteilt werden kann. Im Unterschied zum zyklischen Vortrieb gibt es auch den maschinellen Vortrieb (kontinuierlicher Vortrieb). Hier wird eine kontinuierliche Herstellung des Tunnelquerschnittes mittels Tunnelbohrmaschinen gewährleistet – Ausbruch, Sichern und Schuttern in einem Arbeitsgang. Tübbinge kommen im maschinellen Vortrieb zum Einsatz. Bei oberflächennahen Tunneln können auch offene Bauweisen angewendet werden.

Durch das Einbringen eines Tunnels im Gebirge wird das ursprüngliche Gebirgsdruckverhältnis durch die Entstehung eines Hohlraumes gestört und nach Einbringen des Ausbaus stellt sich der sogenannte tertiäre Spannungszustand ein [1].

#### 2.1.1. Tunnelausbau mittels Tübbinge

Der Tunnelausbau mittels Tübbinge erfolgt während des maschinellen Vortriebs und bietet einen großen Vorteil, da sie sofort nach dem Einbau mit voller Tragfähigkeit zur Verfügung stehen. Die Tübbinge werden hinter der Druckwand im Schildbereich mittels Erektor zu einem Tübbingring zusammengebaut. Der Erektor in der Schildmaschine kann die Tübbinge mit Vakuumsaugplatten aufnehmen und in ihre Endposition bringen. Nach Einbringen der Tübbinge wird zuletzt noch der keilförmige Schlussstein eingesetzt, der den Ring schließt. Es gibt aber auch Tübbingkonstruktionen, die auf diesen Stein verzichten. Der verbleibende Hohlraum zwischen dem Tübbingring und dem anstehenden Gebirge wird

über Injektionsöffnungen im Schildschwanz oder durch Öffnungen im Tübbing kontinuierlich verpresst – mit Mörtel, Perlkies oder ähnlichem. Die Qualität des Tübbingringes kann durch die Fertigung im Betonfertigteilterwerk gut kontrolliert werden, jedoch gibt es geringe Nachteile bei variablen Querschnitten, bei dem fehlenden Schubverbund zum anstehenden Gebirge und bei der geringen Einflussmöglichkeit in Bezug auf die Abstimmung mit den jeweilig vortreffenden Gebirgsverhältnissen [1]. In **Abbildung 2.1** kann man einen Überblick bekommen, wie unterschiedlich und vielfältig die Tübbinge sein können [2].



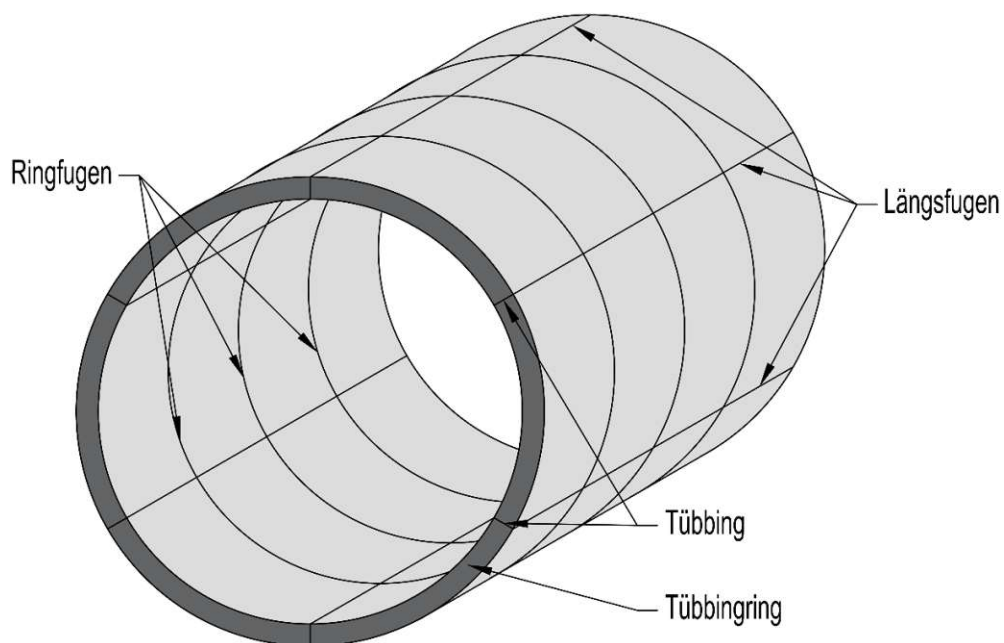
**Abbildung 2.1:** Einteilung der Betontübbinge in Ringtypen

Bei Anwendung des maschinellen Vortriebs besteht die Tunnelröhre in Tunnellängsrichtung aus hintereinander angeordneten Tübbingringen. Jeder dieser Tübbingringe besteht aus sechs bis zehn Tübbing die über den Umfang verteilt werden. Zwischen den einzelnen Tübbing befindet sich die Längsfuge und zwischen den einzelnen Tübbingringen die sogenannte Ringfuge (siehe **Abbildung 2.2**).

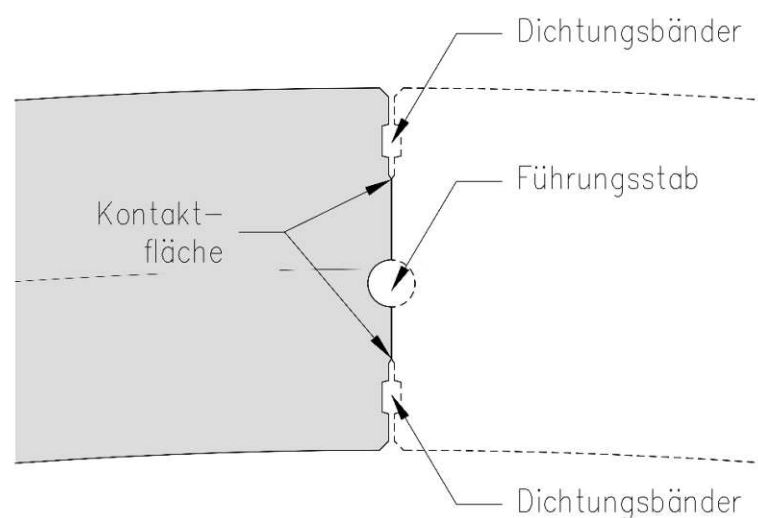
Durch das Vorhandensein von Fugen wird es nötig, Dichtungen in den Fugen zu positionieren, um die Dichtheit des Tunnels gegen anstehendes Grundwasser und Bodenfeuchte zu gewährleisten. Ringfugen und Längsfugen entstehen aus herstellungstechnischen Gründen. Da Tübbinge Fertigteiltersegmente sind, die zu einem Ring zusammengefügt werden, müssen unterschiedliche Toleranzen im Laufe der Errichtung eines Tunnelbauwerkes betrachtet und begrenzt werden, um ein einwandfreies Bauwerk herstellen zu können. Diese Toleranzen beginnen bei der Fertigung im Betonfertigteilterwerk mit den sogenannten Herstellungstoleranzen des Einzeltübbings und des Tübbingringes, des Weiteren gibt es Aufahrtoleranzen im maschinellen Vortrieb, Toleranzen im Einbau des Tübbingringes, aber auch Verformungen des Tübbingringes beim Vortrieb. Diese Toleranzanforderungen sind wichtig, um Verdrehungen und Ungenauigkeiten einzelner Tübbinge zu verhindern, die Aufnahme der Ringbelastung

aus Gebirgs- und Wasserdruck zu gewährleisten, die begrenzte Fläche zur Kraftübertragung durch Exzentrizitäten nicht zusätzlich zu verringern und um eine kostspielige Sanierung bei beschädigten Tübbinge zu verhindern.

In der Kontaktfläche Tübbing zu Tübbing – der Längsfuge – wirken Momente, Normalkräfte und Querkräfte, die durch äußere oder innere Lasten auf den Tübbingring entstehen. Durch die Querschnittsverjüngung im Bereich der Längsfugen dient dieser Bereich als eine Art Gelenk zwischen den einzelnen Tübbingen (siehe **Abbildung 2.3**). Zur Bemessung der Längsfugen sind die Betondruckspannungen und die daraus resultierenden Spaltzugspannungen zu beachten. Für die Übertragung der vorhandenen Betondruckspannung sind im Nahbereich der Längsfuge Leiterbewehrungen vorhanden. Eine Leiterbewehrung ist eine Matte aus verschweißten Quer- und Längsstäben, die den Aufbau einer mehraxialen Druckbeanspruchung im Beton durch seine umschnürnde Wirkung (Umschnürungsbewehrung) ermöglicht. Nähere Informationen zur Bemessung der Längsfuge können Kapitel 2.3 entnommen werden.



**Abbildung 2.2:** Schematische Skizze Tübbingsystem



**Abbildung 2.3:** Tübbing-Längsfuge

## 2.2. Normen und Richtlinien

Die Bemessungsnormen entwickelten sich im Laufe der Jahre immer wieder weiter. Einerseits sind die Randbedingungen und Ansprüche, die man an Bauwerke hat gestiegen, andererseits sind die Entwicklungen und Produktionen der Baustoffe verbessert worden und die Schwankungsbreite betreffend der Qualität konnte verringert werden. Eine der größten Veränderungen im Normenwesen war die Umstellung vom deterministischen Sicherheitskonzept auf das semiprobabilistische Sicherheitskonzept im Jahr 1995. Seit diesem Zeitpunkt findet man auf der Beanspruchungs- und auf der Widerstandsseite Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma$ .

### 2.2.1. Einwirkungsseite

Kräfte, die von außen auf den Tunnel wirken, können aus den unterschiedlichsten Bereichen kommen und sind teilweise sehr projektspezifisch. Grundsätzlich kann man von Gebirgslasten, Wasserdruck, Quell- und Schwelldruck sowie Verkehrslasten, die Obertage wirken, berücksichtigen. Einwirkungen die im Inneren der Tunnelröhre wirken, sind überwiegend die Verkehrslasten (Straßen- und/oder Eisenbahnlasten) im Tunnelquerschnitt. Des Weiteren wirken Temperatureinflüsse sowie Druck- und Sogbelastung. Außergewöhnliche Einwirkungen und veränderliche Einwirkungen aus den Bauzuständen sind auch miteinzubeziehen.

Als wichtigste veränderliche Einwirkung zählt die Wirkung des Verkehrs, der im Tunnel und auf Verkehrswegen über dem Tunnel verläuft. Die Lastansätze für diese Einwirkungen – ob Straßen- oder Eisenbahnverkehr – können der ÖNORM EN 1991-2: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken [3] und im dazugehörigen nationalen Anhang der ÖNORM B 1991-2: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken – nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1991-2 und nationale Ergänzungen [4] entnommen werden.

### 2.2.2. Widerstandsseite

Die fortlaufende Weiterentwicklung der Produktionsqualität und das Vorantreiben der Forschung im Bereich der Baustoffe führte im Laufe der Zeit auch zu etlichen Normenweiterentwicklungen bzw. Normänderungen. Generell gelten für die Widerstände von Tübbingern die Materialkenngrößen und Teilsicherheitsbeiwerte lt. Norm ÖNORM EN 1992-1-1: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau [5] beziehungsweise die Spezifikationen im nationalen Anhang der ÖNORM B 1992-1-1: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau – Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1992-1-1, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen [6]. In **Abbildung 2.4** bekommt man einen geschichtlichen Überblick der normativen Regelung auf der Widerstandsseite.

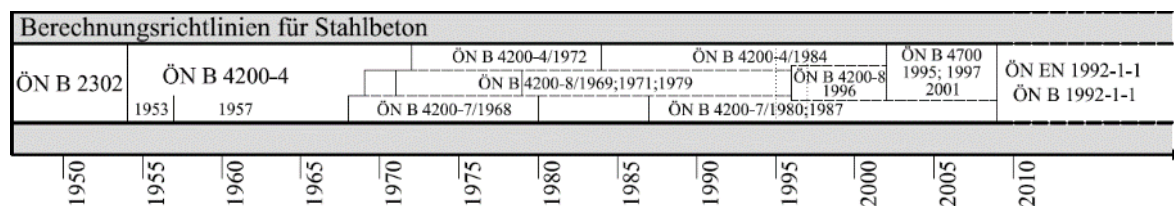


Abbildung 2.4: Normenentwicklung der österreichischen Bemessungsnormen für Stahlbeton ab 1950, Ausschnitt entnommen aus [7]

### 2.2.3. Richtlinien

Für Tübbinge wird bei der Berechnung auf den EC2 [5][6] verwiesen, es gibt aber etliche Richtlinien, die für die Planung, Berechnung und Ausführung von Tübbingen verwendet werden. In Deutschland brachte der Deutsche Ausschuss für unterirdisches Bauen (DAUB) im Oktober 2013 die Richtlinie „Empfehlungen für den Entwurf, die Herstellung und den Einbau von Tübbingringen“ [2] heraus. Zusätzlich gibt es in Deutschland von der Deutschen Bahn die Richtlinie „Ril 853 – Richtlinie Eisenbahntunnel planen, bauen und in Stand halten“ [8] und vom Bundesministerium für Verkehr die zusätzlichen technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Straßentunneln (ZTV-ING) – Teil 5, Tunnelbau [9]. Die österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik (ÖVBB) brachte im August 2009 die Richtlinie „Tübbingsysteme aus Beton“ [10] heraus und gibt damit einen umfangreichen Überblick von den Einwirkungen über die Berechnung und Bemessung der Tübbinge bis zu geometrischen Toleranzen und Imperfektionen. In der Richtlinie sind auch Anforderungsklassen an das Ausbausystem angegeben, die eine Begrenzung der Rissbreite verlangen und somit auch als Kriterium für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit dienen. In der **Abbildung 2.5** ist die Tabelle aus der Richtlinie für „Tübbingsysteme aus Beton“ [10] angeführt.

| Anforderungsklasse | Kurzbezeichnung    | Beschreibung der Betonoberfläche  | Beurteilung der Feuchtigkeitsstellen   | Zulässige Fehlstellen   | Zulässige Rissbreite im eingebauten Zustand | Anforderung an die Fuge, max. Wasserzutritt                                      | Anwendungsbeispiele   |
|--------------------|--------------------|---|--|---|---|--|---|
| AT1                | weitgehend trocken | Visuell einzelne feststellbare Feuchtigkeitsstellen (max. matte Dunkelfärbung)              | Nach Berühren mit der trockenen Hand (flächenhaft) sind an der Hand keine Wasserspuren zu erkennen.                        | 1 % der Bauteiloberfläche als Feuchtigkeitsstellen zulässig. Wasserfahnen, die nach max. 20 cm abtrocknen.                      | 0,2 mm                                      | dicht  | Einschaliger Ausbau mit hoher Dichtigkeitsanforderung. Portalbereiche gem. Richtlinie Innenschalenbeton     |
| AT2                | leicht feucht      | Visuell und manuell feststellbare einzelne glänzende Feuchtigkeitsstellen an der Oberfläche | Keine Mengemessung von ablaufendem Wasser möglich. Nach Berühren mit der trockenen Hand sind daran Wasserspuren erkennbar. | 1 % der Bauteiloberfläche als Feuchtigkeitsstelle zulässig. Einzelne kurze Wasserfahnen, die an der Betonoberfläche abtrocknen. | 0,25 mm                                     | feucht, kein rinnendes Wasser in der gesamten Ringfuge oder einzelnen Längsfugen | Einschaliger Ausbau mit normaler Dichtigkeitsanforderung. Straßen- und Eisenbahntunnel (ohne Portalbereich) |
| AT3                | feucht             | Tropfenweiser Wasseraustritt mit Bildung von langen Wasserschlieren                         | Das ablaufende Wasser kann in Auffanggefäßen mengenmäßig gemessen werden.  | Die max. Wassermenge pro Fehlstelle darf 0,2 l/Std nicht überschreiten.   | 0,3 mm                                      | Einzelstellen tropfend   | Einschaliger Ausbau ohne Dichtigkeitsanforderung oder zweischaliger Ausbau                                  |
| AT4                | nass               | Rinnende Wasseraustrittsstellen   | Das ablaufende Wasser kann in Auffanggefäßen mengenmäßig gemessen werden.  | Die max. Wassermenge darf die Funktion des Bauwerks nicht beeinträchtigen.  | 0,3 mm                                      | Stellen rinnend  | Einschaliger Ausbau ohne Dichtigkeitsanforderung oder zweischaliger Ausbau als drainiertes System           |

Abbildung 2.5: Definition und Beschreibung der Anforderungsklassen an das Ausbausystem [10]

## 2.3. Berechnungsansätze für die Tragfähigkeit von Tübbing-Längsfugen

Die Bemessung in Quer- und Längsrichtung der Tübbingschale hat nach dem Eurocode 2 [5, 6] zu erfolgen. Es sind sowohl die Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit (siehe **Abbildung 2.5**) als auch die Anforderungen an die Tragfähigkeit einzuhalten. Für ein homogen anzusetzendes Festgestein kann man die Berechnungsverfahren der Finiten Elemente Methode (FEM) oder die Finite Differenzen Methode (FDM) anwenden. Bei Gebirgsverhalten, das maßgeblich von Schicht- und Klufflächen beeinflusst wird, ist eine Berechnung mit geeigneten Programmen (z.B. Block Stability Programm) zielführender [8]. Maßgebend für die Bemessung sind die Nachweise in den Tübbing-Längsfugen, die eine Beschränkung der Teilflächenpressung aufgrund der zulässigen Betondruckspannung vorsehen.

Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt vor allem auf der Bemessung der Längsfuge und der Möglichkeit zur Erhöhung der Betondruckfestigkeit aufgrund mehraxialer Druckbeanspruchung.

### 2.3.1. EC 2 Abschnitt 6.7 [5, 6]

Im Bereich der Tübbing-Längsfuge kommt es zu einer Teilflächenpressung ausgelöst durch eine vorwiegend ebene Lastausbreitung. Der Bemessungswert der Druckspannung wird im Allgemeinen – unter Berücksichtigung, dass dreiaxialer Druck sichergestellt ist – auf das 3-fache der Betondruckfestigkeit beschränkt. Hierbei wird die günstige Umschnürungswirkung der Bewehrung nicht berücksichtigt. Betrachtet man nun den vorliegenden Fall der Teilflächenbelastung (siehe **Abbildung 2.6**) kann man den Quadratwurzelsatz für bewehrte Körper anwenden, der erstmals 1959 von Spieth [11] vorgestellt wurde.

$$F_{Rdu,EC2} = A_{c0} \cdot f_{cd} \cdot \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} \leq 3,0 \cdot f_{cd} \cdot A_{c0} \quad (1)$$

mit

$f_{cd}$  Betondruckfestigkeit

$A_{c0}$  die Belastungsfläche

$A_{c1}$  die maximale rechnerische Verteilungsfläche mit geometrischer Ähnlichkeit zu  $A_{c0}$

Gleichung (1) ist der derzeit gültige normative Ansatz. Die Pressungen werden auf das Dreifache der Betondruckfestigkeit, zur Vermeidung von übermäßigen Verformungen bzw. der Vermeidung von lokalen Betonausbrüchen, begrenzt. Die Belastungs- und Verteilungsfläche müssen eine geometrische Kompatibilität aufweisen um den Berechnungsansatz anwenden zu dürfen – die Bedingung ist in **Abbildung 2.6** ersichtlich. Des Weiteren muss für die auftretenden Querkraftkräfte ausreichend Bewehrung vorhanden sein, um eine mehraxiale Druckbeanspruchung aufbauen zu können – wäre diese nicht vorhanden würde vor Erreichen der erhöhten Betondruckfestigkeit der Körper versagen, da der Beton seitlich aufgrund von Querkraft versagen würde.





### 2.3.3. SIA 262 Abschnitt 4.2.1.8 [12]

In der SIA 262: Betonbau – Ergänzende Festlegungen [12] kann bei Vorhandensein einer dreiachsigen Druckbeanspruchung, wie es im Tübbing der Fall ist, der Bemessungswert der Betondruckspannung für Normalbeton mit dem Beiwert  $k_c$  erhöht werden.

$$k_c = 1 - 4 \cdot \frac{\sigma_1}{f_{cd}} \leq 4 \quad (2)$$

mit

$\sigma_1$  Manteldruck

Der (negative) Manteldruck wird durch die Umschnürungswirkung der Bewehrung hervorgerufen (siehe **Abbildung 2.8**). In Bauteilen, die als Druckglied wirken, kann man davon ausgehen, dass die Umschnürungsbewehrung die Fließgrenze erreicht. Der vorhandene Manteldruck in Rechteckquerschnitten beträgt dann:

$$\sigma_1 = -\omega_c \cdot f_{cd} \cdot \left(1 - \frac{s_c}{a_c}\right) \cdot \left(1 - \frac{s_c}{b_c}\right) \quad (3)$$

mit

$$\omega_c = \min \begin{cases} \omega_y = \frac{A_{Sy} \cdot f_{sd}}{a_c \cdot s_c \cdot f_{cd}} \\ \omega_z = \frac{A_{Sz} \cdot f_{sd}}{b_c \cdot s_c \cdot f_{cd}} \end{cases} \quad (4)$$

$s_c, a_c, b_c$  Siehe **Abbildung 2.8**

$A_{Sy}$  Bewehrungsmenge in y-Richtung

$A_{Sz}$  Bewehrungsmenge in z-Richtung

$f_{sd}$  Festigkeit Bewehrungsstahl

Bei Berücksichtigung des Beiwerts  $k_c$  darf nur der Beton innerhalb der Umschnürungsbewehrung angesetzt werden, da die Betondeckung abplatzen kann.

Neben der Erhöhung der Festigkeit durch das Einlegen einer Umschnürungsbewehrung kann auch duktileres Verhalten des Druckgliedes erreicht werden. Vorzeitiges Ausknicken der Längsbewehrung ist mittels einer engen Verbügelung zu verhindern.

$$F_{Rdu,SIA} = A_c \cdot f_{cd} \cdot k_c \quad (5)$$

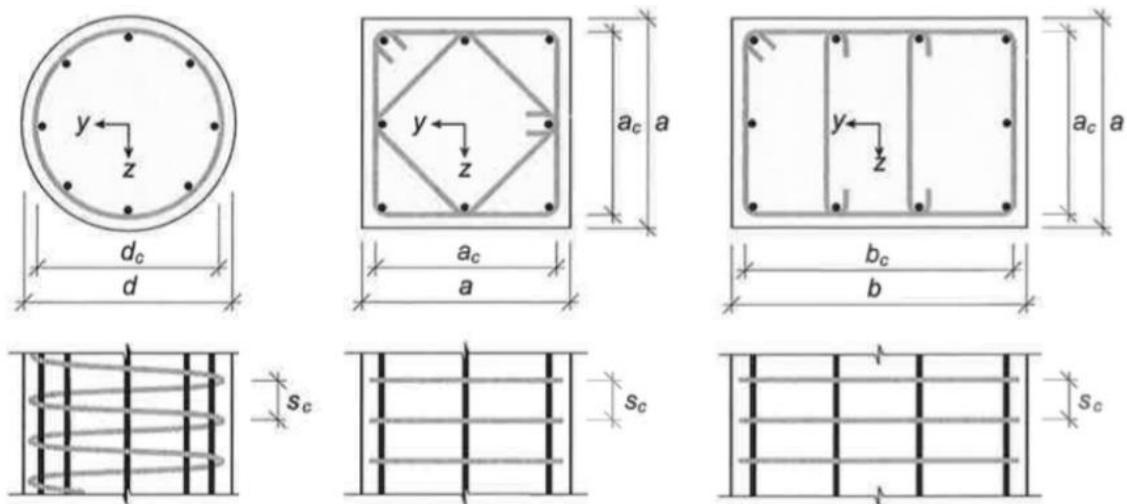


Abbildung 2.8: Druckglieder mit Umschnürungswirkung, Figur 14 [12]

Die Formalismen in der SIA 262 [12] gelten für Druckglieder wie z.B. Stützen in Bereichen, in denen die Bernoulli-Hypothese (Ebenbleiben der Querschnitte) ihre Anwendung findet. In **Abbildung 2.9** ist der Übergang vom Bernoulli- zum Diskontinuitätsbereich ersichtlich. Der Bereich der Längsfuge im Tübbing stellt aber einen Diskontinuitätsbereich dar und die Formeln müssen angepasst werden. Diese Anpassung wurde durch Herrn Professor Kaufmann in einem Gutachten getätigt [13] und wird im nächsten Kapitel näher erläutert.

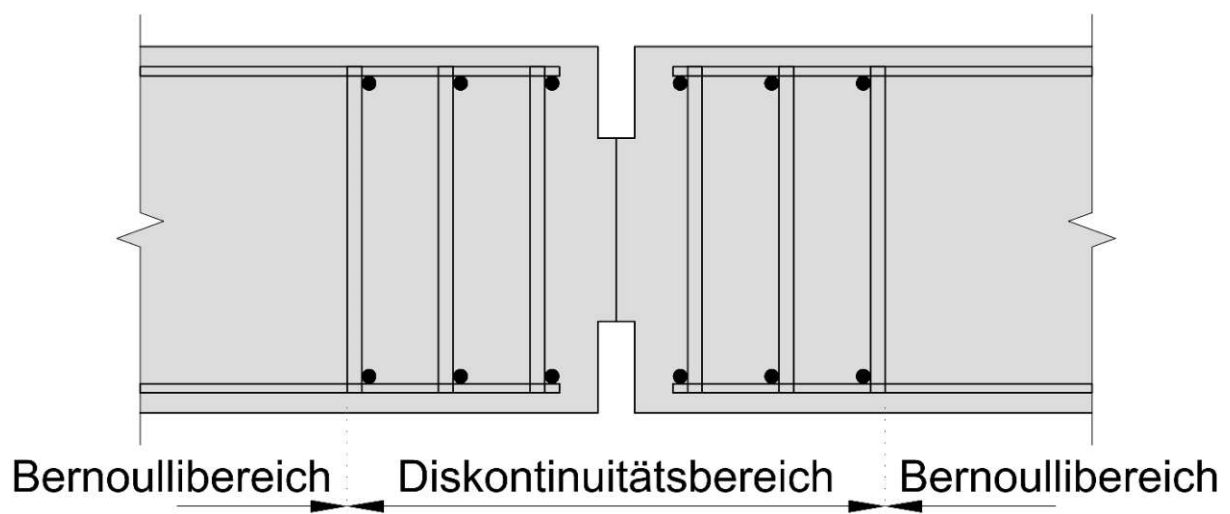


Abbildung 2.9: Bernoulli- und Diskontinuitätsbereiche im Bereich der Tübbing-Längsfuge

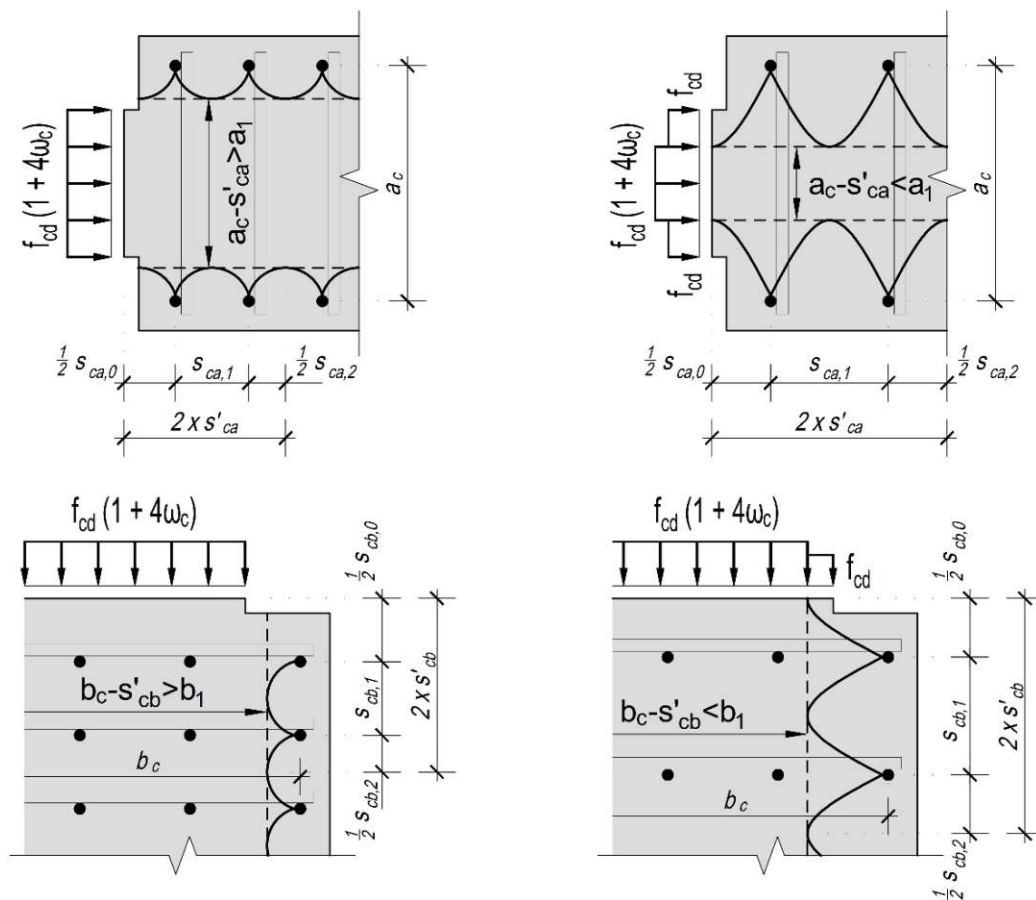
#### 2.3.4. SIA 262 Abschnitt 4.2.1.8 mit Ergänzungen Kaufmann [13]

Wie in Kapitel 2.3.3 bereits erwähnt, kann die Betondruckfestigkeit um den Faktor  $k_c$  bei allseitigem Querdruck  $\sigma_1$  erhöht werden. Dieser Ansatz ist bereits seit der Anfangszeit des Stahlbetons gültig und besagt, dass die Druckfestigkeit bei allseitigem Querdruck um das Vierfache der betragsmäßig kleinsten Querdruckspannung erhöht werden darf. Um nun diesen Diskontinuitätsbereich, wie es bei Tübbing-Längsfugen der Fall ist, bemessen zu können, mussten die Gleichungen nach SIA 262 Abschnitt 4.2.1.8 [12] noch geringfügig angepasst werden.

Diese Anpassung erfolgte durch Herrn Professor Kaufmann von der ETH Zürich anhand seines Gutachtens [13]. Hier wurde einerseits die Berechnung von  $s_c$  adaptiert, um Umschnürungsbewehrungen die keinen konstanten Abstand zueinander aufweisen, berücksichtigen zu können und andererseits musste aufgrund der Querschnittsverjüngung die Berechnung der umschnürten Fläche angepasst werden.

In **Abbildung 2.10** ist die Definition der Leiterabstände in Längs- und Querrichtung im Bereich einer Tübbing-Längsfuge ersichtlich. Die beschriebenen Abstände,  $s_{ca,1}$  und  $s_{cb,1}$  bzw.  $s_{ca,2}$  und  $s_{cb,2}$  sind die Abstände von der ersten zur zweiten bzw. von der zweiten zur dritten Leiterbewehrung. Der Abstand  $s_{ca,0}$  und  $s_{cb,0}$  definieren den Leiterabstand über die Fuge hinweg zur ersten Leiterbewehrung des angrenzenden Tübbings. Aus Gleichung (6) und (7) berechnet man sich die effektiven Leiterabstände  $s'_{cb}$  und  $s'_{ca}$ , die anschließend das  $s_c$  im Formelapparat der SIA 262 [12] ersetzen können.

Die zweite wichtige Adaption ist die Einführung der Fallunterscheidung der wirksam umschnürten Fläche. Aufgrund der verkleinerten Querschnittsfläche im Vergleich zum Regelbereich, kann es bei bestimmten Leiterabständen dazu kommen, dass der umschnürte Bereich größer als die Kontaktfläche der Tübbing-Längsfuge ist. Aus diesen Überlegungen heraus müssen zwei Fälle untersucht werden. Einerseits der Fall wenn die umschnürte Fläche größer als die Kontaktfläche ist (siehe **Abbildung 2.10** links) und andererseits wenn die umschnürte Fläche kleiner als die Kontaktfläche ist (siehe **Abbildung 2.10** rechts). Die Berücksichtigung der Fälle findet sich in Gleichung (12) mittels zwei eingeführten Faktoren wieder.



**Abbildung 2.10:** Veranschaulichung der wirksam umschnürten Fläche und der Fallunterscheidung. Links: vollständig wirksam umschnürte Fläche; Rechts: nur teilweise wirksam umschnürte Fläche

$$s'_{cb} = \frac{0,5 \cdot s_{cb,0} + 1,0 \cdot s_{cb,1} + 0,5 \cdot s_{cb,2}}{2} = \frac{0,5}{2} \cdot s_{cb,0} + \frac{1,0}{2} \cdot s_{cb,1} + \frac{0,5}{2} \cdot s_{cb,2} \quad (6)$$

$$s'_{ca} = \frac{0,5 \cdot s_{ca,0} + 1,0 \cdot s_{ca,1} + 0,5 \cdot s_{ca,2}}{2} = \frac{0,5}{2} \cdot s_{ca,0} + \frac{1,0}{2} \cdot s_{ca,1} + \frac{0,5}{2} \cdot s_{ca,2} \quad (7)$$

Im Folgenden wird der Formalismus erläutert, wie man ausgehend von den Gleichungen lt. SIA [12] mit der Fallunterscheidung zu einer neuen Gleichung für die Berechnung der Tragfähigkeit der Tübbing-Längsfugen gelangt.

$$f_{c3d} = k_c \cdot f_{cd} = \left(1 - 4 \cdot \frac{\sigma_1}{f_{cd}}\right) \cdot f_{cd} = f_{cd} - 4 \cdot \sigma_1 \quad (8)$$

mit  $k_c$  aus Gleichung (2)

$$N_{Rd} = f_{c3d} \cdot a_c \cdot b_c \quad (9)$$

$$N_{Rd} = (f_{cd} - 4 \cdot \sigma_1) a_c \cdot b_c \quad (10)$$

$$N_{Rd} = \left[ f_{cd} + 4 \cdot \omega_c \cdot f_c \cdot \left(1 - \frac{s_c}{a_c}\right) \cdot \left(1 - \frac{s_c}{b_c}\right) \right] \cdot a_c \cdot b_c \quad (11)$$

Betrachtung einer Fläche mit  $a_1 < a_c$  und  $b_1 < b_c$  und der Fallunterscheidung in **Abbildung 2.10**

$$F_{Rdu,SIA,Kauf.} = \left[ f_{cd} + 4 \cdot \omega_c \cdot f_c \cdot \min \left\{ \frac{1}{a_c - s'_{ca}} \cdot \min \left\{ \frac{1}{b_c - s'_{cb}} \right\} \right\} \right] \cdot a_1 \cdot b_1 \quad (12)$$

$$F_{Rdu,SIA,Kauf.} = f_{cd} \cdot a_1 \cdot b_1 + 4 \cdot \omega_c \cdot f_{cd} \cdot \min \left\{ \frac{a_1}{a_c - s'_{ca}} \cdot \min \left\{ \frac{b_1}{b_c - s'_{cb}} \right\} \right\} \quad (13)$$

In der Gleichung (6) und (7) sieht man, dass der Abstand der ersten Leiterbewehrung über die Fuge zum ersten Leiter des angrenzenden Tübbings mit 25% (=0,5/2), der Abstand zwischen der ersten und der zweiten Leiter mit 50% (=1,0/2) und der Abstand zwischen zweiter und dritter Leiter mit 25% (=0,5/2) in die Berechnung miteinbezogen wird.

### 2.3.5. EC 2 Abschnitt 3.1.9 [5], mit Ergänzungen Kaufmann und Querdruck

Die Fallunterscheidung, die Herr Professor Kaufmann in Kapitel 2.3.4 anwendet, wird auch im folgenden Fall verwendet. Hier wird jedoch die Fallunterscheidung bereits direkt in eine wirksame Fläche  $A_{c,3d}$  umgerechnet. Der Grund hierfür wird in diesem Kapitel noch näher erläutert.

$$A_{c,3d} = a_1 \cdot b_1 \cdot \min \left\{ \frac{1}{a_c - s'_{ca}} \cdot \min \left\{ \frac{1}{b_c - s'_{cb}} \right\} \right\} \quad (14)$$

Im EC 2 [5] unter Abschnitt 3.1.9 besteht die Möglichkeit, die Betondruckfestigkeit unter mehraxialer Druckbeanspruchung zu erhöhen. Es wird die Spannungs-Dehnungs-Linie modifiziert und die Festigkeiten und Dehnungen werden erhöht. Die neu modifizierte Arbeitslinie kann **Abbildung 2.11** entnommen werden.

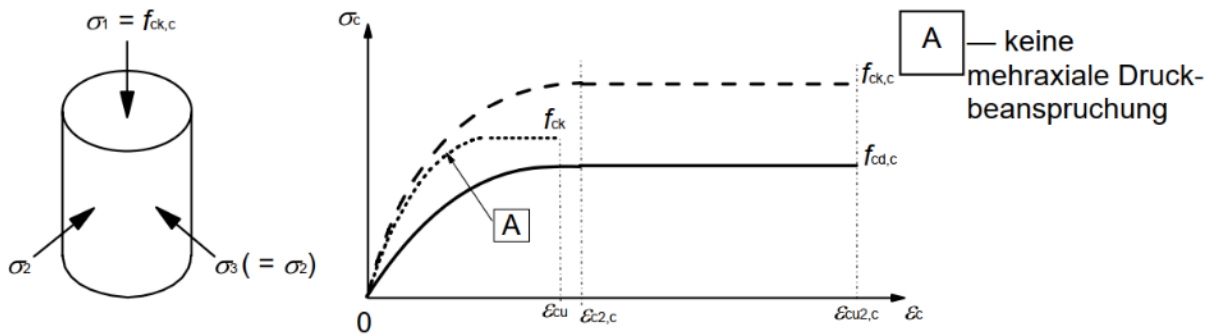


Abbildung 2.11: Spannungs-Dehnungs-Linie für Beton unter mehraxialen Druckbeanspruchungen, Bild 3.6 ÖNORM EN 1992-1-1 [5]

Durch die Veränderung der Arbeitslinie von Beton werden jedoch die anderen Baustoffeigenschaften nicht beeinflusst. Wenn genauere Angaben fehlen, können folgende Gleichungen für die erhöhte Betondruckfestigkeit angenommen werden.

$$f_{ck,c} = f_{ck} \cdot \left( 1,0 + 5,0 \frac{\sigma_2}{f_{ck}} \right), \quad \text{für } \sigma_2 \leq 0,05 \cdot f_{ck} \quad (15)$$

$$f_{ck,c} = f_{ck} \cdot \left( 1,125 + 2,5 \frac{\sigma_2}{f_{ck}} \right), \quad \text{für } \sigma_2 > 0,05 \cdot f_{ck} \quad (16)$$

mit  $\sigma_2 = -\sigma_1$  lt. Gleichung (17) – da im EC 2 [5] keine Angaben über den Querdruck vorhanden sind.

$$\sigma_1 = -\omega_c \cdot f_{cd} \quad (17)$$

Gleichung (17) geht aus Gleichung (3) hervor, jedoch dürfen die beiden Abminderungsfaktoren hier nicht berücksichtigt werden, da mechanisch gesehen nicht der Querdruck, sondern die Querschnittsfläche  $A_c$ , abgemindert wird. Diese Herangehensweise beschreibt das Verhalten, das zum Übertragen der Betondruckspannungen nur eine Teilfläche betrachtet werden darf. Bei der Berechnung nach SIA 262 [12] kommt es dadurch aber zu keinem Fehler, da die Abminderung in der Gleichung (13) beinhaltet ist. Für die Ermittlung der erhöhten Betondruckfestigkeit nach EC 2 [5] Abschnitt 3.1.9 muss jedoch der gesamte Querdruck, der durch die Umschnürungsbewehrung aufgebaut werden kann, eingesetzt werden. Das kann durch den Wegfall der Abminderungsfaktoren gewährleistet werden.

Die Tragfähigkeit der Tübbing-Längsfuge lässt sich nun wie folgt berechnen.

$$F_{Rdu,EC2,Kauf.} = f_{cd} \cdot (a_1 \cdot b_1 - A_{c,3d}) + f_{cd,c} \cdot A_{c,3d} \quad (18)$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck,c}}{\gamma_c} \cdot \alpha_{cc} \quad (19)$$

### 2.3.6. SIA 262 Abschnitt 4.2.1.8 mit Ergänzungen Kaufmann-Kollegger

Nach der Veröffentlichung von Herrn Professor Kaufmann [13] wurde durch Untersuchung von Herrn Professor Kollegger die Annahmen über die Wichtigkeit der Leiterabstände in den Tübbing, die zur Umschnürung dienen, von großer Bedeutung.

Die Wichtigkeit der Leiterabstände, wie sie in der Betrachtung in [13] angeführt ist, wurde adaptiert, da die wirksam umschnürte Fläche zu groß abgebildet wird. Dem Abstand über die Längsfuge wird eine größere Wichtigkeit zuteil, da es in diesem Bereich keine Bewehrung gibt, die eine Umschnürungswirkung hervorrufen könnte. Diese grundlegenden Gedanken können **Abbildung 2.12** entnommen werden. Daraufhin wurde eine Gleichung für die Wichtigkeit der Leiterabstände in den bereits vorhandenen Formelapparat eingeführt.

$$\underline{s}'_{ca} = \frac{s_{ca,0} + 0,5 \cdot s_{ca,1}}{1,5} = \frac{1}{1,5} \cdot s_{ca,0} + \frac{0,5}{1,5} \cdot s_{ca,1} \quad (20)$$

$$\underline{s}'_{cb} = \frac{s_{cb,0} + 0,5 \cdot s_{cb,1}}{1,5} = \frac{1}{1,5} \cdot s_{cb,0} + \frac{0,5}{1,5} \cdot s_{cb,1} \quad (21)$$

In Gleichungen (20) und (21) sieht man, dass der Abstand zwischen der ersten Leiterbewehrung und der ersten Leiter des angrenzenden Tüblings mit 66,6% (=1/1,5) und der Abstand zwischen der ersten und der zweiten Leiter mit 33,3% (=0,5/1,5) in die Berechnung miteinbezogen wird.

Mit der neuen Interpretation von  $\underline{s}'_{cb}$  und  $\underline{s}'_{ca}$  wurde der Gleichung (13) – die bereits in Kapitel 2.3.4 hergeleitet wurde – durch die neue wirksame umschnürte Fläche eine neue mechanische Bedeutung zugrunde gelegt.

$$F_{Rdu,SIA,K+K} = f_{cd} \cdot a_1 \cdot b_1 + 4 \cdot \omega_c \cdot f_{cd} \cdot \min \left\{ a_c - \underline{s}'_{ca}, \min \left\{ b_c - \underline{s}'_{cb}, \right. \right. \quad (22)$$

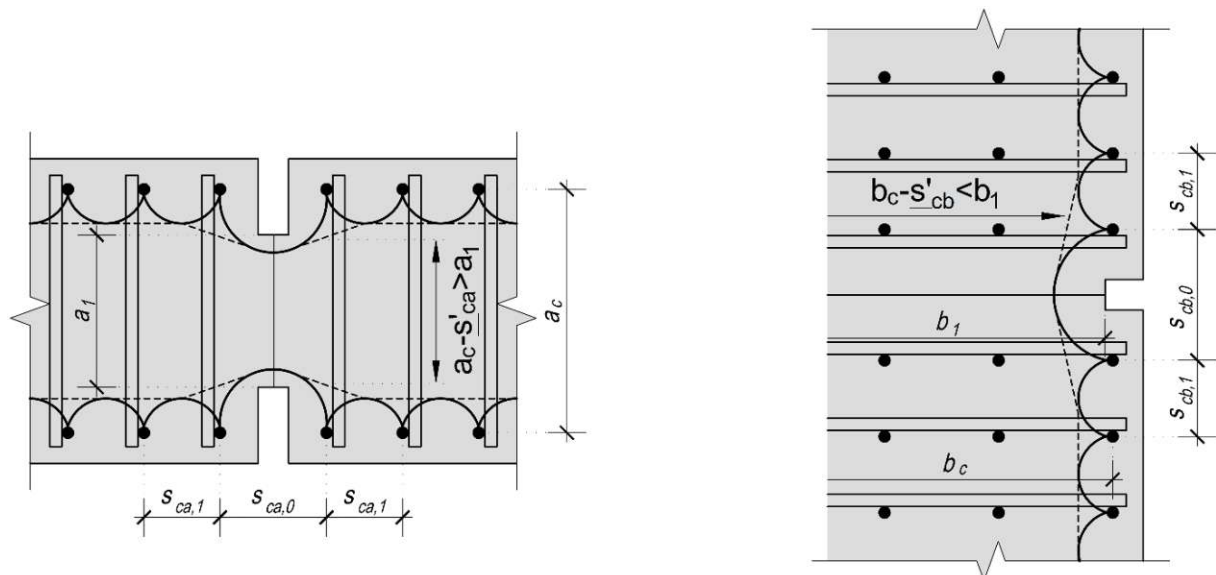


Abbildung 2.12: Skizze zur Wichtigkeit der Leiterabstände nach Kaufmann+Kollegger

### 2.3.7. EC 2 Abschnitt 3.1.9 [5] mit Ergänzungen Kaufmann-Kollegger und Querdruck

Analog wie im vorangegangenen Unterkapitel bekamen auch die Gleichungen aus Kapitel 2.3.4 mit den Überlegungen und der Neuinterpretation des Abstandes von  $\underline{s}'_{cb}$  und  $\underline{s}'_{ca}$  aus **Abbildung 2.12** eine neue mechanische Bedeutung.

$$A_{c,3d} = a_1 \cdot b_1 \cdot \min \left\{ \frac{1}{a_c - \underline{s}'_{ca}} \cdot \min \left\{ \frac{1}{b_c - \underline{s}'_{cb}} \right. \right. \quad (23)$$

$$F_{Rdu,EC2,K+K} = f_{ck} \cdot (a_1 \cdot b_1 - A_{c,3d}) + f_{ck,c} \cdot A_{c,3d} \quad (24)$$

mit  $f_{ck,c}$  aus den Gleichungen (15) und (16).

### 2.3.8. Berechnung der Tragfähigkeit laut Schmidt-Thrö et al. [20]

Im Artikel „Experimente zur Teilflächenpressung mit vorwiegend ebener Belastung“ [20] wurden verschiedene Versuche und Nachrechnungen unter Verwendung des Quadratwurzelansatzes [11] und des Kubikwurzelansatzes von Bauschinger 1876 [21] durchgeführt.

Das Ergebnis für den maschinellen Tunnelbau und die Bemessung von Tübbing-Längsfugen war folgende Gleichung:

$$F_{Rdu} = A_{c0} \cdot f_{cd} \cdot (1 + \Delta_{quad}); \text{ mit } \Delta_{quad} = \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} - 1 \quad (25)$$

Die Anwendung von Gleichung (25) ist bei Tübbing erlaubt, deren Spaltzugbewehrung so ausgebildet wird, dass sich eine Umschnürungswirkung einstellen kann. Im vorliegenden Fall geht man von einer Leiterbewehrung aus, da diese heutzutage zum Einsatz kommen und aufgrund ihrer steifen Verankerung zu einem günstigen, lokalen dreiachsigen Spannungszustand mit Umschnürung führen. Der Ansatz der Erhöhung der Betondruckfestigkeit liegt hier über dem Quadratwurzelansatz [11] und verzichtet auf eine geometrische Abhängigkeit wie sie in [5] festgelegt wurde.

Sollten konventionelle, geschlossene Bügel zur Umschnürung angewendet werden, muss der Ansatz des Erhöhungsfaktors reduziert werden (siehe Gleichung (26)). Dieser Erhöhungsfaktor entspricht in etwa dem Kubikwurzelansatz [21].

$$F_{Rdu} = A_{c0} \cdot f_{cd} \cdot (1 + 0,65 \cdot \Delta_{quad}) \quad (26)$$

$$0,65 \cdot \Delta_{quad} \cong \text{Kubikwurzelansatz} = \sqrt[3]{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} \quad (27)$$

## 2.4. Bekannte Möglichkeiten zur Erhöhung der Tragfähigkeit von Tübbing-Längsfugen

Wenn in hochbelasteten Zonen die maximale Tragkraft der Tübbinge überschritten wird, kommt es zum Versagen – ein besonders kritischer Punkt ist der Bereich der Längsfugen. Hier wird der Querschnitt



verjüngt, um ein Gelenk auszubilden und die Randbereiche vor Spannungsspitzen und Betonabplatzungen zu schützen. Aufgrund dieser Verjüngung entstehen sehr hohe Spannungen in der Kontaktfläche, die zur Überschreitung der zulässigen Betondruckspannungen führen können. Es ist möglich, in diesem Bereich Tübbinge aus Stahl zu verwenden. Diese haben jedoch einen erheblichen Kostennachteil. Eine weitere Möglichkeit wäre es, die Wandstärke der Tübbinge zu vergrößern. Dadurch würde auch der Bereich in der Längsfuge vergrößert und die Flächenpressung in diesem Bereich verringert werden. Diese Möglichkeit ist wiederum mit einem Kostennachteil verbunden, da die Vergrößerung der Wandstärke eine Vergrößerung des Tunnelquerschnittes zur Folge hat und die Kosten des Tunnelvortriebes erhöhen würde.

In der Vergangenheit wurden daher bereits zahlreiche Vorschläge ausgearbeitet, um die maximal aufnehmbare Druckkraft zwischen zwei Tübbingungen in der Längsfuge steigern zu können, ohne einen zu großen Faktor in den Kosten zu verursachen. Im Folgenden werden einige dieser Vorschläge näher erläutert.

#### 2.4.1. Tragfähigkeitssteigerung lt. AT 518 840 A1 [14]

In diesem Patent wird versucht, die Tragfähigkeit durch den Einbau eines Verbundsegmentes zu steigern. Der Grundkörper wurde aus bewehrtem Beton erzeugt und mindestens eine Stirnseite wurde mit einem Verstärkungskörper versehen (siehe **Abbildung 2.13**). Der Verstärkungskörper sollte eine höhere maximal zulässige Flächenpressung als der Grundkörper aufweisen (z.B. Stahl, Edelstahl). Die Höhe des Verstärkungskörpers wird dabei so groß gewählt, dass ein Ausbreiten der Druckkraft bis zur Unterseite des Verstärkungskörpers möglich ist und der Beton dann mit seinem vollen Querschnitt eine gleichmäßige Belastung aufnehmen kann und das Lasteinleitungsproblem in der Längsfuge damit beseitigt wird. Zum besseren Verbund zwischen Beton und Verstärkungskörper kann man entweder Anker an das Element schweißen oder man raut die Oberfläche auf, um eine Verzahnung zu ermöglichen.

Nachteile dieser Verstärkungsmethode sind die Kosten des Verstärkungskörpers aus Stahl oder Edelstahl, der negative Einfluss auf die Tragfähigkeit im Brandfall und bei der Verwendung von Stahl und die Möglichkeit der Korrosion falls die Verstärkungskörper im Sohlbereich der Tunnelröhre angesetzt werden.

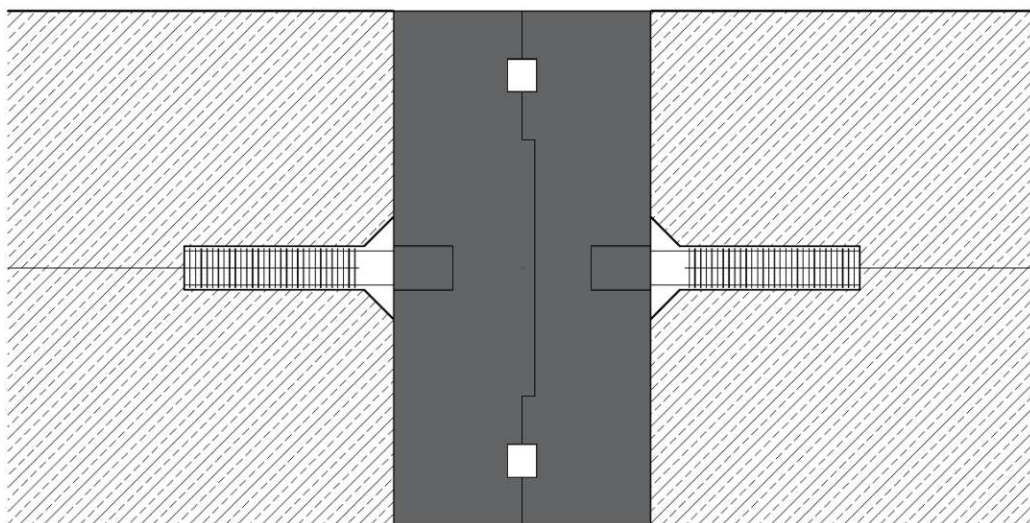


Abbildung 2.13: Skizze System Patent AT 518 840 A1

### 2.4.2. Tragfähigkeitssteigerung lt. EP 1 243 753 A1 [15]

In dieser Erfindung werden Kopplungselemente beschrieben, die in einer Ringfuge und in einer Längsfuge angeordnet werden können und aus Stahl bestehen. Beim benachbarten Tübbing wird mittels einem über den Großteil der Länge verlaufenden Federelements (=Komplementärkopplungselement) eine formschlüssige Verbindung ermöglicht (siehe **Abbildung 2.14**). Nachteilig in diesem Vorschlag sind die Kosten des Kopplungselements, die Korrosionsanfälligkeit der Stahleinlage in der Fuge und der Verlust der Tragfähigkeit im Brandfall.

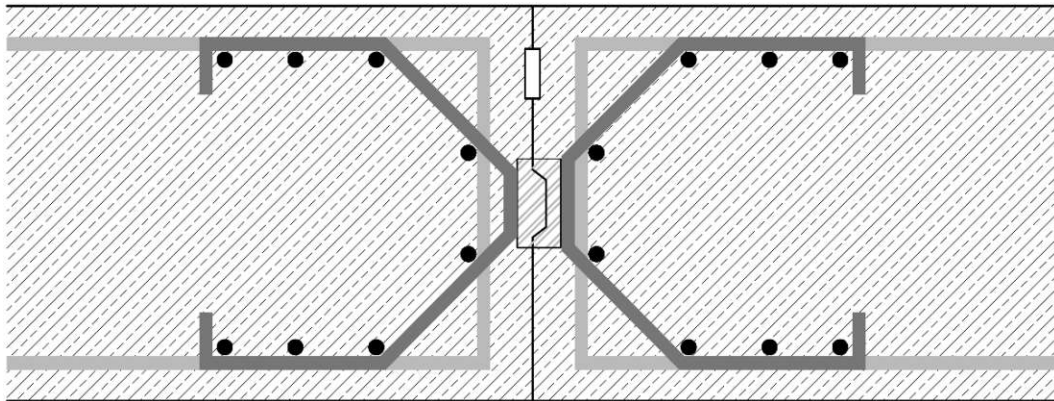


Abbildung 2.14: Skizze System Patent EP 1 243 753 A1

### 2.4.3. Tragfähigkeitssteigerung lt. DE 25 22 789 C3 [16]

Die Tragfähigkeit wird durch Bewehrungen aus länglichen Elementen aus duktilem Gusseisen erhöht. Die Druckkraft wird über dieses gusseiserne Element über ein im Zwischenraum eingebrachtes Bindemittel auf ein Lager und von diesem schlussendlich auf ein Endelement übertragen.

Nachteilig in dieser Variante sind wiederum die Kosten des metallischen Werkstoffes, die Neigung zur Korrosionsbildung und der Verlust der Tragfähigkeit im Brandfall.

### 2.4.4. Tragfähigkeitssteigerung lt. US 1 969 810 [17]

Im Jahre 1931, zum Zeitpunkt der Veröffentlichung, waren nur Bewehrungsstäbe mit glatten Oberflächen verfügbar. Um besseren Verbund zwischen Beton und Bewehrung zu ermöglichen, wurde vorgeschlagen, die Enden aufzuweiten oder eine V-förmige Verankerung anzubringen (Schemaskizze in **Abbildung 2.15** ersichtlich). Die Tübbinge wurden mit diesen Bewehrungsadaptionen in Ringrichtung bewehrt. Darüber hinaus wurde vorgeschlagen, die Längsfugen der benachbarten Tübbinge gegeneinander zu versetzen, um die Druckkraft in einem Tübbingring über die Ringfuge in den benachbarten Tübbingring zu leiten und damit diese dort teilweise vom Bewehrungsstab aufgenommen wird. *Circumferential zig-zag path* wird dieser Lastabtragungsmechanismus genannt. Dieser Mechanismus funktioniert aber nicht, da sich die Ringfuge – aufgrund des Schwindverhaltens des Betons – öffnen kann. Im Zeitraum der Veröffentlichung des Patentes lagen noch keine ausreichenden Erkenntnisse über das Schwindverhalten des Betons vor.

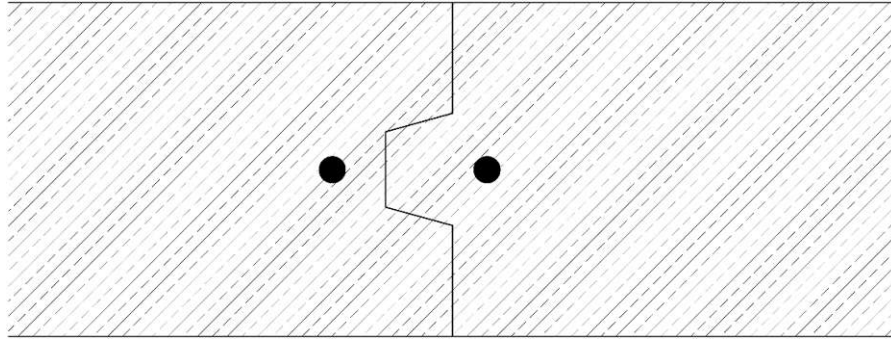


Abbildung 2.15: Skizze System Patent US 1 969 810

#### 2.4.5. Tragfähigkeitssteigerung lt. GB 1 502 207 [18]

Eine weitere Ausführungsmöglichkeit zur Erhöhung der Tragfähigkeit von Tübbing-Längsfugen wurde in [18] beschrieben. An den angrenzenden Seiten der Längsfuge werden in den Tübbing-Aussparungselemente aus Stahl eingebaut. Durch diese Aussparung ist es möglich, zwei benachbarte Tübbinge miteinander zu verschrauben.

Zum besseren Verbund zwischen dem Tübbing und der Aussparung sind Bewehrungsstäbe an das Aussparungselement angeschweißt. Zusätzlich können diese Stäbe auch einen Teil der Druckkraft aufnehmen und in den Beton weiterleiten.

Die Kosten, das Korrosionsverhalten und das Verhalten des Materials im Brandfall sind auch in dieser Lösung als Nachteil anzusehen.

#### 2.4.6. Tübbinge aus Stahlfaserbeton [19]

Eine jüngere Methode zur Erhöhung der Tragfähigkeit ist der Zusatz von Stahlbetonfasern. Sowohl für das Flächentragverhalten, als auch für die Verbindungsfugen in Längs- und Querrichtung, bringt die Kombination von Stahlfasern und einer herkömmlichen Stabbewehrung ein günstigeres Tragverhalten und mehr Duktilität. Eine fundierte Aussage über Grenzwerte oder Bemessungsregeln kann man aufgrund der geringen Versuchsanzahl jedoch aktuell nicht treffen.

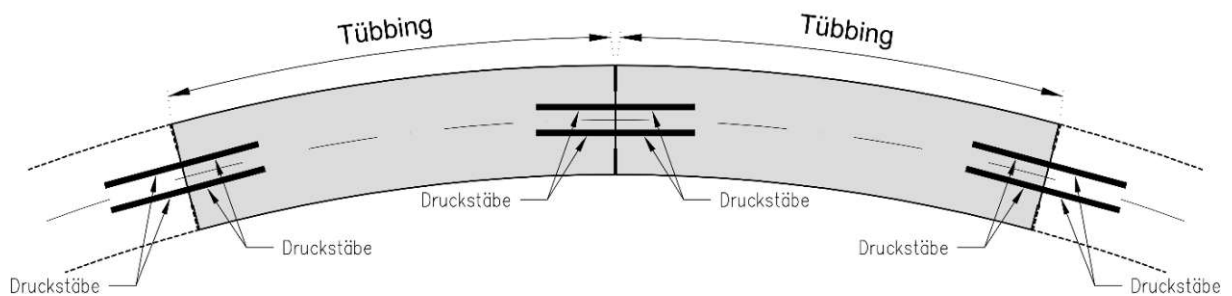
### 2.5. Neue Möglichkeit zur Erhöhung der Tragfähigkeit von Tübbing-Längsfugen

Im Gegensatz zu den bisher erwähnten Versuchen, die zu einer Erhöhung der Tragfähigkeit der Längsfuge der Tübbinge führen sollen, wurde vom Institut für Tragkonstruktion Forschungsbereich der TU Wien ein neues Tübbingsystem entwickelt und patentiert, das die Nachteile der bereits erwähnten Patente beseitigt. In der Kontaktfläche der Tübbinge werden Längsdruckstäbe situiert, die ohne das Vorhandensein einer Betondeckung eine Kraftweiterleitung von Tübbing zu Tübbing bzw. Druckstab zu Druckstab ermöglichen sollen. Im Bereich der Tübbing-Längsfuge wird dadurch der Betonquerschnitt mit einer reduzierten Kraft belastet und somit auch die Betondruckspannungen verringert. Durch die Spitzendruckübertragung der Druckstäbe ist eine direkte Kraftübertragung möglich. Die Kräfte – die in den Druckstäben vorhanden sind – werden, beim Mitwirken des gesamten Tübbing-Querschnittes, wieder in den Beton übertragen. Das konzentrierte Einleiten der Normalkräfte direkt in den Betonstahl

(Übertragung Spitzendruck) gilt als Randbedingung für die Funktionsfähigkeit des neuen Tübbingtypen. Eine direkte Kraftübertragung der Bewehrungsflächen muss bei diesem Stumpfstoß gewährleistet werden und das muss durch eine präzise Herstellung sowie einen sorgfältigen Einbau sichergestellt werden. Der patentierte Tübbingtyp ist in **Abbildung 2.16** ersichtlich.

Durch die Modifizierung des Tübbings bieten sich Vorteile in Hinsicht auf die Tragfähigkeit, die Dauerhaftigkeit – beim Einsatz von Dichtungsbändern liegen die Bewehrungsenden nicht offen und können dadurch auch nicht zu korrodieren beginnen – und auf den Widerstand im Brandfall. Durch die Erhöhung der Tragfähigkeit der Längsfuge und dem Beseitigen der Nachteile der Patente die in Kapitel 2.4 aufgelistet sind, ist es möglich eine Herstellung von Tunnelröhren mit schlankeren Tübbingen zu gewährleisten und dadurch einen ressourcenschonenderen Bau zu ermöglichen.

Um eine wissenschaftliche Aussage über die Wirkungsweise des neupatentierten Tübbings der TU Wien treffen zu können, wurden Versuche getätigt (siehe Kapitel 3).



**Abbildung 2.16:** Patentierter Tübbing der TU Wien

---

## 3. Experimentelle Untersuchungen

### 3.1. Allgemeines

In diesem Kapitel werden Versuche an insgesamt acht Tübbingen zum Vergleich der Tragfähigkeit der Längsfuge des konventionellen Tübbings und dem an der TU Wien entwickelten und patentierten Tübbingsystems beschrieben. Um die Tübbing-Längsfuge möglichst realitätsnah untersuchen zu können, wurden zwei Tübbinge aneinandergedrückt. Es sind bereits Untersuchungen an Tübbingen vorhanden, hierbei wurde aber ein Tübbing gegen eine Stahlplatte oder einem Block aus ultrahochfestem Beton (UHPC) gedrückt. Dies führte im Vergleich zu den zu untersuchenden Körpern jedoch zu einer Querdehnungsbehinderung in der Kontaktfläche aufgrund des viel steiferen Körpers. Diese Querdehnungsbehinderung kann zu einer Erhöhung der Tragfähigkeit der Tübbing-Längsfuge führen und somit das Tragverhalten nicht richtig abbilden

Mit acht Versuchskörpern konnten insgesamt vier Druckversuche durchgeführt werden. Die Geometrie der Tübbinge zur Versuchsdurchführung wurde so gewählt, dass sich im Regelquerschnittsbereich eine gleichmäßige Druckspannung ausbilden konnte. Die Spannung, die in einer realen Tübbingring-Längsfuge auftritt, wird von einer Exzentrizität  $e$  beeinflusst. Diese Exzentrizität entsteht einerseits durch Ungenauigkeiten in der Einbauphase, Verschiebungen einzelner Tübbinge aufgrund des Gebirgsdruckes sowie einwirkende Biegemomente. Durch das Vorhandensein einer Exzentrizität wird die Längsfuge durch Normalkräfte und Biegemomente belastet. Wie schon in Kapitel 2.3.2 erwähnt, können Biegemomente in eine statische Exzentrizität umgerechnet werden. Zusammen mit der geometrischen Exzentrizität kann die Kontaktfläche der Tübbing-Längsfuge reduziert werden und mit einer reinen Normalkraft bemessen werden. Um diese Komplexität in den Versuchen nicht berücksichtigen zu müssen wurden die ersten Untersuchungen des neupatentierten Tübbings ohne jegliche Exzentrizitäten durchgeführt, was zu einer reinen Druckbeanspruchung und einer gleichmäßigen Spannungsverteilung im Tübbing-Querschnitt führte (siehe **Abbildung 3.1**).

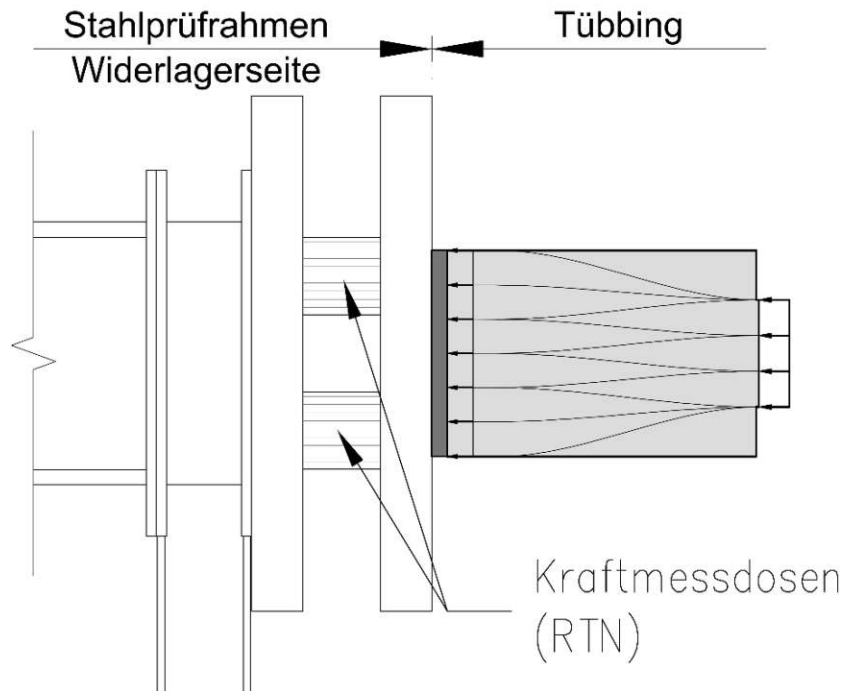


Abbildung 3.1: Systemskizze Tübbing mit Gleichlast und Lastausbreitung

Von maßgebendem Interesse bei der Versuchsdurchführung war neben dem Erfassen der Bruchlast auch das Aufzeichnen der Längenänderung für die Erstellung von Spannungs/Dehnungsbeziehungen und eine Dokumentation der Rissentwicklung, um eine Gebrauchstauglichkeitslast und einen Versagensmechanismus bestimmen zu können. Um diese Erkenntnisse gewinnen zu können, wurden mehrere Messsysteme verwendet. Neben konventioneller Messtechnik mittels induktiver Wegaufnehmer wurde auch ein photogrammetrisches Messsystem verwendet.

Auf den folgenden Seiten werden die Versuchskörper mit den verwendeten Baustoffen, sowie der Versuchsaufbau mit den Messsystemen näher beschrieben. Die experimentelle Untersuchung liefert die Grundlage für die Auswertung, die Analyse und die Beurteilung des neuentwickelten Tübbingsystems.

### 3.2. Versuchskörper

Bei der Konzeption der Versuchskörper wurden prinzipiell zwei verschiedene Typen geplant. Die Abmessungen der Körper wurden ident ausgeführt, um eine Beurteilung des neu entwickelten Systems der TU Wien im Vergleich zum Regeltyp treffen zu können. Der Unterschied der beiden Tübbingtypen, die im Versuch eingesetzt wurden, liegt nur bei der neu eingesetzten Druckbewehrung.

- Typ RT (Regel-Tübbing): Regeltyp, der im österreichischen Tunnelbau Anwendung findet
- Typ MT (Modifizierter Tübbing): adaptiertes System der TU Wien mit Bewehrungsstäben, die bis in die Lastübertragungsfläche der Längsfuge geführt werden und als reine Druckbewehrung dienen

### 3.2.1. Abmessungen und Bewehrungsführung

Aufgrund der maximal möglichen Druckkraft von 18 MN im Versuchsrahmen musste der Tübbing in seiner Breite skaliert werden. Die Versuchskörper weisen eine Querschnittsfläche mit der Breite  $b_1$  von 70 cm und einer Dicke  $d_1$  von 40 cm auf. Die Lastübertragungsfläche in der Längsfuge besitzt eine Breite  $b_0$  von 60,5 cm und einer Dicke  $d_0$  von 20,8 cm.

Die Dicke  $d_1$  befindet sich im Regelbereich zwischen 30 cm und 70 cm. Die Breiten wurden bei den konzipierten Versuchskörpern reduziert, der Regelbereich der Breite  $b_1$  liegt zwischen 1,5 m und 2,5 m. Die Breite  $b_0$  sollte ungefähr 85% bis 95% der Breite  $b_1$  betragen und erfüllt mit  $b_0/b_1 = 60,5 \text{ cm} / 70 \text{ cm} = 86,4\%$  dieses Kriterium. Die Dicke  $d_0$  soll im Bereich zwischen 45% bis 55% der Dicke  $d_1$  liegen und ist mit  $d_0/d_1 = 20,8 \text{ cm} / 40 \text{ cm} = 52\%$  im Regelbereich. Zur Veranschaulichung kann man die Maße der **Abbildung 3.2** entnehmen. Detaillierte Pläne der beiden Typen sind im Anhang A angeführt.

Die Wahl der Bewehrungsmenge erfolgte nach Bemessung und Lastaufstellung auf Basis des EC 2 [5, 6]. In die Versuchskörper Typ 1 wurde Umschnürungsbewehrung (Leiterbewehrung) mit  $\varnothing 14$  bzw.  $\varnothing 16$  und Längsbewehrung mit  $\varnothing 14$  eingebaut. In den patentierten Versuchskörpern des Typs 2 wurden zusätzlich Druckbewehrungen mit  $\varnothing 22$  zur Übertragung des Spitzendrucks eingebaut. Diese Bewehrungseisen wurden bis zur Schalung geführt, um im darauffolgenden Versuch eine direkte Kraftübertragung Stahl-zu-Stahl ermöglichen zu können. Einen Auszug aus den Bewehrungsplänen (siehe Anhang A) ist in **Abbildung 3.3** dargestellt.

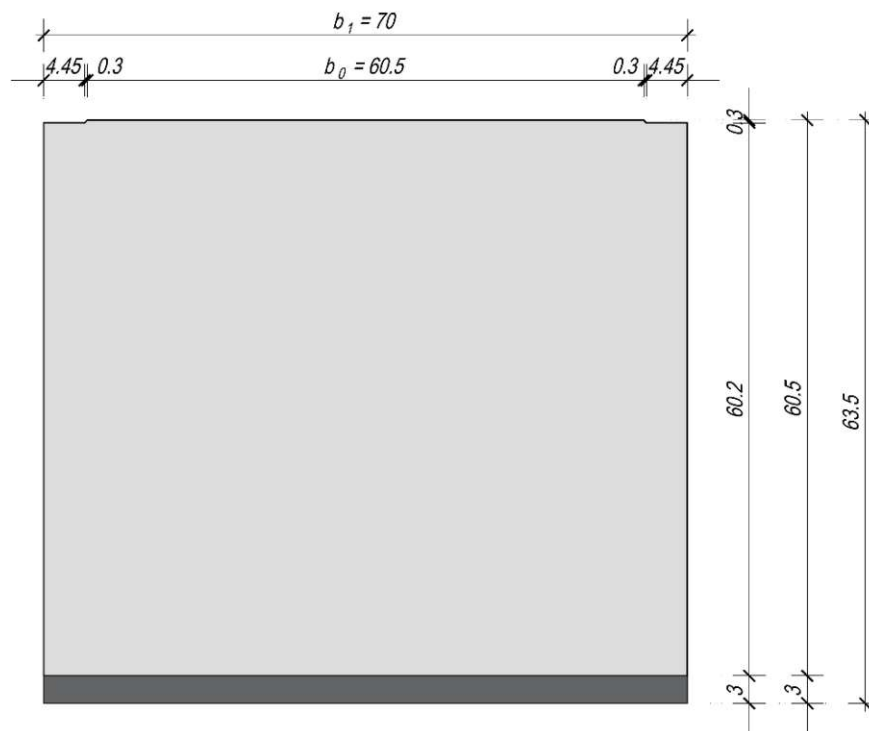


Abbildung 3.2: Auszug Schalplan

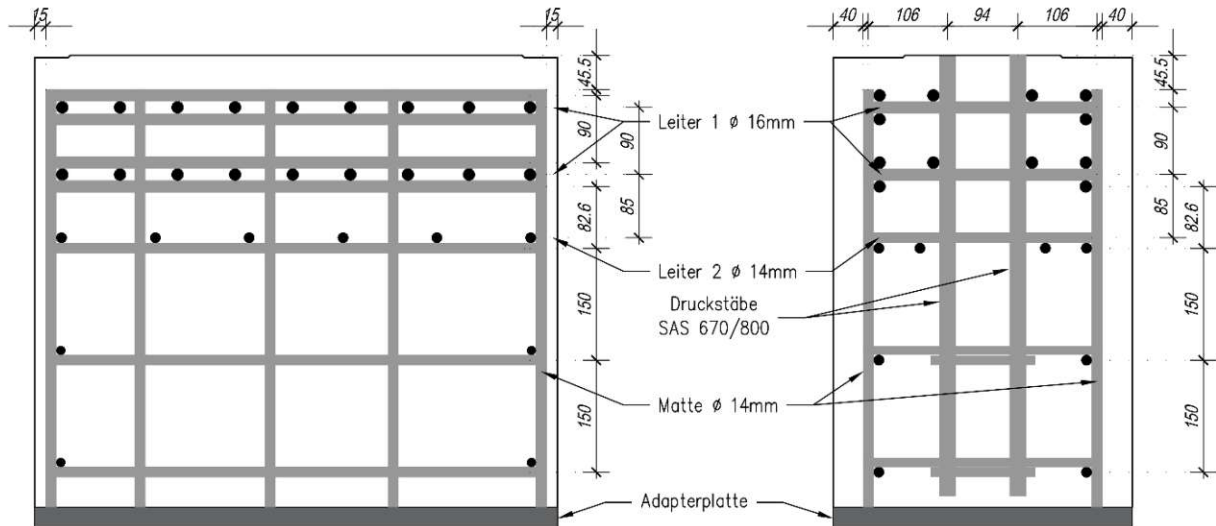
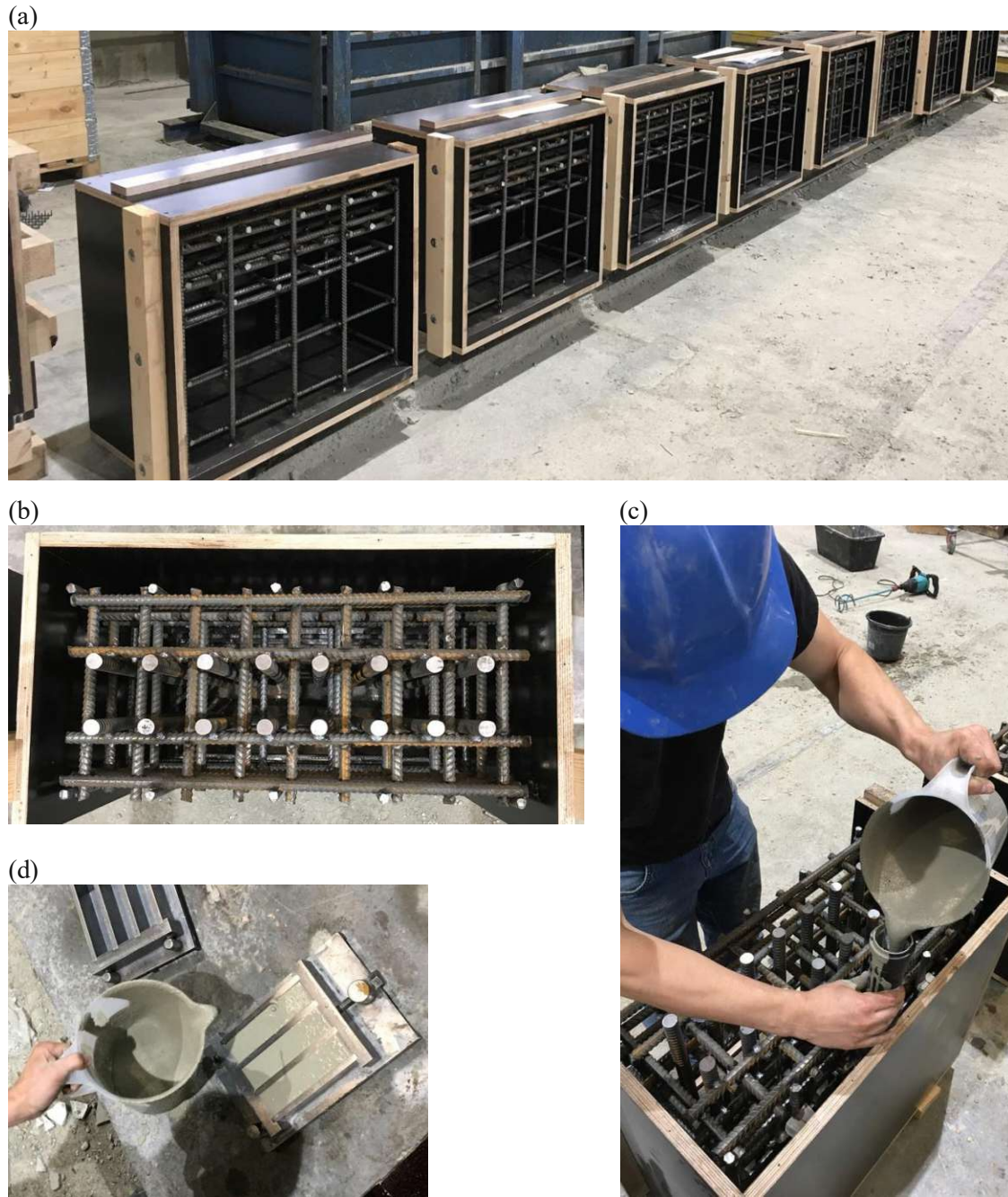


Abbildung 3.3: Auszug aus den Bewehrungsplänen

### 3.2.2. Herstellung

Die Herstellung der Versuchskörper erfolgte in Gars am Kamp im Fertigteilwerk der Firma Oberndorfer. Die Schalung und die Bewehrungskörbe, die an die Adapterplatte geschweißt wurden, wurden durch MitarbeiterInnen dieser Firma vorbereitet. Die Adapterplatte diente zur Befestigung an den Stahlprüfrahmen im Prüflabor. Am ersten Tag vor Ort wurden die Bewehrungskörbe in die Schalung montiert und der Vergussmörtel eingefüllt (siehe **Abbildung 3.4(c)**). Der Spalt zwischen den Druckstäben und der Adapterplatte wurde mit einem Vergussmörtel mit hoher Druckfestigkeit verschlossen. Der Vergussmörtel dient zur Übertragung der hohen Spannungen, die durch die Spitzendruckübertragung der Druckstäbe erzeugt werden. An dem darauffolgenden Tag wurden die Schalungen verschlossen und der Beton in die Formen gegossen. Der Beton wurde mittels Betonkübel eingefüllt und mit Betonrüttelflaschen verdichtet. Am selben Tag wurden auch die zylinder- und würfelförmigen Probekörper für die Bestimmung der Materialeigenschaften hergestellt. Um vergleichbare Betoneigenschaften in den Versuch- und Probekörpern zu erzielen, wurden diese gleich verdichtet, gelagert und denselben Witterungseinflüssen ausgesetzt. Es wurden in alle Prüfkörper Hebeanker gesetzt, um sie mittels Hebelaschen und Kran im Labor in ihre Endlage im Versuchsaufbau bringen zu können. Besondere Nachbehandlungsmaßnahmen waren nicht vorgesehen. Nach Lagerung im Fertigteilwerk wurden die Körper ins Versuchslabor des Instituts für Tragkonstruktionen Forschungsbereich Betonbau der TU Wien transportiert.





**Abbildung 3.4:** Herstellung der Versuchs- und Probekörper: (a) alle 8 Versuchskörper in ihrer Schalung (b) Typ MT mit Druckstäben (c) Einfüllen des Vergussmörtels (d) Vergussmörtelprismen

### 3.3. Baustoffe

Um die vorhandenen Materialkenngrößen in die Berechnung miteinbeziehen zu können, wurden vor Versuchsdurchführung Betonprobekörper im Prüflabor des Instituts getestet. Die Zylinder- bzw. Würfelprobekörper wurden bis zum Bruch belastet. Der Vergussmörtel wurde ebenfalls getestet und in der Druckpresse zu Bruch gebracht.

#### 3.3.1. Beton

Im Zuge des Betonierens der Tübinge wurden 11 Probewürfel und 13 Probezylinder hergestellt. Der verwendete Beton entspricht laut Chargenprotokoll der Firma Oberndorfer einem C50/60 GK16 mit einem W/B Wert von 0,5 – siehe dazu **Tabelle 3.1** für die genaue Betonzusammensetzungen aus dem Chargenprotokoll. Die Materialprüfung wurde gemäß ONR 23303: Prüfverfahren Beton (PVB) – Nationale Anwendung der Prüfnorm für Beton und seiner Ausgangsstoffe [22] durchgeführt. Ausgenommen wurden die Lagerungsbedingungen sowie die Verdichtungsart, welche lt. [22] in der Regel einzuhalten sind. An den Probewürfeln wurden Druckversuche zur Bestimmung der Würfeldruckfestigkeit  $f_{c,cube}$  durchgeführt und an den Probezylindern wurden sowohl die Zylinderdruckfestigkeit  $f_{c,cyl}$ , die Spaltzugfestigkeit  $f_{ct,sp}$  als auch der Elastizitätsmodul  $E_c$  bestimmt. Der Beton erfüllte die Anforderungen an einen C50/60 lt. Chargenprotokoll. Die genauen Materialkennwerte können **Tabelle 3.2** entnommen werden, für ausführlichere Tabellen siehe Anhang B.

**Tabelle 3.1:** Betonzusammensetzung für 1m<sup>3</sup> Frischbeton, beide Versuchsserien, entnommen aus dem Chargenprotokoll der Firma Oberndorfer

| Bestandteil             | Klassenbezeichnung | Masse [kg] |            |         |
|-------------------------|--------------------|------------|------------|---------|
|                         |                    | Mischung 1 | Mischung 2 | Gesamt  |
| Gesteinskörnung trocken | 0/4                | 769,44     | 759,02     | 1528,46 |
|                         | 4/8                | 269,39     | 274,59     | 543,98  |
|                         | 8/16               | 526,44     | 525,70     | 1052,14 |
| Zement                  | CEM II / 52,5R     | 289,16     | 287,73     | 576,89  |
| BRAUCH                  |                    | 91,60      | 92,86      | 184,46  |
| Wasser                  |                    | 144        | 145        | 289     |
| Zusatzmittel            | ACE 331            | 0,93       | 0,93       | 1,86    |
| Gesamtmasse             |                    |            |            | 4176,79 |

**Tabelle 3.2:** Ergebnisse Materialprüfung Beton

| Alter   | $\rho$<br>[t/m <sup>3</sup> ] | $f_{cm,cyl}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $f_{cm,cube}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $f_{ctm}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $E_{cm}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|---------|-------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| 10 Tage | 2,40                          | 51,41                                |                                       |                                   |                                  |
| 11 Tage | 2,39                          | 51,43                                |                                       |                                   |                                  |
| 12 Tage | 2,41                          | 51,93                                | 61,85                                 | 3,07                              | 33.807,22                        |

### 3.3.2. Bewehrungsstahl

In den Versuchskörpern Typ RT wurden nur Bewehrungsstähle der Klasse B550 B gemäß ÖNORM EN 10080: Stahl für die Bewehrung von Beton – Schweißgeeigneter Betonstahl – Allgemeines [23] eingebaut und im Versuchskörper Typ MT wurden Bewehrungsstähle der Klasse B550 B und für die Druckstäbe ein hochfester Bewehrungsstahl des Stahlwerkes Annahütte (Deutschland) mit der Bezeichnung SAS 670/800 gemäß EN 10204 verwendet. Für den hochfesten Bewehrungsstahl wurden drei Zugversuche im Stahlwerk Annahütte durchgeführt und diese Kennwerte wurden für die Berechnung danach gemittelt. Für die Bewehrungsstähle der Klasse B550 B wurden die Werte lt. Norm verwendet ( $f_{yk} = 550 \text{ N/mm}^2$ ). Die Ergebnisse der Materialprüfung kann man **Tabelle 3.3** entnehmen.

**Tabelle 3.3:** Materialparameter des hochfesten Bewehrungsstahl Klasse SAS 670/800

| Versuch | $R_e$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $f_{ym}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|---------|-------------------------------|----------------------------------|
| 1       | 779                           | 776,33                           |
| 2       | 774                           |                                  |
| 3       | 776                           |                                  |

### 3.3.3. Vergussmörtel zum Ausgleich der Längentoleranz der Druckstäbe

Es wurden sechs Prismen mit einer Breite von 4 cm, einer Höhe von 4 cm und einer Länge von 16 cm aus dem verwendeten Vergussmörtel hergestellt und nach zehn bzw. zwölf Tagen im Versuchslabor der TU Wien in einer Druckpresse bis zum Bruch belastet und danach die Materialkennwerte aus diesen Versuchen ermittelt. Die gewonnenen Materialkennwerte können **Tabelle 3.4** entnommen werden.

**Tabelle 3.4:** Materialparameter des Vergussmörtels

| Alter   | Prisma | $\rho$               |      | $R_{cm}$             |       |
|---------|--------|----------------------|------|----------------------|-------|
|         |        | [g/cm <sup>3</sup> ] |      | [N/mm <sup>2</sup> ] |       |
| 10 Tage | 1      | 2,21                 | 2,21 | 73,26                | 73,57 |
|         | 2      | 2,20                 |      | 71,865               |       |
|         | 3      | 2,22                 |      | 75,58                |       |
| 12 Tage | 1      | 2,21                 | 2,20 | 74,42                | 79,13 |
|         | 2      | 2,22                 |      | 79,335               |       |
|         | 3      | 2,18                 |      | 81,27                |       |

### 3.4. Versuchsdurchführung

Die Versuchskörper wurden im Labor des Instituts für Tragkonstruktion in Wien im großen Prüfrahmen für Druckversuche getestet. Aufgrund der langen Versuchsdauer wurden die vier Versuche an insgesamt drei Tagen durchgeführt. Gestartet wurde mit einem Versuch der Tübbinge Typ MT, danach folgten zwei Versuche mit dem Typ RT und zum Abschluss wurde wieder der letzte Tübbing Typ MT bis zum Versagen belastet. Um eine spätere Nachrechnung der Versuche zu ermöglichen, wurden vor Versuchsbeginn die Betonmaterialkennwerte, wie Würfeldruckfestigkeit, Zylinderdruckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit sowie Elastizitätsmodell in einer dafür kalibrierten Prüfmaschine bestimmt. Für die Bestimmung der Materialkennwerte mussten die Zylinderoberseite und -unterseite vorher noch plan geschliffen werden, um eine orthogonale Krafteinleitung zu ermöglichen.

#### 3.4.1. Zeitlicher Ablauf

Die Versuchskörper wurden am Firmengelände der Firma Oberndorfer in Gars am Kamp mit Unterstützung der Mitarbeiter vor Ort hergestellt. Einen Tag vor dem Befüllen der Schalung mit Beton wurde auf die Adapterplatte ein Vergussmörtel aufgebracht, um den Übergang zwischen den Druckstäben und der Adapterplatte für die Übertragung der hohen Spannungen aufgrund des Spitzendrucks zu bewerkstelligen. Die Versuchskörper wurden danach sechs Tage in der Schalung belassen. Danach wurden sie weiterhin vor Witterungseinflüssen geschützt und am 21.05. in das Prüflabor geliefert. Am ersten Versuchstag wurde ein Versuch mit Tübbinge des Typs MT getestet, am zweiten Versuchstag wurden alle vier Versuchskörper des Typs RT geprüft und am dritten Tag wieder Typ MT. Ein detaillierter Zeitablauf kann **Tabelle 3.5** entnommen werden.

Tabelle 3.5: Zeitablauf

| Datum           | Tätigkeit   |
|-----------------|---|
| Do, 16.05.2019  | Verfüllen des Vergussmörtels  |
| Fr, 17.05.2019  | Betonieren der Versuchskörper   |
| Do, 23.05.2019  | Ausschalen der Versuchskörper   |
| Mo, 27.05.2019  | Schleifen der Zylinderproben  |
|                 | Materialtest von drei Probewürfeln und drei Vergussprismen                    |
|                 | Versuch Typ MT V01  |
| Die, 28.05.2019 | Materialtest von zwei Probewürfeln  |
|                 | Versuche Typ RT V01 + V02   |
| Mi, 29.05.2019  | Materialtest von sechs Probewürfeln, 9 Probezylindern und drei Vergussprismen |
|                 | Versuch Typ MT V02  |

### 3.4.2. Versuchsaufbau

Aufgrund der gleichbleibenden Geometrie der Versuchskörper war es ausreichend, einen Versuchsaufbau zu konzipieren (siehe **Abbildung 3.5**). Die Prüfkörper wurden mittels Adapterplatte in den Stahlprüfrahmen geschraubt: ein Tübbing auf der Belastungsseite (weggesteuerte hydraulische Presse) und einer auf der Widerstandsseite. Die Tübbinge wurden ohne Exzentrizität  $e$  eingebaut, um eine reine Normkraftbelastung sicherzustellen.

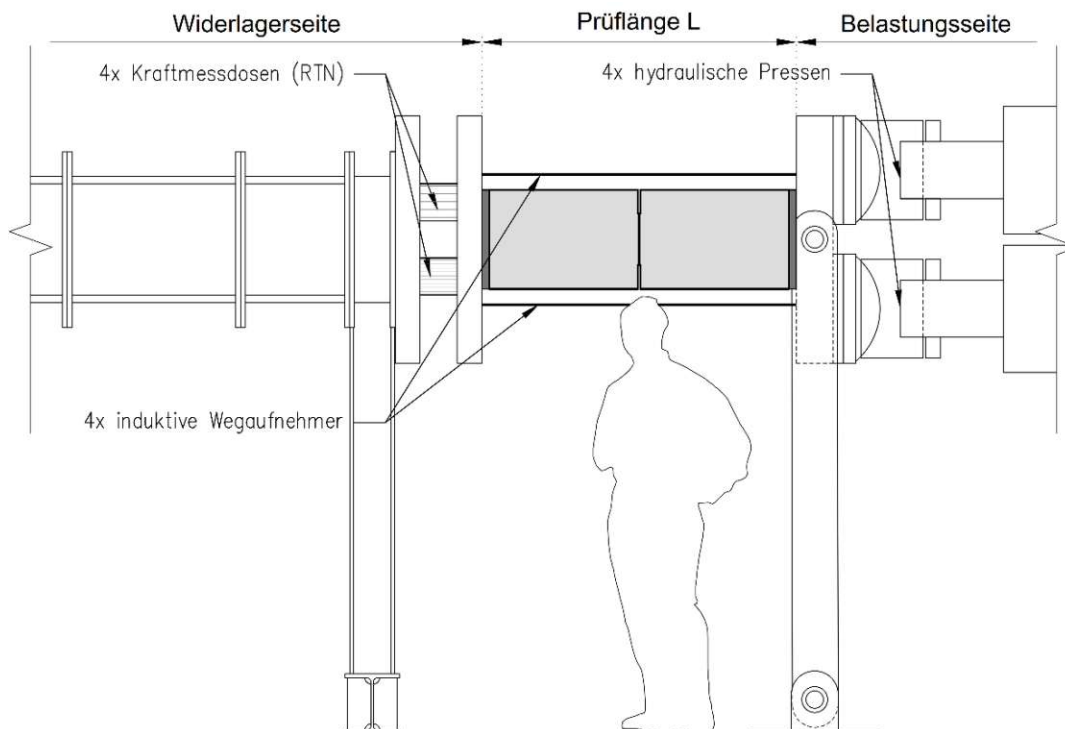
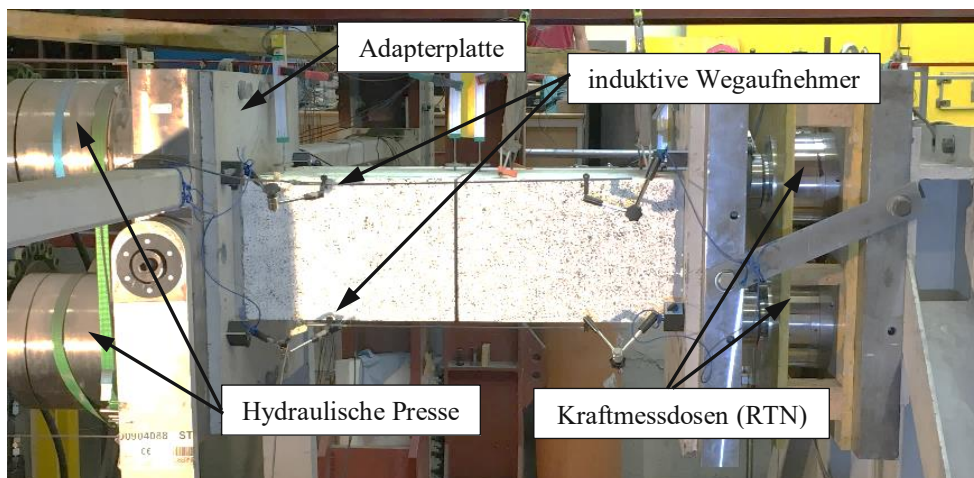


Abbildung 3.5: Versuchsaufbau schematische Darstellung

### 3.4.3. Versuchsablauf

Nachdem die Prüfkörper angeliefert wurden und im Prüflabor bereitstanden, wurde mit den Vorbereitungen für die Versuche begonnen. Zu Beginn wurden die Tübinge mit verdünnter weißer Farbe bemalt und nach der Trocknungsphase wurde auf einer Außenseite ein stochastisches Muster für die Messung das photogrammetrische Messsystem (wird in Kapitel 3.4.4 näher beschrieben) aufgebracht. Die Kraftmessdosen, welche eine exakte Aufzeichnung der Belastung ermöglichten, wurden zwischen zwei Stahlplatten auf der Widerlagerseite direkt nach dem Versuchskörper montiert. Danach waren der Prüfrahmen und die Tübinge soweit vorbereitet, dass es zum Einbau der ersten Versuchskörper kommen konnte. Zuerst wurde der Tübbing an der Belastungsseite eingebaut. An diesem wurde vorab eine Adapterplatte montiert, welche es ermöglichte den Versuchskörper direkt an die Stahlplatte der hydraulischen Pressen zu befestigen (siehe **Abbildung 3.6**). Die Fixierung erfolgte nachdem die Lage mittels Wasserwaage kontrolliert wurde und man sich versichert hatte, dass keine Schiefstellungen oder Exzentrizitäten im Versuchsaufbau vorhanden waren und somit eine reine Normalkraftbeanspruchung entstehen konnte. Das Gegenstück, der Tübbing auf der Widerstandsseite, wurde am Hallenkran befestigt und in den Prüfrahmen gehoben. Der Tübbing musste mittels der Hallenkransteuerung so zwischen dem Tübbing auf der Belastungsseite und dem Stahlprüfrahmen mit den Kraftmessdosen gebracht werden, dass die Längsfugen direkt übereinanderlagen. Nach akribischer Kontrolle der benötigten Lage wurde eine Vorlast von 100 kN auf die Tübinge aufgebracht und nochmals geprüft, ob die Lastübertragungsflächen direkt übereinanderlagen. Nachdem beide Tübinge in ihrer Endlage waren, wurde das gesamte Messsystem montiert. Die Kamera für das photogrammetrische Messsystem wurde positioniert und die induktiven Wegaufnehmer wurden angebracht. Die Magnethalterungen der Wegaufnehmer wurden mit Seilen an dem Prüfrahmen befestigt, um im Falle von Betonabplatzungen eine Beschädigung der Wegaufnehmer durch Herunterfallen zu verhindern. Die Wegaufnehmer wurden auf allen vier Kanten positioniert, um zu kontrollieren, ob die Tübinge gleichmäßig belastet wurden. In **Abbildung 3.6** ist ein Foto vom Versuchsaufbau dargestellt und die Messsysteme sind noch einmal gekennzeichnet. Zusätzlich zu den Messsystemen wurden auf einer Seitenfläche und an der Unterseite die Risse in den verschiedenen Etappen der Lastgeschichte mittels Ölkreiden eingezeichnet und die Rissweiten mit einer optischen Risslupe gemessen.



**Abbildung 3.6:** Versuchsaufbau MT V01

Nach dem Aufbringen und Kontrollieren der Messsysteme wurde die Belastung auf 1000 kN erhöht und die Hebelaschen entspannt, sodass kein Einfluss des Kranes mehr vorhanden war. Aus Sicherheitsgründen wurden die Hebelaschen nicht entfernt, um zu verhindern, dass im Falle eines Bruchs der Betonkörper unkontrolliert auf den Prüfrahen fällt. Die Tübbinge wurden mit genau vorgegebenen Laststufen belastet (siehe **Tabelle 3.6** bzw. **Tabelle 3.7**). Die Belastung für die jeweiligen Laststufen wurden wie in Kapitel 5.2.1 berechnet, nur wurden als Eingangsgrößen die Materialparameter lt. EC 2 [5, 6] verwendet, da noch keine Materialkennwerte der Prüfwürfel und -zylinder vorhanden waren. Nach jeder Laststufe wurde die Kraft für eine bestimmte Dauer konstant gehalten, um das Kriechverhalten der Tübbinge unter Dauerbelastung zu simulieren. Nach der letzten Haltephase wurden die Versuchskörper bis zum Versagen belastet. Die Versuchskörper wurden weggesteuert belastet. Nach Erreichen der Bruchlast und Beendigung des Versuches wurde die Last bis auf einen Bruchteil von den Pressen genommen und die letzten entstandenen Risse wurden auf der Seitenfläche des Tübbings aufgezeichnet. Danach konnte mit dem Abbau begonnen werden. Zuerst wurden die induktiven Wegaufnehmer entfernt und danach die Hebelaschen auf der Widerstandsseite wieder angespannt und der Prüfrahen fuhr auseinander. Nun konnte der Tübbing auf der Widerstandsseite aus dem Prüfrahen entfernt werden. Nach Ablegen dieses Tübbings wurde auch der Tübbing auf der Belastungsseite mit den Hebelaschen befestigt und vom Prüfrahen geschraubt. Nach Abbau und Sicherung der Rissdokumentierung, die mittels Spiegelreflexkamera gemacht wurde, konnte mit dem neuerlichen Aufbau begonnen werden.

Die Versuche der Tübbinge des Typs RT dauerten 3,5 bzw. 4,5 h und die Versuche des Typs MT dauerten beide rund 4,5 h.

**Tabelle 3.6:** Lastgeschichte Typ RT

| <b>Lastgeschichte Typ RT</b> |                               |           |             |               |                                |               |
|------------------------------|-------------------------------|-----------|-------------|---------------|--------------------------------|---------------|
| Laststufe                    | Aufgaben                      | Belastung | % Bruchlast | Belastung     | Belastungs-<br>geschwindigkeit | Haltedauer    |
| 1                            | Installieren des Messsystems  | 100,0 kN  | 1,1%        |               |                                | 0,17 h        |
|                              |                               |           |             | 4 min         | 3,8 kN/s                       |               |
| 2                            | Kontrolle der Versuchskörper  | 1000,0 kN | 10,7%       | 10 min        | 3,5 kN/s                       | 0,08 h        |
| 3                            | Haltephase + Rissaufzeichnung | 3097,8 kN | 33,0%       | 10 min        | 1,8 kN/s                       | 0,25 h        |
| 4                            | Haltephase + Rissaufzeichnung | 4185,4 kN | 44,6%       | 10 min        | 1,5 kN/s                       | 0,25 h        |
| 5                            | Haltephase + Rissaufzeichnung | 5075,2 kN | 54,1%       | 30 min        | 1,6 kN/s                       | 0,50 h        |
| 6                            | Haltephase + Rissaufzeichnung | 7975,3 kN | 85,0%       | 30 min        | 0,8 kN/s                       | 1,00 h        |
| 7                            | Bruchlast =                   | 9385,5 kN | 100,0%      |               |                                |               |
| <b>Gesamtdauer</b>           |                               |           |             | <b>94 min</b> |                                | <b>2,25 h</b> |
|                              |                               |           |             |               | <b>3,8 h</b>                   |               |

Tabelle 3.7: Lastgeschichte Typ MT

| Lastgeschichte Typ MT |                               |            |             |                |                                |               |
|-----------------------|-------------------------------|------------|-------------|----------------|--------------------------------|---------------|
| Laststufe             | Aufgaben                      | Belastung  | % Bruchlast | Belastung      | Belastungs-<br>geschwindigkeit | Haltedauer    |
| 1                     | Installieren des Messsystems  | 100,0 kN   | 0,7%        |                |                                | 0,17 h        |
| 2                     | Kontrolle der Versuchskörper  | 1000,0 kN  | 7,4%        | 4 min          | 3,8 kN/s                       | 0,08 h        |
| 3                     | Haltephase + Rissaufzeichnung | 4442,9 kN  | 33,0%       | 16 min         | 3,6 kN/s                       | 0,25 h        |
| 4                     | Haltephase + Rissaufzeichnung | 6002,6 kN  | 44,6%       | 14 min         | 1,9 kN/s                       | 0,25 h        |
| 5                     | Haltephase + Rissaufzeichnung | 7278,8 kN  | 54,1%       | 14 min         | 1,5 kN/s                       | 0,50 h        |
| 6                     | Haltephase + Rissaufzeichnung | 11200,0 kN | 83,2%       | 45 min         | 1,5 kN/s                       | 1,00 h        |
| 7                     | Bruchlast =                   | 13460,5 kN | 100,0%      | 40 min         | 0,9 kN/s                       |               |
| <b>Gesamtdauer</b>    |                               |            |             | <b>133 min</b> |                                | <b>2,25 h</b> |
|                       |                               |            |             | <b>4,5 h</b>   |                                |               |

#### 3.4.4. Messsystem

Um einen Vergleich der erhaltenen Ergebnisse garantieren zu können, wurden die Messsysteme zwischen den vier Versuchen nicht verändert. Die Versuche wurden auf verschiedene Arten dokumentiert:

- Induktive Wegaufnehmer (IWA) (siehe **Abbildung 3.7 a**) und Kraftmessdosen (RTN) (siehe **Abbildung 3.7 b**)
- Photogrammetrisches Messsystem mit der Software „Aramis“.
- Händische Aufzeichnungen: Risskennzeichnung und -messung mittels Risslupe
- Fotos (Ablauf und Rissbilder)

Für die Messung der Stauchung wurden insgesamt vier induktive Wegaufnehmer eingesetzt. Diese wurden an den Kanten der Versuchskörper angebracht. Zur Erfassung der Rissentwicklung wurde ein photogrammetrisches Messsystem installiert und zusätzlich auf den restlichen Seiten eine händische Aufzeichnung der Risse durchgeführt. Die aufgebrachte Belastung der hydraulischen Pressen wurde mittels vier Ringtorsions-Kraftmessdosen (RTN) aufgezeichnet und während der Versuchsdurchführung kontinuierlich überwacht.



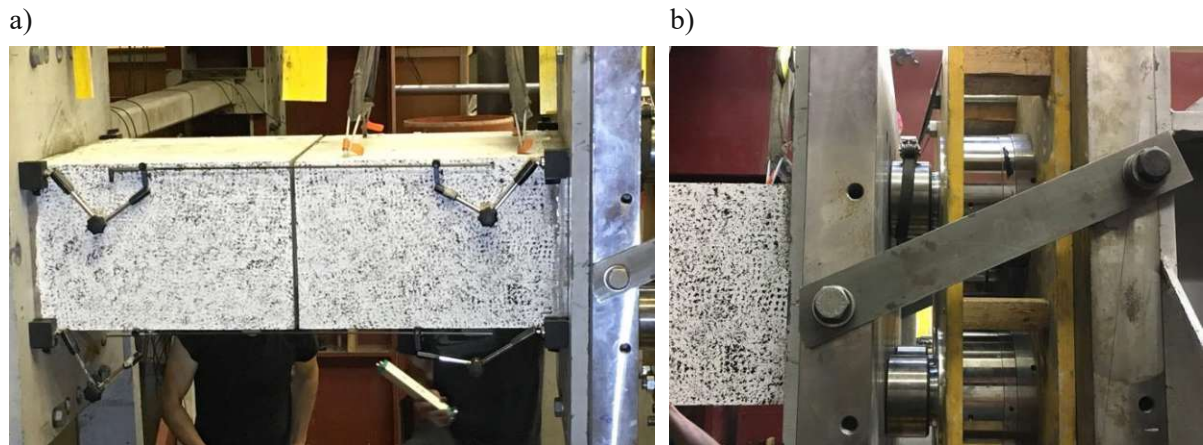


Abbildung 3.7: Messsysteme. a) induktive Wegaufnehmer b) Kraftmessdosen

### Photogrammetrisches Messsystem

Zur genauen Ermittlung der entstehenden Rissweiten an der Seitenfläche der Tübbinge wurde das Programm Aramis von der Gesellschaft für optische Messtechnik (GOM) verwendet. Dieses System ermöglichte die genaue Erfassung der Verformungen mittels Fotos, die in das Programm eingelesen werden. Die Bilder werden im Programm in Form von Pixeln erstellt, welche zu Facetten zusammengefasst werden, die sich überlappen. Beim darauffolgenden Bild wird die jeweilige Facette wieder gesucht und das Programm kann eine Relativverschiebung zwischen derselben Facette ermitteln. Um eine Steigerung der Genauigkeit zu ermöglichen kann man die Facetten vergrößern, da durch die Anzahl der Pixel die Lage genauer bestimmt wird. Bei einer zu großen Facettengröße können lokale Effekte möglicherweise nicht mehr berücksichtigt werden.

Um die Risse erkennen zu können, mussten die Versuchskörper vorbereitet werden. Es wurde ein stochastisches Muster, das genügend Kontrast auf der Oberfläche aufweist, aufgebracht. Eine Seite der Tübbinge wurde mit handelsüblicher Wandfarbe bestrichen, die mit Wasser verdünnt wurde, um den rissüberbrückenden Effekt zu vermeiden, und anschließend wurde mittels Bürste und Tupfern mit schwarzer Farbe ein Muster aufgesprenkelt (siehe **Abbildung 3.8**). Für die Auswertung waren die Entstehung der Risse und die Kraft/Dehnungsbeziehung von besonderem Interesse. In unserem Versuchsaufbau wurde nur mit einer Kamera gearbeitet, da keine dreidimensionale Betrachtung erforderlich war. Es wurden in einem Intervall von 10 Sekunden Bilder erstellt. Die Ergebnisse der Auswertung können sowohl Kapitel 4, als auch den Anhängen C und D entnommen werden.



Abbildung 3.8: Tübbing mit stochastischem Muster auf der Belastungsseite

---

## 4. Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse präsentiert, die aus den Versuchen gewonnen werden konnten. Diese Ergebnisse dienen als Grundlage für den Vergleich der beiden Tübbingtypen und der Interpretation. Im ersten Schritt wird auf die Versuche des Typs RT eingegangen und anschließend werden die Ergebnisse des modifizierten Typen MT präsentiert. Zur Veranschaulichung werden die wichtigsten Ergebnisse hier beschrieben und graphisch dargestellt. Die vollständige Auswertung der Versuche mit allen Diagrammen, Tabellen und Rissbildern kann Anhängen C und D entnommen werden.

Die gesamten Messwerte wurden während den Versuchen durch eine Software laufend aufgezeichnet und gesichert. Somit konnten die Kräfte in den Kraftmessdosen und die Stauchungen aus den Wegaufnehmern ausgelesen werden. Zusätzlich mit den aufgenommenen Bildern aus dem photogrammetrischen Messsystem bildeten diese Daten die Grundlage für die Auswertung der Versuche. Folgende Diagramme und Tabellen wurden zur Darstellung der Ergebnisse erstellt:

- Last-Verformungsbeziehungen
- Last-Rissweitenbeziehungen
- Rissbilder nach dem Versagen auf der Tübbingunterseite und -seitenflächen
- Rissbilder aus Aramis

### 4.1. Typ RT

RT V01 und RT V02 wurden mit dem Regeltyp (Typ RT), der im österreichischen Tunnelbau Anwendung findet, durchgeführt. Die Bewehrungsführung entspricht dabei den Beschreibungen in Kapitel 3.2.1 und dem Bewehrungsplan in Anhang A.2. Beim durchgeführten Druckversuch trat kein plötzliches Versagen auf, zu Ende des Versuches – ab der dritten Haltephase – wurde eine fortnehmende Rissentwicklung bemerkt und schlussendlich konnte der Tübbing die Kräfte nicht mehr aufnehmen, die Pressenkräfte wurden geringer und die Stauchung nahm zu.

#### 4.1.1. Last-Verformungsbeziehung

Die Kräfte bei der Versuchsdurchführung wurden bei der Widerstandsseite mittels der vier Kraftmessdosen RTN gemessen und die Verformungen wurden an den vier Kanten des Tübbings mittels Wegaufnehmern aufgenommen. Der Pressenweg wurde nicht als Verformungsweg herangezogen, da sich in diesem Weg auch die Stauchung des Stahlprüfrahmens wiederfindet. In **Tabelle 4.1** sind die maximalen Kräfte und die Verschiebungswege zu diesen Kräften von RT V01 und RT V02 aufgelistet. Die vier Verschiebungswege wurden gemittelt und aus diesem gemittelten Verschiebungsweg wurde die Stauchung berechnet.

Tabelle 4.1: Maximalbelastung und -wege aus RT V01 und RT V02

| Versuch | $F_{\max}$ | unbereinigt |               | bereinigt |               |
|---------|------------|-------------|---------------|-----------|---------------|
|         |            | Weg         | $\varepsilon$ | Weg       | $\varepsilon$ |
|         |            | [mm]        | [‰]           | [mm]      | [‰]           |
| RT V01  | 9.198 kN   | -4,98       | -3,9          | -4,59     | -3,6          |
| RT V02  | 10.626 kN  | -8,90       | -7,0          | -7,99     | -6,3          |

Abbildung 4.1 zeigt die Kraft-Dehnungslinie, die mit den Werten der Wegaufnehmer und den Kraftmessdosen erstellt wurde. Bis zur 3. Haltephase sind linear elastische Bereiche mit Kriechphasen in den Haltepausen ersichtlich. Ab der 4. Belastungsphase erkennt man einen gekrümmten Verlauf der Last-Verformungsbeziehung. Der Verlauf zu Beginn ist auf das steife Systemverhalten des Versuchskörpers zurückzuführen. Bei Erreichen höherer Lasten flacht die Last-Verformungslinie ab. Dieses Verhalten ist auf die langsame Zerstörung des Betongefüges zurückzuführen. Die Steifigkeit nimmt so lange ab, bis keine Last mehr aufgebracht werden kann. Zum Versagen kommt es sobald die aufnehmbare Kraft abnimmt und die Stauchungen zunehmen.

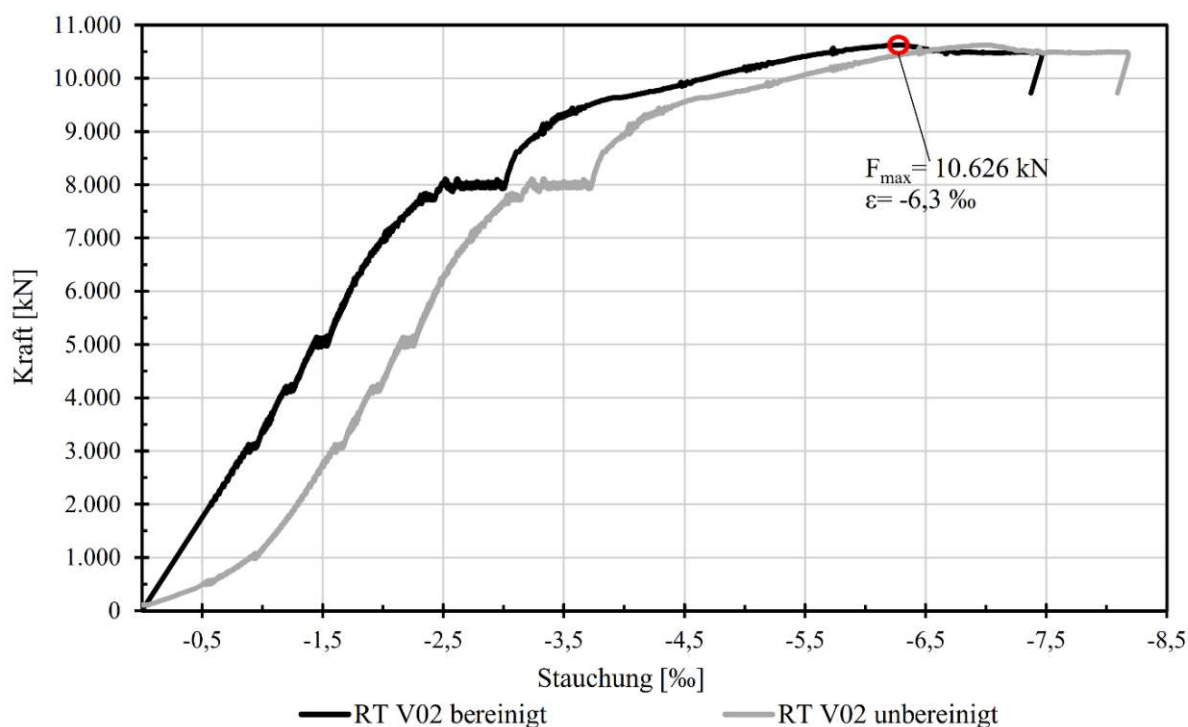


Abbildung 4.1: Last-Verformungsbeziehung, RT V02

Für die Ermittlung des Dehnungsverlaufes, der in **Abbildung 4.1** ersichtlich ist, standen die Werte der vier Wegaufnehmer an den Kanten der Tübbinge zur Verfügung. Die aufgezeichneten Werte mussten noch bearbeitet werden, um für die Auswertung von Nutzen zu sein, da Wegaufnehmer nur eine Stauchung  $\Delta L$  in mm aufnehmen können. Zu Beginn der Versuchsdurchführung wurde die Prüflänge  $L$  (siehe **Abbildung 3.5**) gemessen und notiert. Dividiert man die Stauchung  $\Delta L$  durch die Prüflänge,

erhält man die Dehnung in ‰ an der jeweiligen Stelle der Wegaufnahme. Aufgrund einer gleichmäßigen Stauchung der vier Wegaufnahme konnten die Werte anschließend gemittelt werden und mit dieser Stauchung wurde danach das Kraft-Dehnungsdiagramm angefertigt. Der Verlauf der Kraft-Dehnungslinie musste im Anfangsbereich angepasst werden, da sich bis zu einer gewissen Last kleine Unebenheiten der Lastverteilungsfläche (konvexe Fläche) aufgrund der Schalung (siehe **Abbildung 4.2**) noch plandrücken mussten und die Lastverteilungsfläche erst danach zur vollen Lastübertragung anzusetzen war. Der hellgraue Verlauf ist hierbei der ursprüngliche Verlauf und die schwarze Kraft-Dehnungslinie der angepasste Verlauf.



**Abbildung 4.2:** Konvexe Lastverteilungsfläche

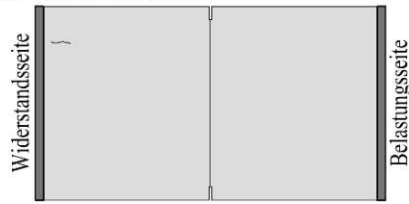
#### 4.1.2. Rissentwicklung

##### Manuelle Aufzeichnung der Rissentwicklung

In jeder Haltephase wurden die Risse mit Ölkreiden aufgezeichnet. Für jede dieser Phasen wurde eine andere Farbe verwendet, um die Entwicklung der Risse nachvollziehen zu können. Mit Hilfe des Programms AutoCad 2018 wurden die aufgenommenen Bilder eingefügt und skaliert, um sie auf eine Tübinggrafik zu legen und die Risse in den verschiedenen Phasen der Lastgeschichte nachzeichnen zu können. In **Abbildung 4.3** sind die Rissbilder aus AutoCad 2018 für die Untersicht und in **Abbildung 4.4** für die Seitenfläche ersichtlich. Das fehlende Eck in **Abbildung 4.3** ist ein Teil der Betondeckung, der sich im Laufe des Versuches löste. Detailliertere Darstellungen für RT V01 und RT V02 können Anhang C entnommen werden.

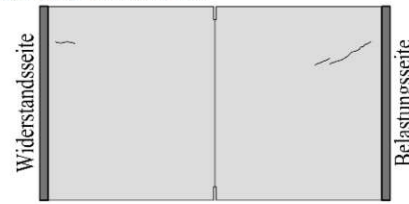
Haltephase 3.100 kN

33,0% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



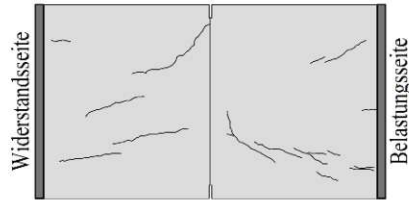
Haltephase 5.100 kN

54,1% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



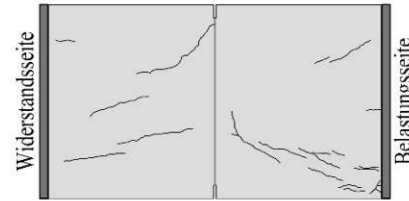
Haltephase 4.200 kN

44,6% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



Haltephase 8.100 kN

83,2% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



Haltephase 10.626 kN

113,2% der Bruchlast aus der Lastgeschichte

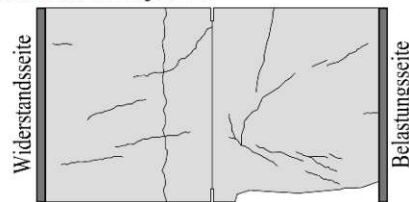
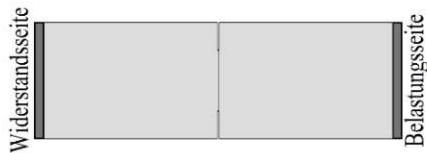


Abbildung 4.3: Manuelle Rissbildauswertung, RT V02 – Untersicht

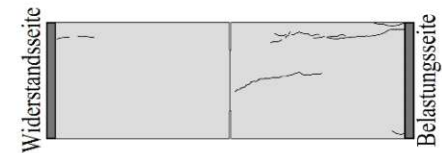
Haltephase 3.100 kN

33,0% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



Haltephase 5.100 kN

54,1% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



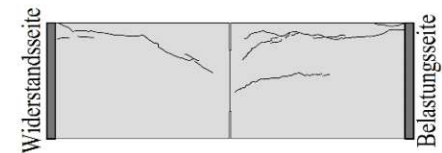
Haltephase 4.200 kN

44,6% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



Haltephase 8.100 kN

83,2% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



Haltephase 9.198 kN

98,0% der Bruchlast aus der Lastgeschichte

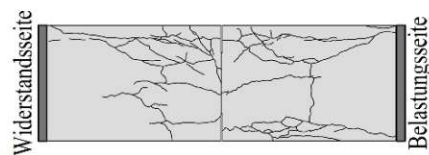
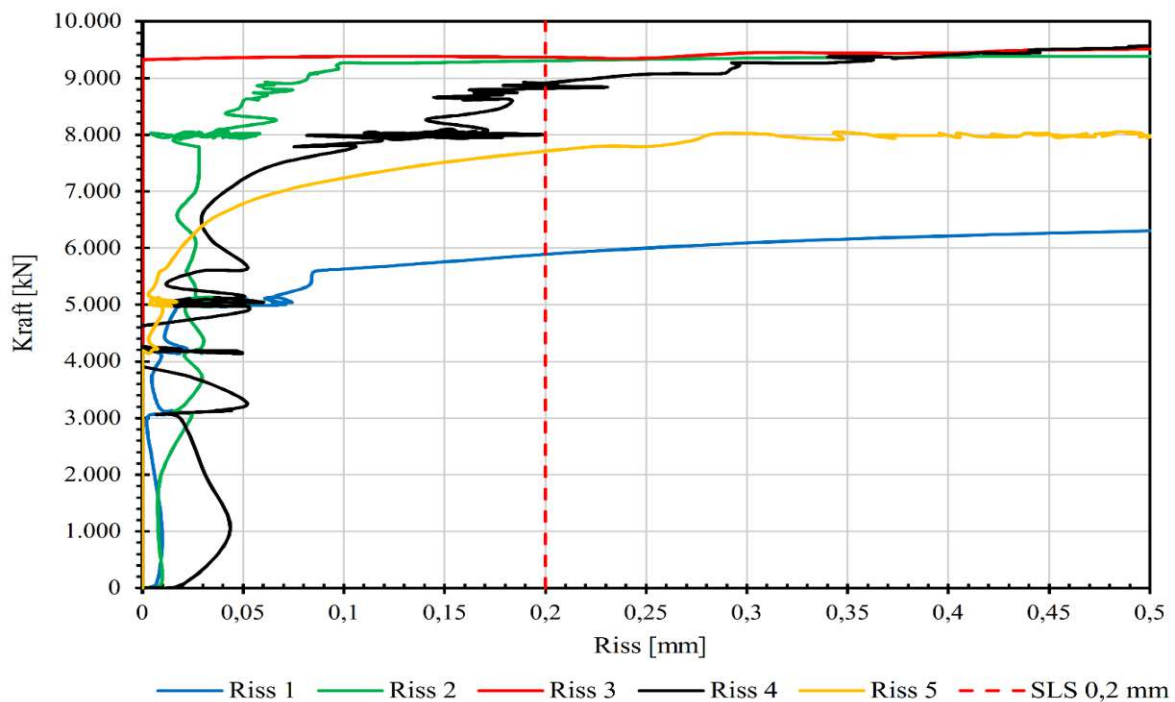


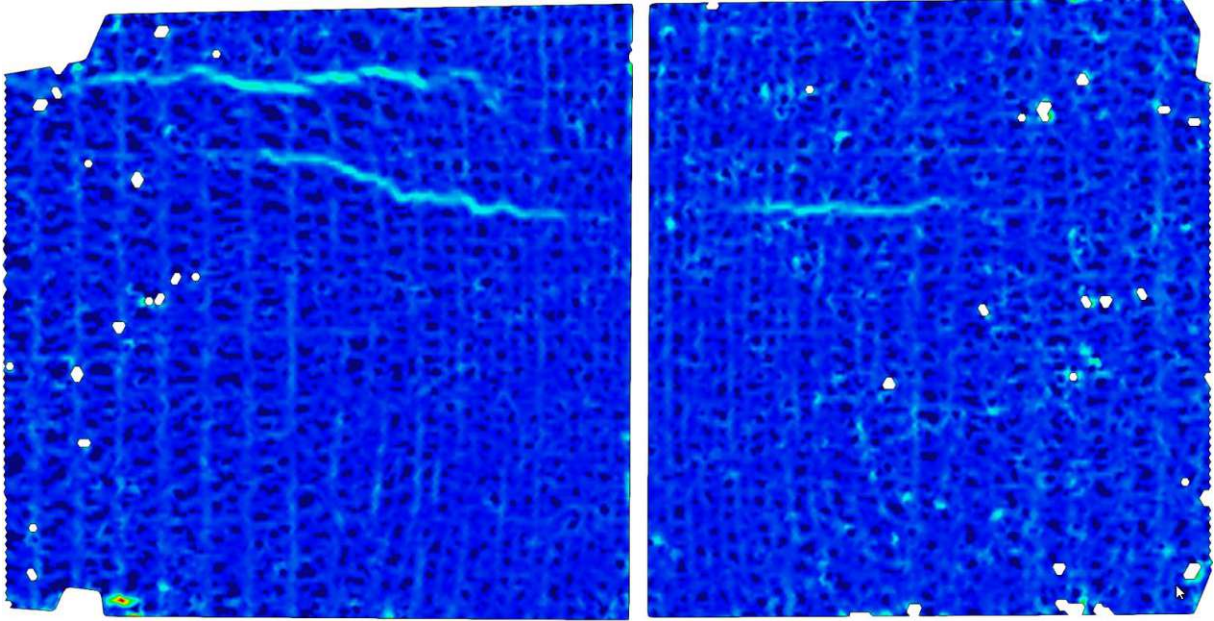
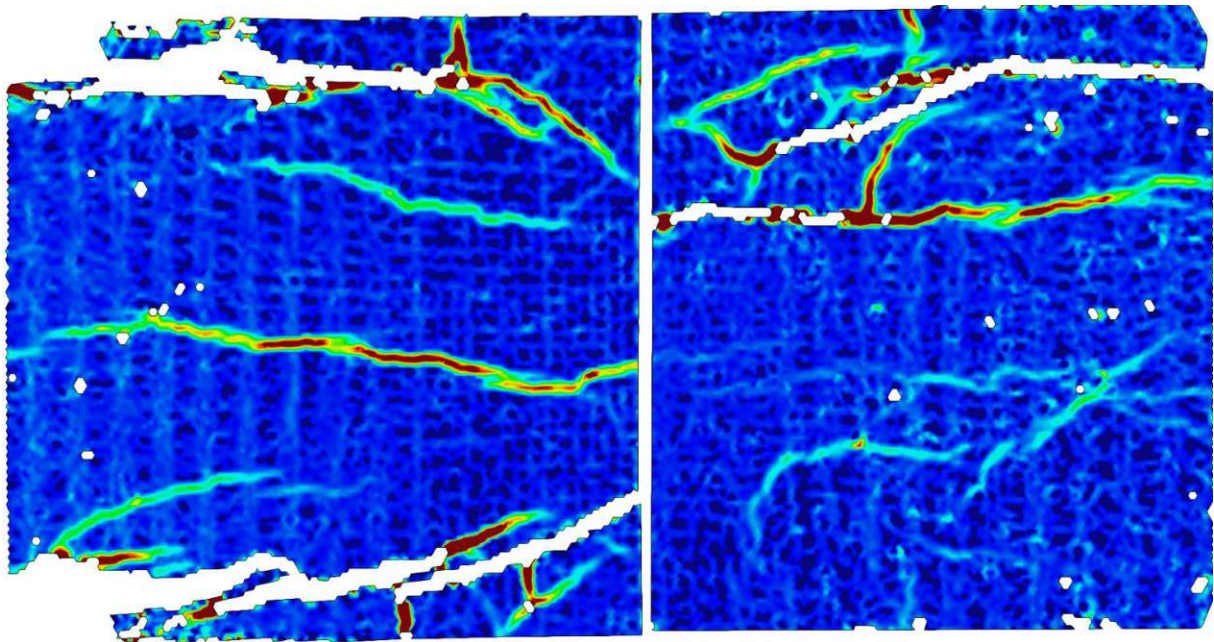
Abbildung 4.4: Manuelle Rissbildauswertung, RT V02 – Seitenfläche

### Photogrammetrische Messung der Risse

Neben der händischen Aufzeichnung an der Unterseite und einer Seitenfläche der Tübinge wurde zusätzlich auf einer Seitenfläche der Tübinge die Rissentwicklung mit dem photogrammetrischen Messsystem dokumentiert. Hier konnte man zusätzlich zur Darstellung der genauen Rissbreitenentwicklung im Verlauf des Versuches Rückschlüsse auf die vorhandene Last beim Erreichen der erlaubten Rissbreite für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit ziehen. Die geforderte Rissbreite wurde aus der **Abbildung 2.5** entnommen, gewählt wurde dabei die Anforderungsklasse AT1, die eine dichte Anforderung an die Fugen stellt und nur einzelne visuell feststellbare Feuchtigkeitsstellen erlaubt. Bei RT V02 wurde bei einer Last von 5.892 kN die Rissbreite von 0,2 mm erreicht und somit auch der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit. Pro Versuch wurde eine Referenzlänge am Tübbing aufgezeichnet und notiert, um in Aramis einen Bezug zwischen den Pixeln und der wahren Länge des Tüblings herzustellen. Dadurch konnte man eine exakte Stauchung ermitteln. Mit der photogrammetrischen Auswertung konnte eine anschauliche Darstellung der Rissentwicklung erzeugt werden. Es wurde ein Diagramm für die Last-Rissbeziehung erstellt (siehe **Abbildung 4.5**). Im Diagramme sind die Entstehungen der unterschiedlichen Risse mit fortschreitender Laststeigerung ersichtlich. In einigen Bereichen ist ein Verschließen der Risse bei zunehmender Last erkennbar, dieses Phänomen lässt sich auf die eindimensionale Messung der Länge zurückführen – in Wirklichkeit erfährt die Rissentwicklung eine Ausbreitung in jede Richtung und kann sich in Teilbereichen wieder annähern. Zusätzlich dazu wurden die Rissbilder aus Aramis in AutoCad 2018 in eine Tübbingdarstellung eingebettet und mit den Rissbildern aus ATENA 2D® verglichen. Dieser Vergleich ist in Kapitel 5.2.7 in **Abbildung 5.8** ersichtlich. Die Rissbezeichnung die in **Abbildung 4.5** angeführt ist, kann **Abbildung C.12** aus dem Anhang C entnommen werden. Als zusätzliche Darstellung der Risse ist das Rissbild bei Erreichen der Grenzlast im Gebrauchszustand in **Abbildung 4.6** und beim Erreichen der Traglast in **Abbildung 4.7** zu sehen. Ein Bild nach der Versuchsdurchführung mit den Betonabplatzungen ist in **Abbildung 4.8** ersichtlich.



**Abbildung 4.5:** Rissentwicklung aus Aramis, RT V02

Abbildung 4.6: Rissbild, RT V02 bei  $F_{SLS}$ Abbildung 4.7: Rissbild, RT V02 bei  $F_{ULS}$

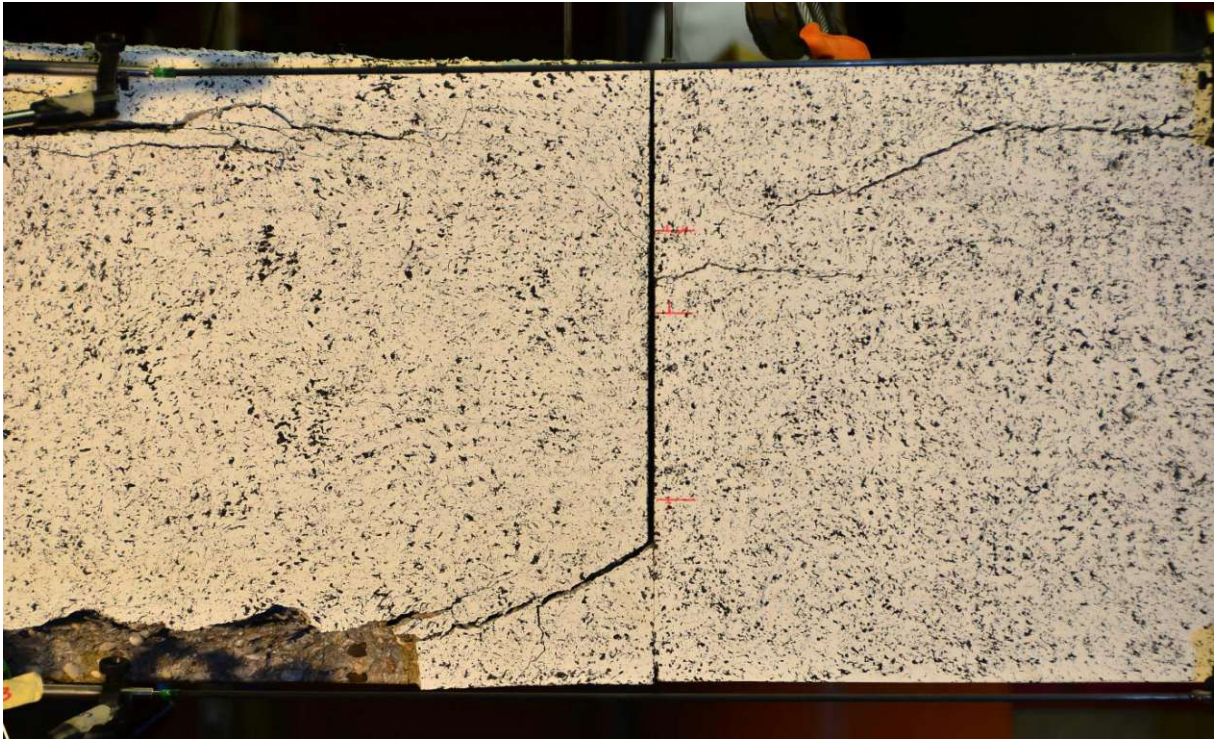


Abbildung 4.8: Rissbild Versuchsende, RT V02

## 4.2. Typ MT

MT V01 und MT V02 wurden mit dem Typ MT mit den zusätzlichen Druckstäben, die zur direkten Lastübertragung dienen, durchgeführt. Die Bewehrungsführung entspricht dabei den Beschreibungen in Kapitel 3.2.1 und dem Bewehrungsplan in Anhang A.2. Beim durchgeführten Druckversuch trat kein plötzliches Versagen auf, aber gegen Ende des Versuches – ab der 3. Haltephase – wurde eine fortnehmende Rissentwicklung bemerkt und schlussendlich löste sich die Betondeckung vom Tübbing ab (siehe **Abbildung 4.9**).



Abbildung 4.9: Versagensbild MT V01, Untersicht



Dieses Phänomen wird auch in der SIA 262 [12] beschrieben, welche besagt, dass bei Erhöhung der Betondruckfestigkeit – aufgrund der Umschnürungswirkung einer Umschnürungsbewehrung – nur die Betonfläche berücksichtigt werden darf, welche von der Bewehrung umschlossen ist, da der Rest abplatzen kann (siehe SIA 262 Abschnitt 4.2.1.9 [12]). Eine weitere Laststeigerung durch die eingebauten Druckstäbe war jedoch noch möglich. Zum Versagen des Tübbings kam es erst, als die vorhandenen Pressenkräfte geringer wurden und die Stauchungen zunahmen.

#### 4.2.1. Last-Verformungsbeziehung

Wie bei RT V01 und RT V02 wurden auch hier die Kräfte mittels der vier Kraftmessdosen RTN gemessen und die Verformungen mittels Wegaufnehmern aufgenommen. In **Tabelle 4.2** sind die maximalen Kräfte und Verschiebungswege der MT V01 und MT V02 aufgelistet. Beim MT V01 sind nach Abbruch der Betondeckung die Wegaufnehmer aus ihren Halterungen gerissen worden und der Versuch musste aus den aufgenommenen Pressenverschiebungen rückgerechnet werden.

**Tabelle 4.2:** Maximalbelastung und –wege aus MT V01 und MT V02

| Versuch | $F_{\max}$ | unbereinigt |               | bereinigt |               |
|---------|------------|-------------|---------------|-----------|---------------|
|         |            | Weg         | $\varepsilon$ | Weg       | $\varepsilon$ |
|         |            | [mm]        | [%]           | [mm]      | [%]           |
| MT V01  | 14.049 kN  | -10,46      | -8,2          | -9,69     | -7,6          |
| MT V02  | 14.404 kN  | -10,97      | -8,6          | -10,58    | -8,3          |

**Abbildung 4.10** zeigt die Kraft-Dehnungslinie, die mit den Werten der Wegaufnehmer und den Kraftmessdosen erstellt wurde. Bis zur 3. Haltephase sind linear elastische Bereiche mit Kriechphasen in den Haltepausen ersichtlich. Ab der 4. Belastungsphase erkennt man einen gekrümmten Verlauf der Last-Verformungsbeziehung. Der beschriebene Verlauf ist auf die unterschiedlichen Systemsteifigkeiten im Laufe des Versuches zurückzuführen, wie in Kapitel 4.1.1 erläutert.

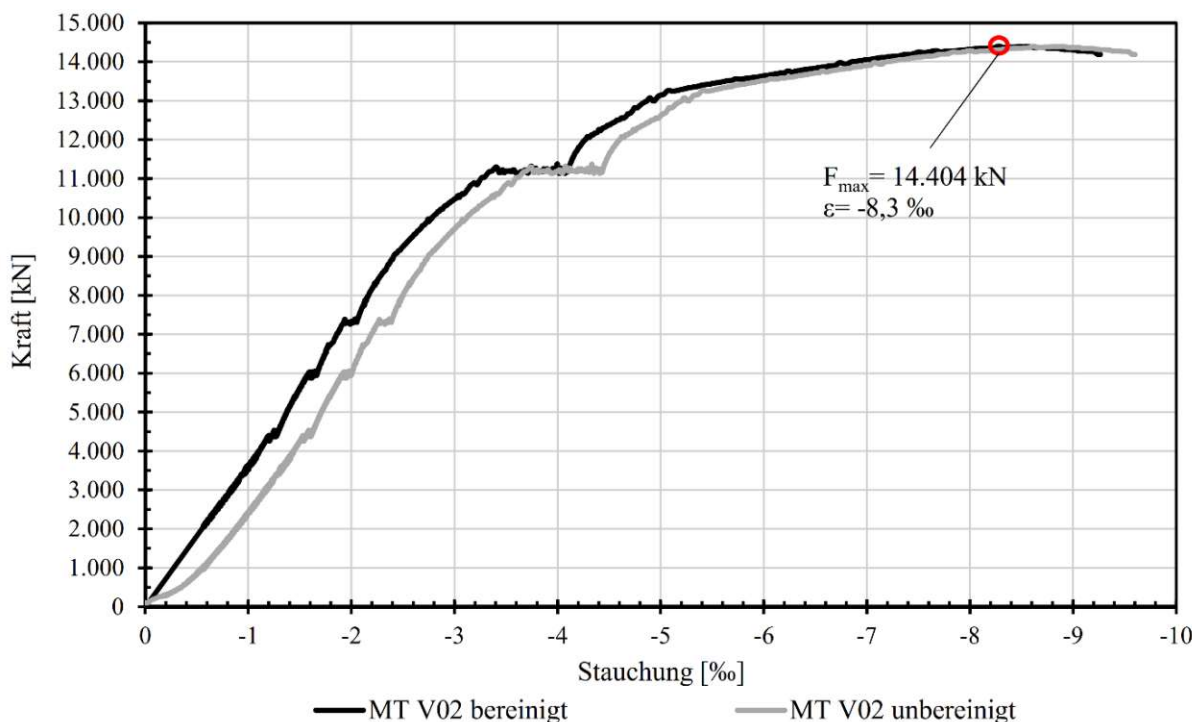


Abbildung 4.10: Last-Verformungsbeziehung aus Datenauswertung der Wegaufnehmer, MT V02

Für die Ermittlung des Dehnungsverlaufes, der in **Abbildung 4.10** ersichtlich ist, standen die Werte der vier Wegaufnehmer an den Kanten der Tübinge zur Verfügung. Die Vorgehensweise zur Herstellung der Last-Verformungsbeziehung wurde analog zu Kapitel 4.1.1 durchgeführt, beginnend von der Mittelung der Stauchungen bis zum Bereinigen des Anfangsbereiches aufgrund der konvexen Lastverteilungsfläche, die zu Beginn der Versuchsdurchführung vorhanden war. Der hellgraue Verlauf ist hierbei der ursprüngliche Verlauf und die schwarze Kraft-Dehnungslinie der angepasste Verlauf (der Unterschied wurde in Kapitel 4.1.1 näher beschrieben).

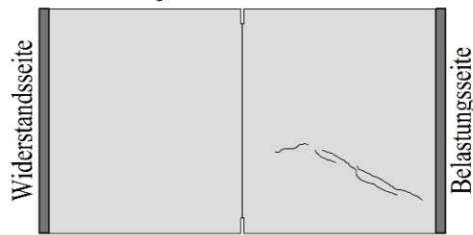
#### 4.2.2. Rissentwicklung

##### Manuelle Aufzeichnung der Rissentwicklung

In jeder Haltephase wurden die Risse mit Ölkreiden aufgezeichnet. Für jede dieser Phasen wurde eine andere Farbe verwendet, um die Entwicklung der Risse nachvollziehen zu können. Mit Hilfe des Programms AutoCad 2018 wurden die aufgenommenen Bilder verarbeitet und die Risse nachgezeichnet. In **Abbildung 4.11** sind die Rissbilder aus AutoCad 2018 für die Untersicht und in **Abbildung 4.12** für die Seitenfläche ersichtlich. Das fehlende Eck in **Abbildung 4.12** ist die Betondeckung auf der Unterseite die sich im Laufe des Versuches löste. Detailliertere Darstellungen für MT V01 und MT V02 können Anhang D entnommen werden.

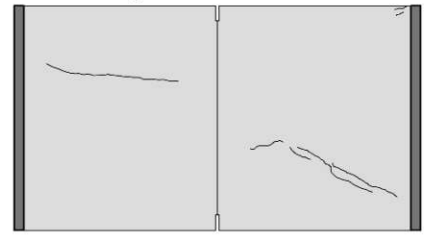
## Haltephase 4.450 kN

33,0% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



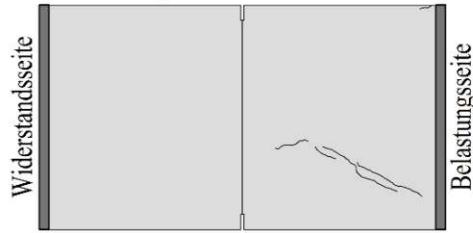
## Haltephase 7.300 kN

54,1% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



## Haltephase 6.000 kN

44,6% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



## Haltephase 11.200 kN

83,2% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



Abbildung 4.11: Manuelle Rissbildauswertung, MT V02 – Unterseite

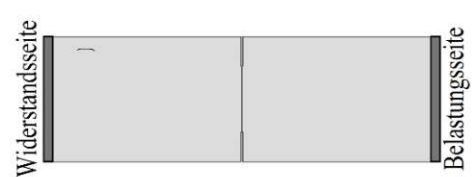
## Haltephase 4.450 kN

33,0% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



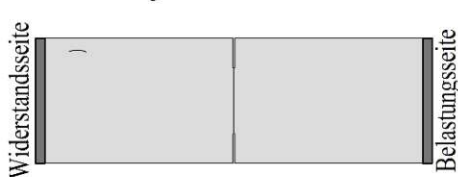
## Haltephase 7.300 kN

54,1% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



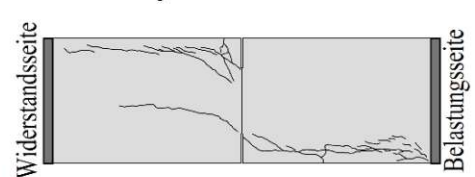
## Haltephase 6.000 kN

44,6% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



## Haltephase 11.200 kN

83,2% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



## Haltephase 14.404 kN

106,6% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



Abbildung 4.12: Manuelle Rissbildauswertung, MT V02 – Seitenfläche

### Photogrammetrische Messung der Risse

Neben der händischen Aufzeichnung an der Unterseite und einer Seitenfläche der Tübinge wurde zusätzlich auf einer Seitenfläche der Tübinge die Rissentwicklung mit dem photogrammetrischen Messsystem dokumentiert. Auch hier wurde, analog zu Kapitel 4.1.2, die Rissentwicklung bis zum Erreichen der Last bei der zulässigen Rissbreite nach **Abbildung 2.5** in einem Diagramm dargestellt – dieses Diagramm kann **Abbildung 4.13** entnommen werden. Die dort angeführte Rissbezeichnung ist in **Abbildung D.9** im Anhang D ersichtlich. Bei MT V02 wurde bei einer Last von 10.393 kN die Rissbreite von 0,2 mm erreicht und somit auch der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit. Das zugehörige Rissbild ist **Abbildung 4.14** zu entnehmen. Als zusätzliche Darstellung der Risse ist das Rissbild bei Erreichen der Traglast in **Abbildung 4.15** zu sehen. Ein Bild nach Versuchsende mit den abgeplatzen Betondeckungen ist in **Abbildung 4.16** ersichtlich.

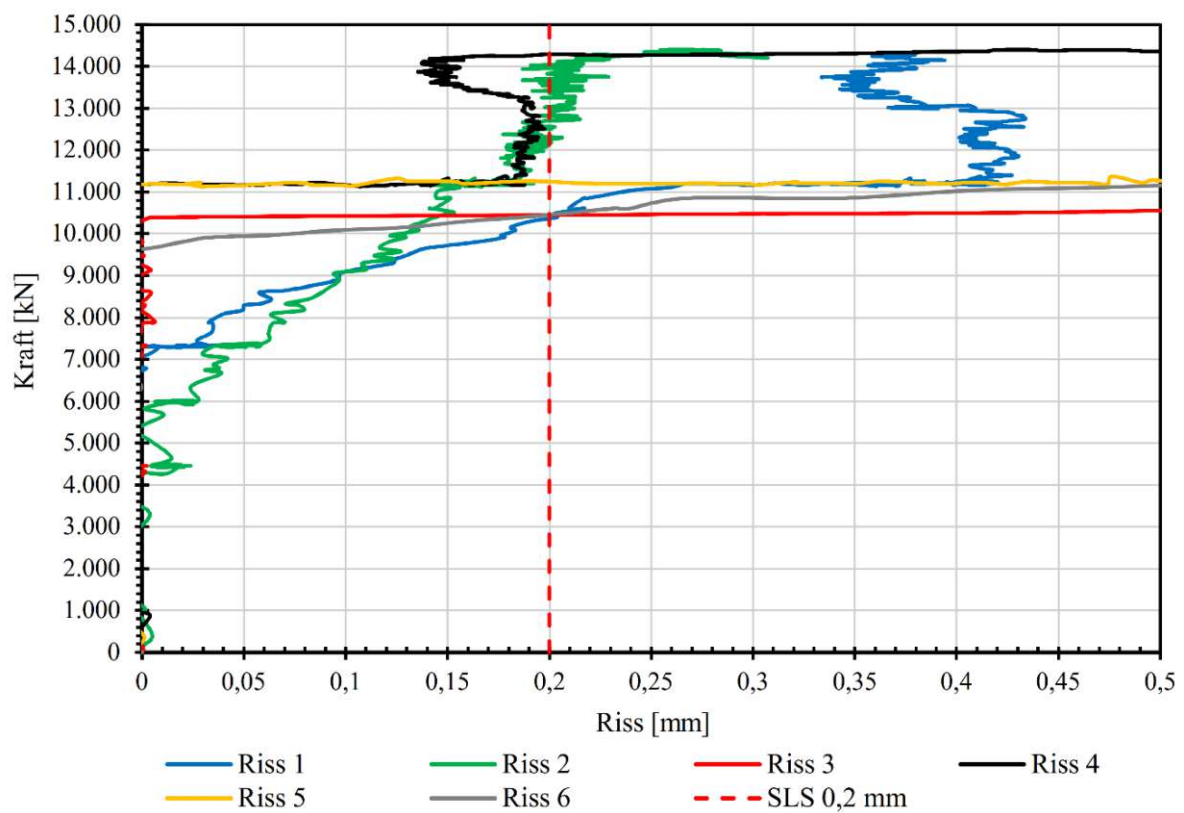
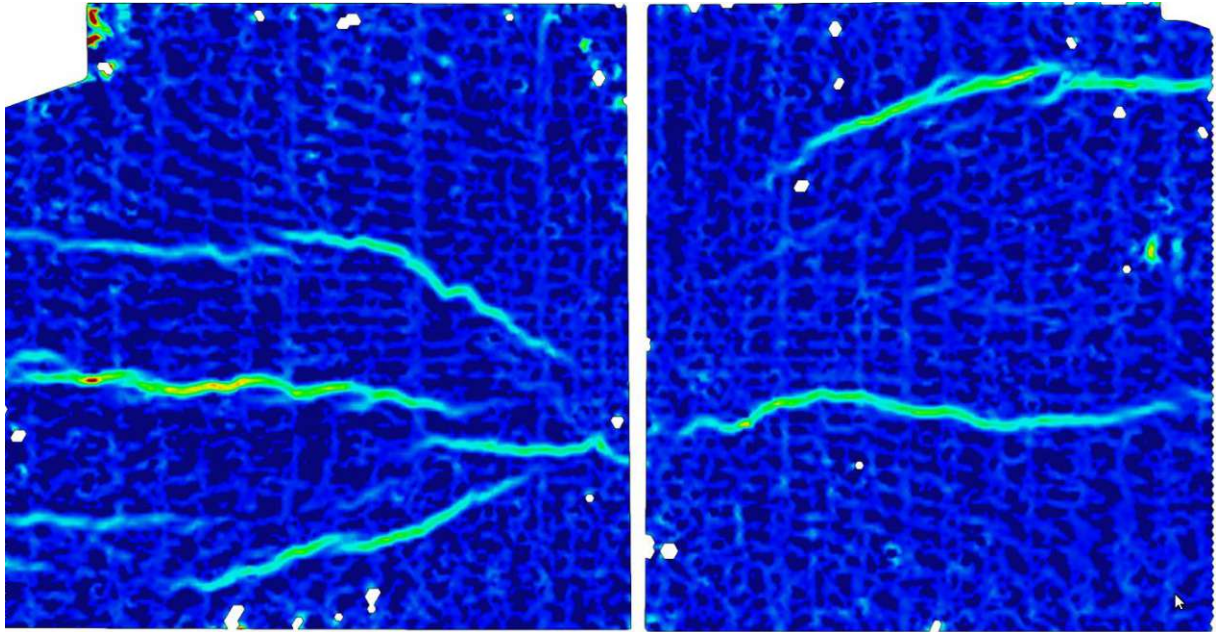
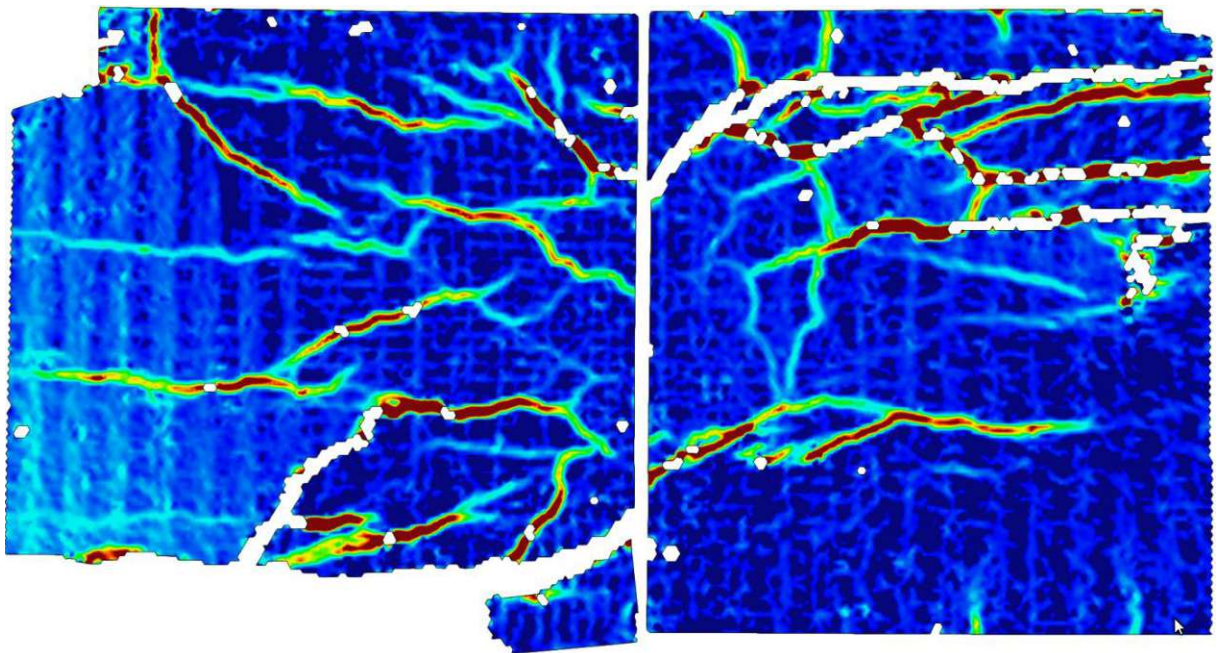


Abbildung 4.13: Rissentwicklung aus Aramis, MT V02

Abbildung 4.14: Rissbild, MT V02 bei  $F_{SLS}$ Abbildung 4.15: Rissbild, MT V02 bei  $F_{ULS}$

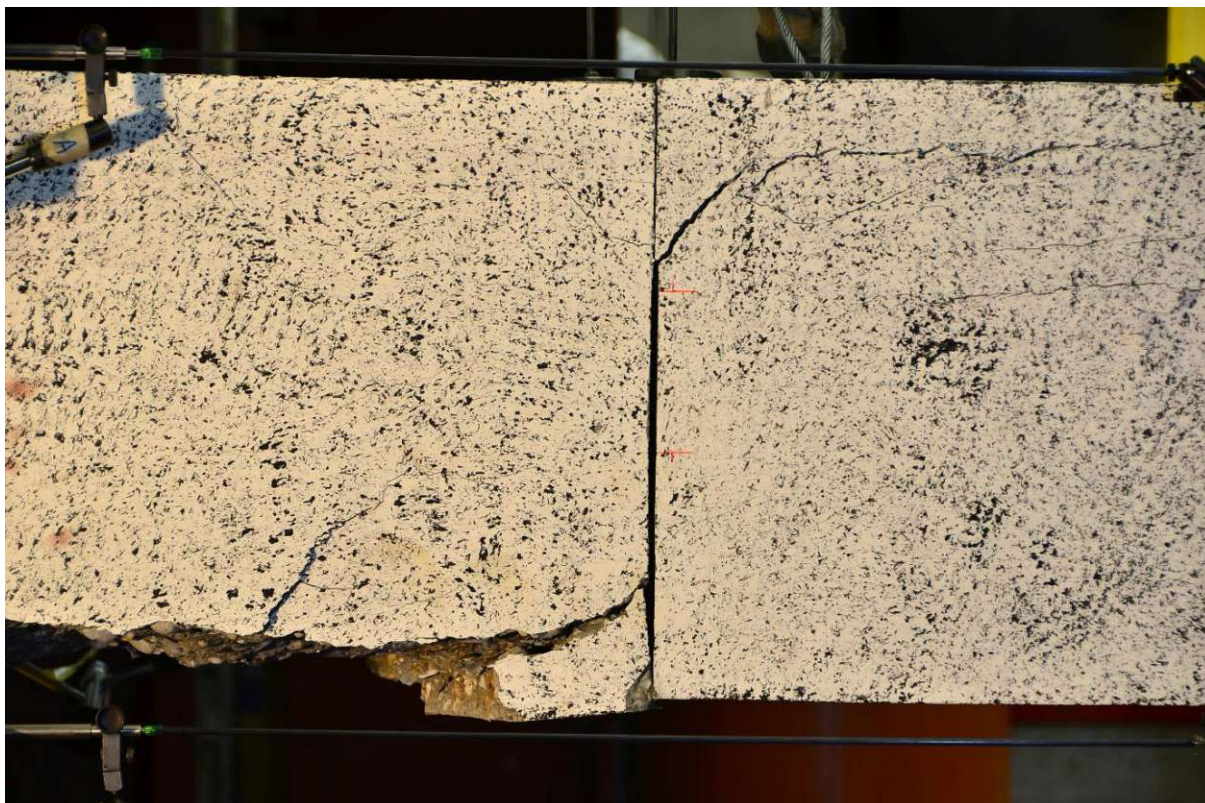


Abbildung 4.16: Rissbild Versuchsende, MT V02

### 4.3. Vergleich der Versuchsserien

Nach Auswertung der beiden Tübbingtypen, können die gewonnenen Ergebnisse der Versuchsdurchführung miteinander verglichen werden.

#### 4.3.1. Vergleich SLS (Serviceability Limit State)

In Kapitel 2 unter dem Punkt 2.2.3 ist eine Tabelle mit den Anforderungsklassen und den dazugehörigen Rissweiten (siehe **Abbildung 2.5**) aus der RIL [8] angeführt, die als Kriterium für die Grenzlast der Gebrauchstauglichkeit dient. Nach der Auswertung in Aramis war es möglich, aus dem Diagramm der Rissentwicklung die zugehörigen Gebrauchslasten bei Erreichen der Grenzzrissweiten zu erhalten. Diese vier Grenzlasten können der nachfolgenden **Tabelle 4.3** entnommen werden. Zusätzlich sind zur Veranschaulichung noch die Rissbilder aus Aramis in **Abbildung 4.17** ersichtlich.

**Tabelle 4.3:** SLS-Lasten aus den Versuchen

| Versuch | Typ | $F_{\max, \text{SLS}}$ |
|---------|-----|------------------------|
| RT V01  | RT  | 6.832 kN               |
| RT V02  | RT  | 5.892 kN               |
| MT V01  | MT  | 9.446 kN               |
| MT V02  | MT  | 10.393 kN              |

Der Typ MT hat eine Laststeigerung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit von etwa 2.614 kN, bis die Rissweite von 0,2 mm erreicht wurde. Dieser Lastanteil lässt sich auf die Spitzendruckübertragung der hochfesten Druckstäbe zurückführen, die das direkte Weiterleiten der Belastung bereits im Anfangsstadium ermöglicht und verspätete Rissentwicklung zur Folge hat, da die eingebauten Druckstäbe einen Teil der Belastung übernehmen und dadurch die Spannungen im Betongefüge um diesen Anteil reduziert werden.

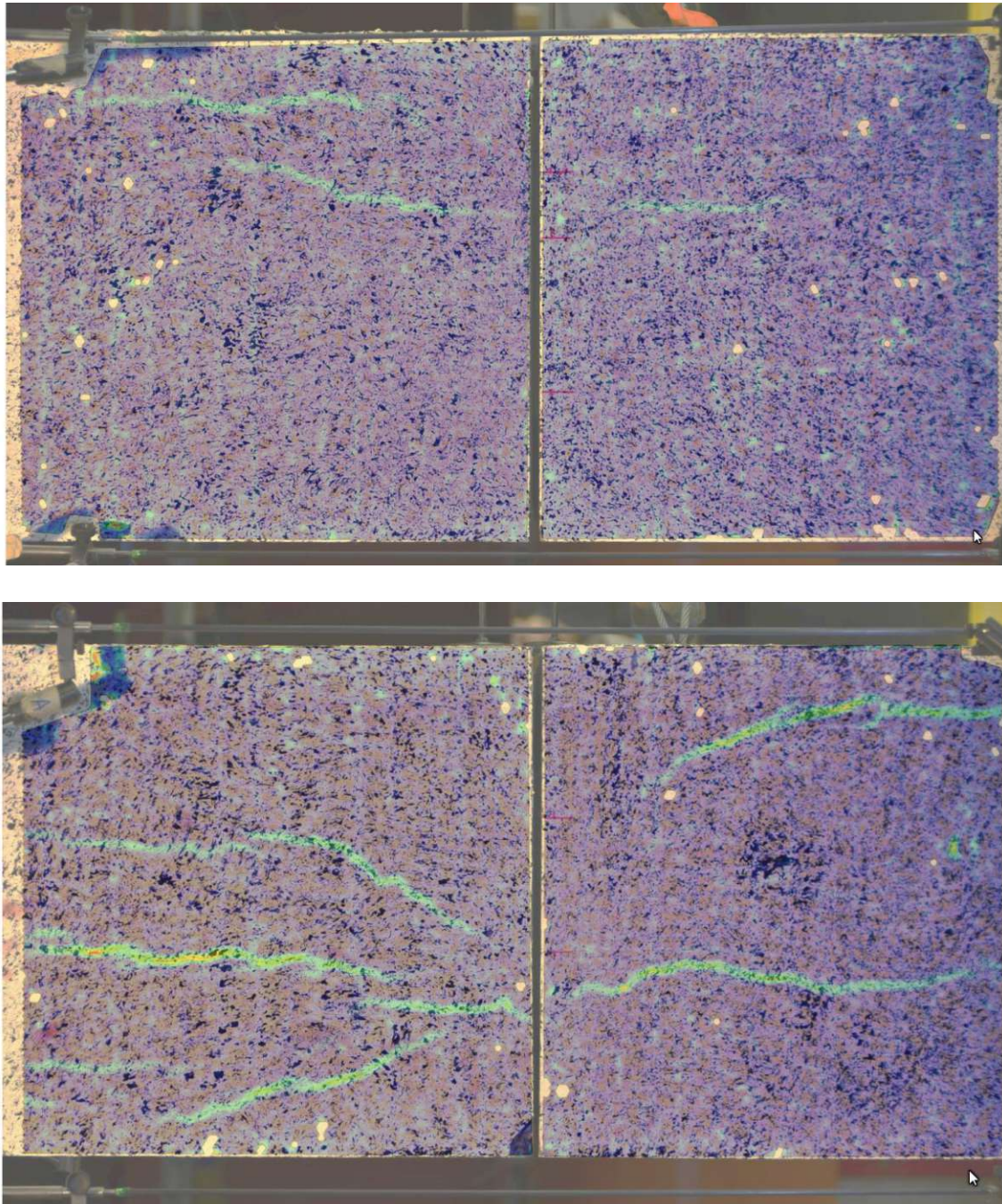


Abbildung 4.17: Rissbilder aus Aramis bei Erreichen von  $F_{SLs}$ , oben: Typ RT, unten Typ MT

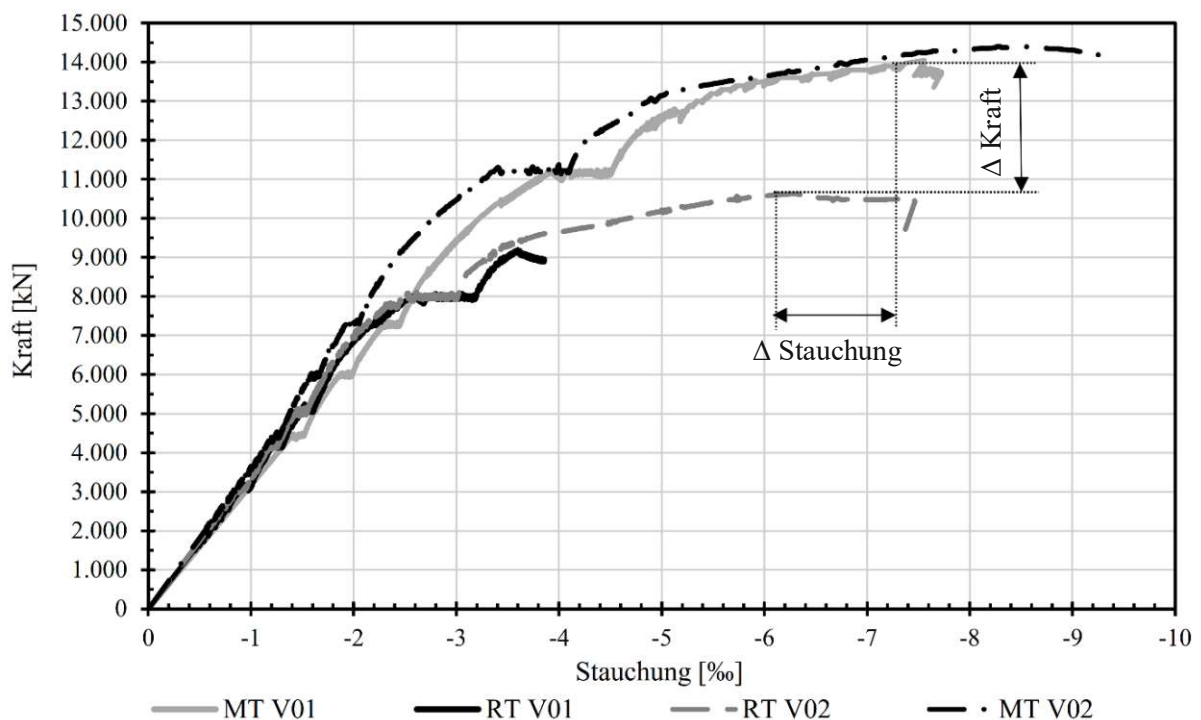
### 4.3.2. Vergleich ULS (Ultimate Limit State)

Das Erreichen der Tragfähigkeit der Längsfugen kennzeichnet auch das Erzielen des Grenzzustandes der Tragfähigkeit (=ULS). Diese Lasten sind den Last-Verformungsbeziehungen zu entnehmen. Die Last-Verformungsbeziehungen aus allen vier Versuchen konnten in einem gemeinsamen Diagramm zusammengeführt werden, um so einen direkten Vergleich anschaulich darzustellen. Die Ergebnisse sind auch in der nachfolgenden **Tabelle 4.4** ersichtlich

**Tabelle 4.4:** ULS-Lasten aus den Versuchen

| Versuch | Typ | $F_{\max,ULS}$ |
|---------|-----|----------------|
| RT V01  | RT  | 9.198 kN       |
| RT V02  | RT  | 10.626 kN      |
| MT V01  | MT  | 14.049 kN      |
| MT V02  | MT  | 14.404 kN      |

Als zusätzliche Information ist in **Abbildung 4.18** die Laststeigerung und der Zuwachs der Stauchung von Typ RT zu MT eingezeichnet. Eine Laststeigerung von mindestens 3.423 kN konnte erreicht werden. Diese Differenz ergibt sich aus RT V02 und MT V01.



**Abbildung 4.18:** Kraft-Dehnungsbeziehung Vergleich Typ RT und MT

Die Tragfähigkeitserhöhung laut Berechnungen in Kapitel 5 wäre bei einer Ausnützung der Druckstäbe bis zur Fließgrenze mit bis zu 4.271,8 kN möglich. Eine Erklärung für den geringeren Anstieg der Tragfähigkeit lässt sich auf den Kontakt Druckstab-zu-Druckstab zurückführen. Nach den



durchgeführten Versuchen wurden Fotos von der Längsfuge gemacht – eines dieser Bilder ist in **Abbildung 4.19** ersichtlich. Hier ist erkennbar, dass sich nicht alle Druckstäbe zu 100% getroffen haben.

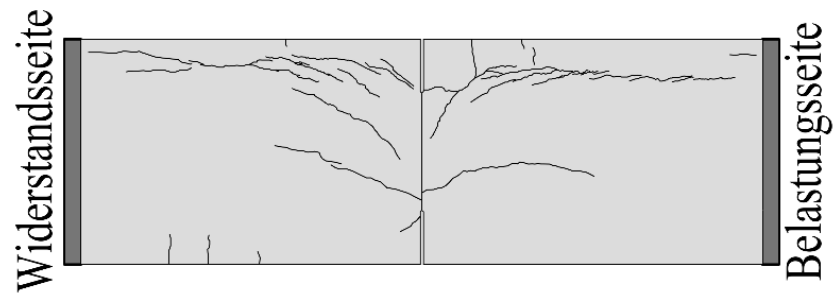


**Abbildung 4.19:** Abdrücke der Druckstäbe in der Kontaktfläche nach Versuchsdurchführung MT V02

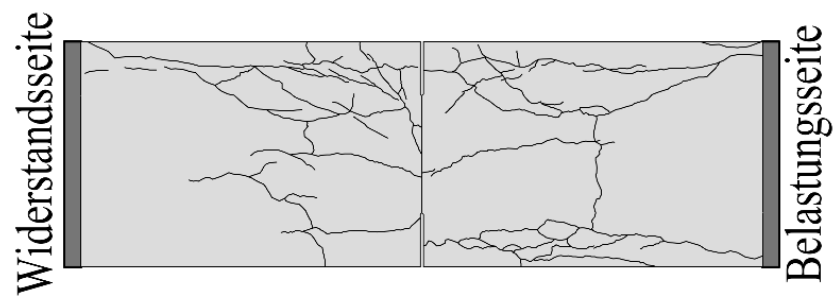
Durch Einspielen der Bilder in AutoCad 2018 konnten die tatsächlichen prozentuelle Flächenanteil der Druckstäbe ermittelt werden, die sich direkt getroffen haben. Bei MT V01 trafen sich ca. 80 % der Druckstäbe und bei MT V02 ca. 65%. Die ausgewerteten Bilder sind im Anhang D in der **Abbildung D.19** und **Abbildung D.20** ersichtlich.

Nach der Auswertung aller Daten und der Digitalisierung der händisch aufgezeichneten Rissbilder konnte man diese miteinander vergleichen. Eine Gegenüberstellung der Rissbilder nach Beenden der Versuche kann man **Abbildung 4.20** entnehmen. Im Laufe der Versuche konnte ein Ablösen der Betondeckung erkannt werden, sowohl beim Typ RT und beim Typ MT. Im Falle des Typs MT löste sich die Betondeckung der Unterseite komplett ab, bei den Versuchen des Typs RT wurde nur ein Teil der Betondeckung bei RT V02 abgelöst. Von den Rissbildern kann bis auf den Unterschied der abgelösten Betondeckung kein drastischer Unterschied erkennbar werden.

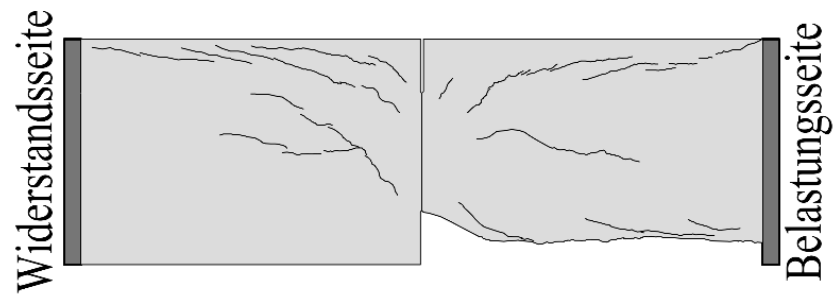
## Rissbild RT V01



## Rissbild RT V02



## Rissbild MT V01



## Rissbild MT V02

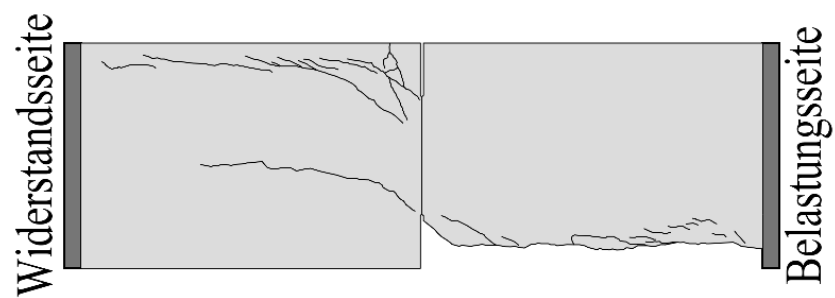


Abbildung 4.20: Rissvergleich Typ RT und Typ MT

## 5. Nachrechnung und Interpretation

### 5.1. Allgemeines

Nach der Auswertung der Versuchsdaten und der Darstellung der Ergebnisse werden diese Ergebnisse mit den getätigten Berechnungen aus dem folgenden Kapitel verglichen und Interpretationen getroffen. Die Auswertung des photogrammetrischen Messsystems und die daraus resultierenden Rissbilder dienen als Grundlage für den Vergleich der Modellnachbildung die mittels dem Programm ATENA 2D® durchgeführt wurden. Eine detailliertere Beschreibung zu ATENA 2D® ist in Kapitel 5.2.7 angegeben.

Im ersten Schritt werden die Traglasten mit dem aktuellen Normmodell nach EC 2 [5, 6], den vorhandenen Materialparametern aus der Materialprüfung (siehe Anhang B) und den tatsächlich vorhandenen Abständen der Bewehrung, die vor dem Betonieren gemessen wurden, nachgerechnet. Durch die Berechnung mit den vorhandenen Materialparametern kann man einen guten Vergleich mit den experimentell festgestellten Traglasten herstellen. Danach wird die Berechnung mittels Gleichungen laut Kapitel 2.3.4 durchgeführt. Die Berechnungen aus SIA 262 [12] mit den Ergänzungen von Herrn Professor Kaufmann beinhalten bereits die Gleichungen aus Kapitel 2.3.3 und werden aus diesem Grund hier nicht näher angeführt. Danach werden die Berechnungen mit den Ergänzungen von Herrn Professor Kaufmann unter Berücksichtigung des Querdruckes mit dem dazugehörigen Formalismus, der in Kapitel 2.3.5 erläutert wurde, beschrieben. Am Ende werden noch die Berechnungen basierend auf Kapitel 2.3.6 und Kapitel 2.3.7 getätigt, die noch weitere Ergänzungen von Herrn Professor Kolleger beinhalten, die eine aktualisierte Wichtung des Leiterabstandes mitberücksichtigt und im letzten Schritt werden die Tübbingtypen noch mit der Software ATENA 2D® (Cervenka Consulting, Tschechien), einem Programm für die nichtlineare Finite Elemente Methode, nachgerechnet.

Mit den Ergebnissen aus Kapitel 4 und den unterschiedlich berechneten Traglasten im folgenden Kapitel, kann eine Kontrolle der Ergebnisse mit den Traglasten aus den Versuchen getätigt werden. Die abschließende Diskussion bildet den Abschluss des fünften Kapitels.

### 5.2. Nachrechnung der Traglasten

In der experimentellen Untersuchung wurden die Lasten, die von den hydraulischen Pressen auf den Versuchsaufbau aufgebracht wurden, gemessen. Allfällige Eigenlasten der Versuchskörper bzw. des Versuchsaufbaues wurden dabei nicht berücksichtigt (vollständige Darstellung aller Ergebnisse sind Anhang C zu entnehmen). Aufgrund dieser Vernachlässigungen werden das Eigengewicht und die Lasten die infolge des Versuchsaufbaues auftreten, in den Berechnungen nicht berücksichtigt.

Im Gegensatz zu den Berechnungen für Typ RT wird für Typ MT nach Abschluss der Berechnungen noch der Anteil an Normkraft lt. Gleichung (28), die von den Druckstäben übertragen werden können, addiert.

$$F_{Rm,s} = A_s \cdot f_{ym,sAS} = 4.721,6 \text{ kN} \quad (28)$$

Um die nachfolgenden Berechnungen der Traglasten besser mit den gemessenen Kräften aus den Versuchen vergleichen zu können, wurde mit den Mittelwerten aus den ermittelten Materialkennwerten,

die im Anhang B angeführt sind, und den gemessenen Stababständen der einzelnen Bewehrungskörbe gerechnet.

Eine anschauliche Darstellung aller erhaltenen Ergebnisse der folgenden Unterkapitel sind **Abbildung 5.1** und **Abbildung 5.2** zu entnehmen.

### 5.2.1. EC 2 Abschnitt 6.7 [5, 6]

Die Berechnung der Traglast erfolgte mit Gleichung (1), die in Kapitel 2.3.1 zu finden ist. Die Querschnittsabmessungen des Tübbings RT und MT wurden aus Kapitel 3.2.1 bzw. dem Schalplan (**Abbildung A.1**) entnommen. Die Materialkennwerte des verwendeten Betons wurden aus den Versuchen der Probekörper entnommen (**Tabelle 3.2**). Die Bewehrungsführung des Bewehrungsstahles der Güte B550 B geht in die Berechnung nach EC 2 [5, 6] nicht ein und muss daher nicht berücksichtigt werden. Nur der Tragfähigkeitsanteil der hochfesten Druckstäbe wird bei der Nachrechnung des Typs MT miteinbezogen. Die Traglast für den Typ RT ergab sich zu 9.653,9 kN und für den Typ MT zu 14.371,9 kN bei MT V01 und 14.496,6 kN bei MT V02 und sind in der **Tabelle 5.1** aufgelistet. Die genauen Berechnungsschritte können Anhang E.1 entnommen werden.

**Tabelle 5.1:** Traglasten nach EC 2 [5, 6]

|                             | RT V01                  | RT V02                  | MT V01                  | MT V02                  |
|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $f_{cm}$                    | 51,43 N/mm <sup>2</sup> | 51,43 N/mm <sup>2</sup> | 51,41 N/mm <sup>2</sup> | 51,93 N/mm <sup>2</sup> |
| $A_{c1}$                    | 2800,00 cm <sup>2</sup> | 2800,00 cm <sup>2</sup> | 2800,00 cm <sup>2</sup> | 2800,00 cm <sup>2</sup> |
| $A_{c0}$                    | 1258,40 cm <sup>2</sup> | 1258,40 cm <sup>2</sup> | 1258,40 cm <sup>2</sup> | 1258,40 cm <sup>2</sup> |
| $F_{Rm,EC2,6.7}$            | <b>9.653,9 kN</b>       | <b>9.653,9 kN</b>       | <b>14.371,9 kN</b>      | <b>14.469,6 kN</b>      |
| $F_{Bruchlast}$             | 9.198,0 kN              | 10.626,0 kN             | 14.049,0 kN             | 14.404,0 kN             |
| $\eta = F_{Bruch} / F_{Rm}$ | <b>0,95</b>             | <b>1,10</b>             | <b>0,98</b>             | <b>1,00</b>             |
| Mittelwert                  | 1,01                    |                         |                         |                         |
| Standardabweichung          | 0,065                   |                         |                         |                         |
| Variationskoeffizient       | 0,065                   |                         |                         |                         |

### 5.2.2. SIA 262 Abschnitt 4.2.1.8 [12] mit Ergänzungen Kaufmann [13]

Um den Einfluss der Querbewehrung in den Tübbingungen zu berücksichtigen, beinhaltet die SIA 262 [12] Gleichungen zur Erhöhung der Betondruckfestigkeit, wenn eine dementsprechende Umschnürungsbe-  
wehrung vorhanden ist. Die Traglasten nach dieser Berechnungsart lieferten zu hohe Traglasten, die im Versuch nicht bestätigt wurden. Für RT V01 ergab sich als errechnete Traglast 11.591,9 kN, für RT V02 11.566,4 kN, für MT V01 16.328,5 kN und für MT V02 16.554,5 kN. Die berechneten Traglasten mit den verwendeten Parametern die in Kapitel 2.3.4 beschrieben wurden sind in **Tabelle 5.2** aufgelistet. Die genauen Berechnungsschritte sind in Anhang E.2 aufgelistet.

**Tabelle 5.2:** Traglasten nach Kapitel 2.3.4

|   | RT V01                   | RT V02                   | MT V01                   | MT V02                   |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| $f_{cm}$                                      | 51,43 N/mm <sup>2</sup>  | 51,43 N/mm <sup>2</sup>  | 51,41 N/mm <sup>2</sup>  | 51,93 N/mm <sup>2</sup>  |
| $c_{nom,Fuge}$                                | 48,40 mm                 | 51,40 mm                 | 48,40 mm                 | 48,40 mm                 |
| $s_{cb,0}$                                    | 154,40 mm                | 160,40 mm                | 154,40 mm                | 154,40 mm                |
| $s_{cb,1}$                                    | 92,00 mm                 | 90,00 mm                 | 92,00 mm                 | 88,50 mm                 |
| $s_{cb,2}$                                    | 85,00 mm                 | 85,00 mm                 | 85,00 mm                 | 85,00 mm                 |
| $s'_{cb}$                                     | 105,85 mm                | 106,35 mm                | 105,85 mm                | 104,10 mm                |
| $a_c$   | 620,00 mm                | 612,00 mm                | 615,75 mm                | 615,75 mm                |
| $v_y$   | 0,775                    | 0,777                    | 0,778                    | 0,787                    |
| $s_{ca,0}$                                    | 116,00 mm                | 122,00 mm                | 116,00 mm                | 116,00 mm                |
| $s_{ca,1}$                                    | 92,00 mm                 | 90,00 mm                 | 92,00 mm                 | 88,50 mm                 |
| $s_{ca,2}$                                    | 85,00 mm                 | 85,00 mm                 | 85,00 mm                 | 85,00 mm                 |
| $s'_{ca}$                                     | 96,25 mm                 | 96,75 mm                 | 96,25 mm                 | 94,50 mm                 |
| $b_c$   | 267,00 mm                | 268,00 mm                | 267,75 mm                | 267,75 mm                |
| $v_z$   | 0,866                    | 0,852                    | 0,859                    | 0,862                    |
| $\omega_c$                                    | 0,295                    | 0,297                    | 0,297                    | 0,299                    |
| $\sigma_1$                                    | -10,17 N/mm <sup>2</sup> | -10,12 N/mm <sup>2</sup> | -10,21 N/mm <sup>2</sup> | -10,53 N/mm <sup>2</sup> |
| <b><math>F_{Rm,SIA,Kauf.}</math></b>          | <b>11.591,9 kN</b>       | <b>11.566,4 kN</b>       | <b>16.328,5 kN</b>       | <b>16.554,5 kN</b>       |
| $F_{Bruchlast}$                               | 9.198,0 kN               | 10.626,0 kN              | 14.049,0 kN              | 14.404,0 kN              |
| <b><math>\eta = F_{Bruch} / F_{Rm}</math></b> | <b>0,79</b>              | <b>0,92</b>              | <b>0,86</b>              | <b>0,87</b>              |
| Mittelwert                                    | 0,86                     |                          |                          |                          |
| Standardabweichung                            | 0,052                    |                          |                          |                          |
| Variationskoeffizient                         | 0,060                    |                          |                          |                          |

### 5.2.3. EC 2 Abschnitt 3.1.9 [5, 6] mit Ergänzungen Kaufmann und Querdruck

Die Traglastberechnung mit den Ergänzungen von Professor Kaufmann beinhaltet sowohl die Gleichungen für den Querdruck  $\sigma_1$  und den Faktor  $k_c$  zur Erhöhung der Betondruckfestigkeit (beide Gleichungen stammen aus der SIA 262 [12]), als auch die Fallunterscheidung für den wirksamen umschnürten Bereich der Leiterbewehrung laut **Abbildung 2.10**.

Die berechneten Traglasten lt. Gleichung (13) für  $F_{Rm,SIA,Kauf.}$  sind für RT V01 und RT V02 10.214,5 kN bzw. 10.191,5 kN und 14.867,3 kN bzw. 15.043,7 kN für MT V01 bzw. MT V02 gültig. Der ausführliche Berechnungsweg kann Anhang E.3 (Typ MT) entnommen werden. Die berechneten Traglasten mit den verwendeten Parametern, die in Kapitel 2.3.5 beschrieben wurden, sind in **Tabelle 5.3** aufgelistet.

**Tabelle 5.3:** Traglasten nach Kapitel 2.3.5

|                             | RT V01                   | RT V02                   | MT V01                   | MT V02                   |
|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| $f_{cm}$                    | 51,43 N/mm <sup>2</sup>  | 51,43 N/mm <sup>2</sup>  | 51,41 N/mm <sup>2</sup>  | 51,93 N/mm <sup>2</sup>  |
| $c_{nom,Fuge}$              | 48,40 mm                 | 51,40 mm                 | 48,40 mm                 | 48,40 mm                 |
| $s_{cb,0}$                  | 154,40 mm                | 160,40 mm                | 154,40 mm                | 154,40 mm                |
| $s_{cb,1}$                  | 92,00 mm                 | 90,00 mm                 | 92,00 mm                 | 88,50 mm                 |
| $s_{cb,2}$                  | 85,00 mm                 | 85,00 mm                 | 90,00 mm                 | 90,00 mm                 |
| $s'_{cb}$                   | 105,85 mm                | 106,35 mm                | 107,10 mm                | 105,35 mm                |
| $a_c$                       | 620,00 mm                | 612,00 mm                | 615,75 mm                | 615,75 mm                |
| $v_y$                       | 0,775                    | 0,777                    | 0,772                    | 0,781                    |
| $s_{ca,0}$                  | 116,00 mm                | 122,00 mm                | 116,00 mm                | 116,00 mm                |
| $s_{ca,1}$                  | 92,00 mm                 | 90,00 mm                 | 92,00 mm                 | 88,50 mm                 |
| $s_{ca,2}$                  | 85,00 mm                 | 85,00 mm                 | 90,00 mm                 | 90,00 mm                 |
| $s'_{ca}$                   | 96,25 mm                 | 96,75 mm                 | 97,50 mm                 | 95,75 mm                 |
| $b_c$                       | 267,00 mm                | 268,00 mm                | 267,75 mm                | 267,75 mm                |
| $v_z$                       | 0,866                    | 0,852                    | 0,857                    | 0,860                    |
| $\omega_c$                  | 0,295                    | 0,297                    | 0,294                    | 0,295                    |
| $\sigma_1$                  | -15,17 N/mm <sup>2</sup> | -15,29 N/mm <sup>2</sup> | -15,09 N/mm <sup>2</sup> | -15,34 N/mm <sup>2</sup> |
| $\sigma_2$                  | 15,17 N/mm <sup>2</sup>  | 15,29 N/mm <sup>2</sup>  | 15,09 N/mm <sup>2</sup>  | 15,34 N/mm <sup>2</sup>  |
| $f_{cm,c}$                  | 95,77 N/mm <sup>2</sup>  | 96,09 N/mm <sup>2</sup>  | 95,57 N/mm <sup>2</sup>  | 96,78 N/mm <sup>2</sup>  |
| $F_{Rm,EC2,Kauf.}$          | <b>10.214,5 kN</b>       | <b>10.191,5 kN</b>       | <b>14.867,3 kN</b>       | <b>15.043,7 kN</b>       |
| $F_{Bruchlast}$             | 9.198,0 kN               | 10.626,0 kN              | 14.049,0 kN              | 14.404,0 kN              |
| $\eta = F_{Bruch} / F_{Rm}$ | <b>0,90</b>              | <b>1,04</b>              | <b>0,94</b>              | <b>0,96</b>              |
| Mittelwert                  | 0,96                     |                          |                          |                          |
| Standardabweichung          | 0,059                    |                          |                          |                          |
| Variationskoeffizient       | 0,062                    |                          |                          |                          |

### 5.2.4. SIA 262 Abschnitt 4.2.1.8 [12] mit Ergänzungen Kaufmann-Kollegger

Herr Professor Kollegger beschrieb das Tragverhalten mit den geometrischen Gegebenheiten und der Bewehrungsführung der Leiterbewehrung mit einer anderen Wichtung der Abstände als Herr Professor Kaufmann.

Die Gleichungen für die Traglast können Kapitel 2.3.6 entnommen werden. Das Ergebnis für Typ RT (RT V01 = 9.754,6 kN und RT V02 = 9.589,2 kN) und Typ MT (MT V01 = 14.487,3 kN und MT V02 = 14.618,4 kN) sind Anhang E.4 zu entnehmen. Die berechneten Traglasten mit den verwendeten Parametern, die in Kapitel 2.3.6 beschrieben wurden, sind in **Tabelle 5.4** aufgelistet.

**Tabelle 5.4:** Traglasten nach Kapitel 2.3.6

|   | RT V01                  | RT V02                  | MT V01                  | MT V02                  |
|---|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $f_{cm}$                                      | 51,43 N/mm <sup>2</sup> | 51,43 N/mm <sup>2</sup> | 51,41 N/mm <sup>2</sup> | 51,93 N/mm <sup>2</sup> |
| $c_{nom,Fuge}$                                | 48,40 mm                | 51,40 mm                | 48,40 mm                | 48,40 mm                |
| $s_{cb,0}$                                    | 154,40 mm               | 160,40 mm               | 154,40 mm               | 154,40 mm               |
| $s_{cb,1}$                                    | 92,00 mm                | 90,00 mm                | 92,00 mm                | 88,50 mm                |
| $s'_{cb}$                                     | 133,60 mm               | 136,93 mm               | 133,60 mm               | 132,43 mm               |
| $a_c$   | 620,00 mm               | 612,00 mm               | 615,75 mm               | 615,75 mm               |
| $v_y$   | 0,641                   | 0,630                   | 0,645                   | 0,651                   |
| $s_{ca,0}$                                    | 116,00 mm               | 122,00 mm               | 116,00 mm               | 116,00 mm               |
| $s_{ca,1}$                                    | 92,00 mm                | 90,00 mm                | 92,00 mm                | 88,50 mm                |
| $s'_{ca}$                                     | 108,00 mm               | 111,33 mm               | 108,00 mm               | 106,83 mm               |
| $b_c$   | 267,00 mm               | 268,00 mm               | 267,75 mm               | 267,75 mm               |
| $v_z$   | 0,846                   | 0,828                   | 0,839                   | 0,841                   |
| $\omega_c$                                    | 0,234                   | 0,231                   | 0,235                   | 0,235                   |
| $\sigma_1$                                    | -6,52 N/mm <sup>2</sup> | -6,19 N/mm <sup>2</sup> | -6,55 N/mm <sup>2</sup> | -6,68 N/mm <sup>2</sup> |
| <b><math>F_{Rm,SIA,Kauf.+Kol.}</math></b>     | <b>9.754,6 kN</b>       | <b>9.589,2 kN</b>       | <b>14.487,3 kN</b>      | <b>14.618,4 kN</b>      |
| $F_{Bruchlast}$                               | 9.198,0 kN              | 10.626,0 kN             | 14.049,0 kN             | 14.404,0 kN             |
| <b><math>\eta = F_{Bruch} / F_{Rm}</math></b> | <b>0,94</b>             | <b>1,11</b>             | <b>0,97</b>             | <b>0,99</b>             |
| Mittelwert                                    | 1,00                    |                         |                         |                         |
| Standardabweichung                            | 0,073                   |                         |                         |                         |
| Variationskoeffizient                         | 0,073                   |                         |                         |                         |

### 5.2.5. EC 2 Abschnitt 3.1.9 [5, 6] mit Ergänzungen Kaufmann-Kollegger und Querdruck

Durch die Wichtung der Leiterabstände durch Herrn Professor Kollegger und dem dadurch entstandenen neuen Tragverhalten bekamen die Gleichungen aus Kapitel 2.3.5 eine neue Bedeutung. Diese wurden in Kapitel 2.3.7 separat angeschrieben und werden nun an dieser Stelle dargestellt. Die Typen RT und MT unterscheiden sich wieder nur um den Traganteil der hochfesten Druckstäbe. Die Wichtung der Leiterabstände zieht die Berechnung auf die sichere Seite und gibt kleinere Bemessungswerte aus. Die berechneten Traglasten wurden für alle Versuche berechnet und sind für RT V01 8.962,7 kN, für RT V02 8.842,1 kN, für MT V01 13.688,9 kN und für MT V02 13.804,7 kN. Die ausführlichen Berechnungen sind für Typ RT und MT Kapitel E.5 zu entnehmen. Die berechneten Traglasten mit den verwendeten Parametern, die in Kapitel 2.3.6 beschrieben wurden, sind in **Tabelle 5.5** aufgelistet.

**Tabelle 5.5:** Traglasten nach Kapitel 2.3.7

|   | RT V01                   | RT V02                   | MT V01                   | MT V02                   |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| $f_{cm}$                                      | 51,43 N/mm <sup>2</sup>  | 51,43 N/mm <sup>2</sup>  | 51,41 N/mm <sup>2</sup>  | 51,93 N/mm <sup>2</sup>  |
| $c_{nom,Fuge}$                                | 48,40 mm                 | 51,40 mm                 | 48,40 mm                 | 48,40 mm                 |
| $s_{cb,0}$                                    | 154,40 mm                | 160,40 mm                | 154,40 mm                | 154,40 mm                |
| $s_{cb,1}$                                    | 92,00 mm                 | 90,00 mm                 | 92,00 mm                 | 88,50 mm                 |
| $s'_{cb}$                                     | 133,60 mm                | 136,93 mm                | 133,60 mm                | 132,43 mm                |
| $a_c$   | 620,00 mm                | 612,00 mm                | 615,75 mm                | 615,75 mm                |
| $v_y$   | 0,641                    | 0,630                    | 0,645                    | 0,651                    |
| $s_{ca,0}$                                    | 116,00 mm                | 122,00 mm                | 116,00 mm                | 116,00 mm                |
| $s_{ca,1}$                                    | 92,00 mm                 | 90,00 mm                 | 92,00 mm                 | 88,50 mm                 |
| $s'_{ca}$                                     | 108,00 mm                | 111,33 mm                | 108,00 mm                | 106,83 mm                |
| $b_c$   | 267,00 mm                | 268,00 mm                | 267,75 mm                | 267,75 mm                |
| $v_z$   | 0,846                    | 0,828                    | 0,839                    | 0,841                    |
| $\omega_c$                                    | 0,234                    | 0,231                    | 0,235                    | 0,235                    |
| $\sigma_1$                                    | -12,02 N/mm <sup>2</sup> | -11,88 N/mm <sup>2</sup> | -12,10 N/mm <sup>2</sup> | -12,20 N/mm <sup>2</sup> |
| $\sigma_2$                                    | 12,02 N/mm <sup>2</sup>  | 11,88 N/mm <sup>2</sup>  | 12,10 N/mm <sup>2</sup>  | 12,20 N/mm <sup>2</sup>  |
| $f_{cm,c}$                                    | 87,90 N/mm <sup>2</sup>  | 87,55 N/mm <sup>2</sup>  | 88,08 N/mm <sup>2</sup>  | 88,93 N/mm <sup>2</sup>  |
| <b><math>F_{Rm,EC2,Kauf.+Kol.}</math></b>     | <b>8.962,7 kN</b>        | <b>8.842,1 kN</b>        | <b>13.688,9 kN</b>       | <b>13.804,7 kN</b>       |
| $F_{Bruchlast}$                               | 9.198,0 kN               | 10.626,0 kN              | 14.049,0 kN              | 14.404,0 kN              |
| <b><math>\eta = F_{Bruch} / F_{Rm}</math></b> | <b>1,03</b>              | <b>1,20</b>              | <b>1,03</b>              | <b>1,04</b>              |
| Mittelwert                                    | 1,07                     |                          |                          |                          |
| Standardabweichung                            | 0,085                    |                          |                          |                          |
| Variationskoeffizient                         | 0,079                    |                          |                          |                          |



### 5.2.6. Traglast laut Schmidt-Thrö et al. [20]

Als weitere Berechnungsmöglichkeit für die Tragfähigkeit der Tübbing-Längsfuge wird hier noch die Gleichung (26) angeführt. Der Erhöhungsfaktor in dieser Betrachtung liegt zwischen dem Quadratwurzelansatz und dem Kubikwurzelansatz, wie bereits in Kapitel 2.3.8 erläutert.

Die Traglast für den Typ RT ergab sich zu 8540,2 kN und für den Typ MT zu 13.258,7 kN bei MT V01 und 13.345,0 kN bei MT V02 und sind in der **Tabelle 5.6** aufgelistet. Die genauen Berechnungsschritte können Anhang E.6 entnommen werden.

**Tabelle 5.6:** Traglasten nach Kapitel 2.3.8

|                             | RT V01                  | RT V02                  | MT V01                  | MT V02                  |
|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $f_{cm}$                    | 51,43 N/mm <sup>2</sup> | 51,43 N/mm <sup>2</sup> | 51,41 N/mm <sup>2</sup> | 51,93 N/mm <sup>2</sup> |
| $A_{c1}$                    | 2800,00 cm <sup>2</sup> | 2800,00 cm <sup>2</sup> | 2800,00 cm <sup>2</sup> | 2800,00 cm <sup>2</sup> |
| $A_{c0}$                    | 1258,40 cm <sup>2</sup> | 1258,40 cm <sup>2</sup> | 1258,40 cm <sup>2</sup> | 1258,40 cm <sup>2</sup> |
| $\Delta_{quad}$             | 0,492                   | 0,492                   | 0,492                   | 0,492                   |
| $F_{Rm,[20]}$               | <b>8.540,2 kN</b>       | <b>8.540,2 kN</b>       | <b>13.258,7 kN</b>      | <b>13.345,0 kN</b>      |
| $F_{Bruchlast}$             | 9.198,0 kN              | 10.626,0 kN             | 14.049,0 kN             | 14.404,0 kN             |
| $\eta = F_{Bruch} / F_{Rm}$ | <b>1,08</b>             | <b>1,24</b>             | <b>1,06</b>             | <b>1,08</b>             |
| Mittelwert                  | 1,12                    |                         |                         |                         |
| Standardabweichung          | 0,087                   |                         |                         |                         |
| Variationskoeffizient       | 0,078                   |                         |                         |                         |

### 5.2.7. Zusammenfassung der Traglasten

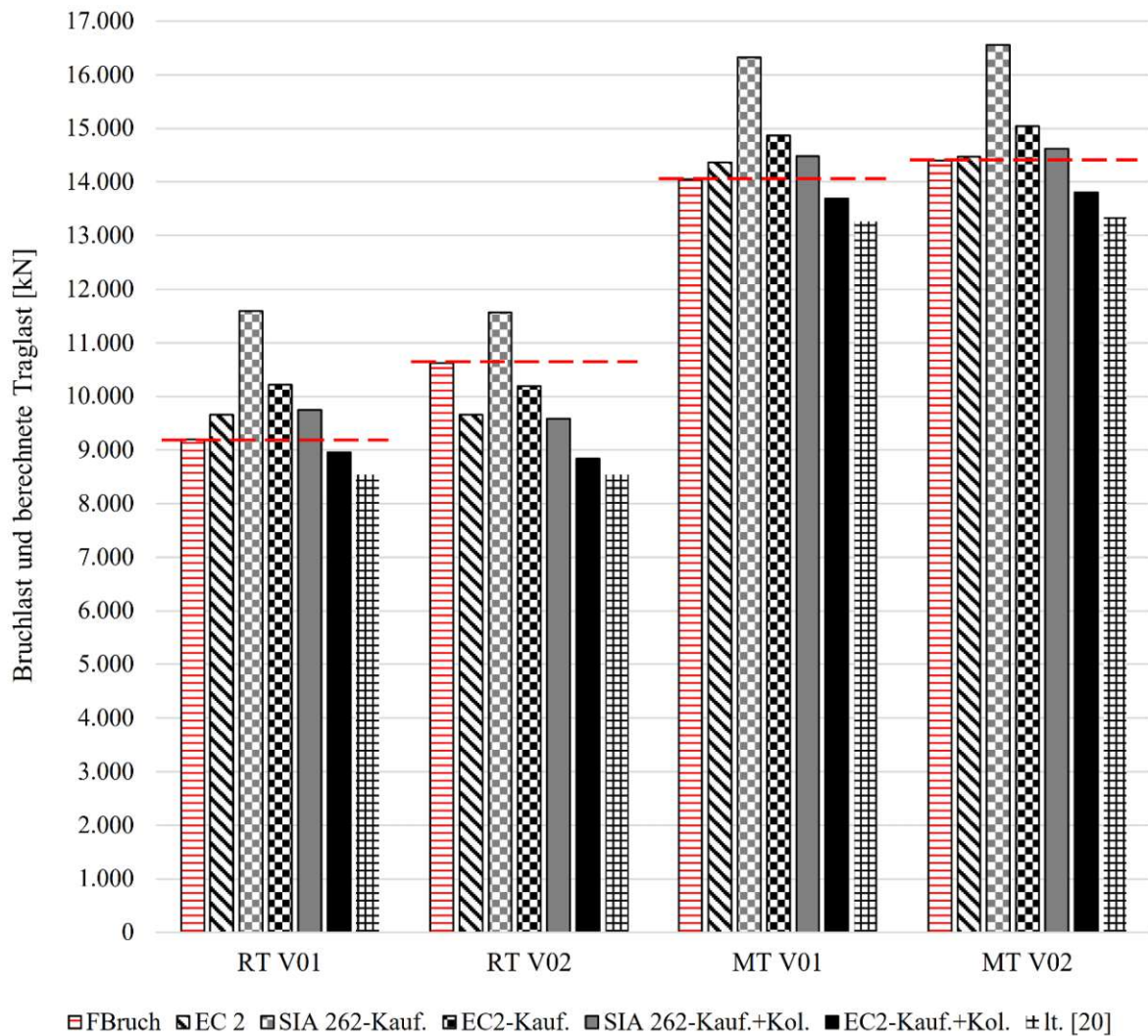
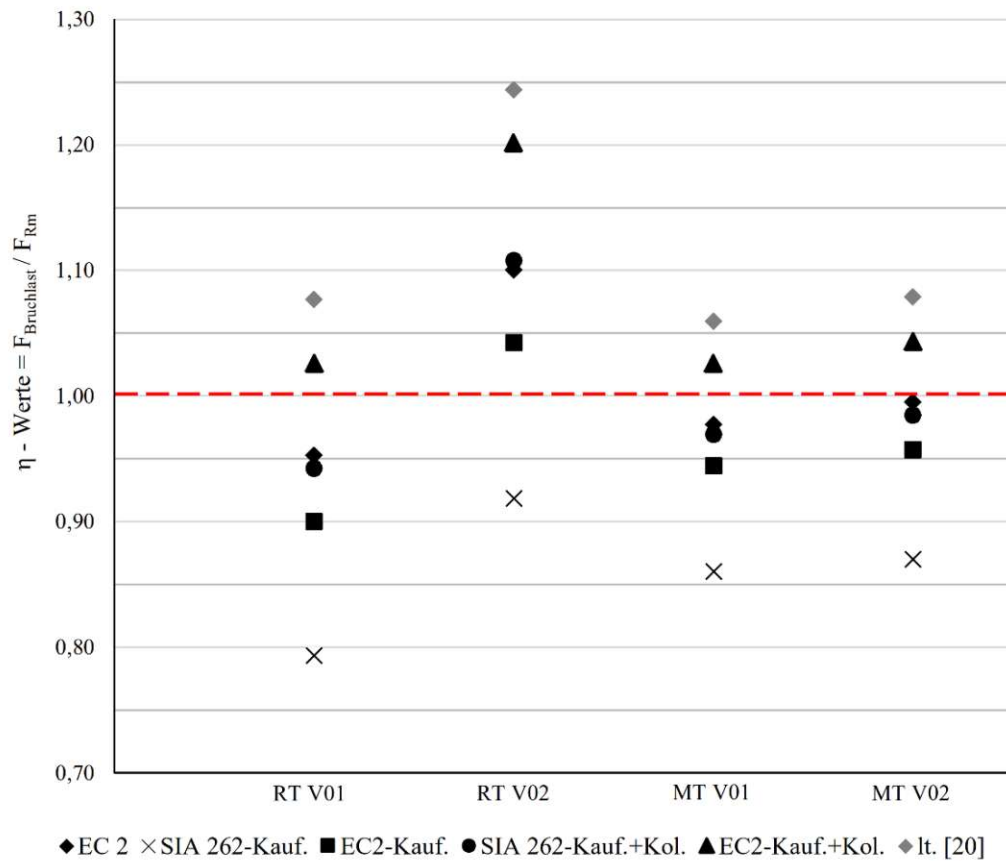


Abbildung 5.1: Balkendiagramm der berechneten Traglasten und der Bruchlasten

In **Abbildung 5.1** sind die berechneten Traglasten zur Veranschaulichung mit den Bruchlasten aus den Versuchen noch einmal in ein Balkendiagramm zusammengefasst worden, um die Streuweite der Ergebnisse auf einen Blick erfassen zu können. Die Berechnung nach Kapitel 2.3.4 übersteigen die erreichten Bruchlasten im Versuch am meisten, bei den Berechnungen nach Kapitel 2.3.7 findet man wiederum Ergebnisse vor die am weitesten auf der sicheren Seite liegen. Des Weiteren kann man bei RT V02 erkennen, dass im Vergleich zu den anderen Versuchslasten und errechneten Lasten ein Ausschlag nach oben gegeben ist, da lediglich die Berechnungen nach SIA 262 [12] mit Ergänzungen von Prof. Kaufmann über dem Versuchswert liegen. Die Berechnungen, die von Schmidt-Thrö et al. [20] veröffentlicht wurden, liegen am weitesten unter den erreichten Versuchslasten.

Für eine statistische Auswertung wurden auch die Ausnutzungsgrade und deren Mittelwerte und Standardabweichungen in **Abbildung 5.2** dargestellt. Hier sind dieselben Interpretationen wie in **Abbildung 5.1** zutreffend.

**Statistik:**

|                      |   |
|----------------------|---|
| ◆ EC 2               | Mittelwert = 1,01<br>Standardabweichung = 0,065 |
| × SIA 262-Kauf.      | Mittelwert = 0,86<br>Standardabweichung = 0,052 |
| ■ EC 2-Kauf.         | Mittelwert = 0,96<br>Standardabweichung = 0,059 |
| ● SIA 262-Kauf.+Kol. | Mittelwert = 1,00<br>Standardabweichung = 0,073 |
| ▲ EC 2-Kauf.+Kol.    | Mittelwert = 1,07<br>Standardabweichung = 0,085 |
| ◆ lt. [20]           | Mittelwert = 1,12<br>Standardabweichung = 0,087 |

**Abbildung 5.2:** Ausnutzung der berechneten Traglasten und der Bruchlasten

### 5.2.8. ATENA 2D®

Die Nachrechnung der Versuche wurde auch mit der Software ATENA 2D® von der Firma Cervenka Consulting durchgeführt. Hier war es auch möglich, verschiedene Varianten des Typs MT zu modellieren und deren Auswirkungen auf die Tragfähigkeit zu überprüfen (siehe **Abbildung 5.6**).

Die Modellierung mit Lagerungsbedingungen und der Bewehrungsführung kann **Abbildung 5.3** entnommen werden.

#### Materialparameter

Die bereits bekannten Materialparameter aus Kapitel 3.3 für den Beton und den Bewehrungsstahl wurden auch im Programm verwendet. Bei Parametern, die in den verschiedenen Materialmodellen noch vorherrschend sind, wurden teilweise die Standardeinstellungen übernommen.

#### Modellierung

Die Tübbinge wurden gemäß der Schal- und Bewehrungspläne, die in Anhang A ersichtlich sind, eingegeben. Die Auflagersituation auf der Widerstandsseite wurde mit einer 10 cm großen Stahlplatte modelliert, die in x- und y-Richtung eingespannt wurde, und die Belastungsseite wurde mit einer 15 cm Stahlplatte modelliert, die in y-Richtung gehalten wurde und eine Lastausbreitung durch eine punktförmige Belastung gewährleistet hat. Die 3 mm dicke Kontaktfläche wurde als Interface nachgebildet, da durch dieses Interface die beiden Tübbinge nicht starr miteinander verbunden sind und dadurch eine Querdehnungsbehinderung vermieden wurde. Durch die Wahl dieser Randbedingungen konnte das Verhalten des Versuches nachgebildet werden. Am Lasteinleitungspunkt wurde ein Monitoringpoint (Messpunkt) für die Erfassung der Kraft gesetzt und im Nahbereich der Lasteinleitung wurde ein Monitoringpoint für das Messen der Verformung positioniert.

#### Materialmodelle

Der Beton wurde mit dem Materialmodell SBETA beschrieben. SBETA ist ein orthotropes Materialmodell mit verschmierten Rissen und wird für die Analyse von ebenen Spannungszuständen verwendet. Hier nun eine Auflistung aller Eigenschaften, die im Materialmodell SBETA berücksichtigt werden:

- Verbund von Beton und Bewehrung wird als perfekt angenommen
- Nichtlineares Verhalten bei Druckbelastungen (inkl. Ver- und Entfestigung)
- Reduktion der Druckfestigkeit nach der Rissentstehung
- Biaxiales Versagenskriterium
- Unter Zugbeanspruchungen reißt der Beton (begründet durch nichtlineares Bruchmodell)
- „Tension-Stiffening“ Effekt wird berücksichtigt
- Schubsteifigkeitsreduktion nach der Rissentstehung
- Betrachtete Modell für das Verhalten der Risse: fixierte Risse und rotierende Risse

Der Bewehrungsstahl B550 B und der Bewehrungsstahl SAS 670/800 wurden mit einem bilinearen Materialverhalten mit Berücksichtigung der Verfestigung beim Fließen nachgebildet. Der Elastizitätsmodul des Bewehrungsstahles SAS 670/800 wurde um das Elastizitätsmodul des Betons abgemindert, da im Programm die Elastizitätsmoduli überlagert werden. Bei der Druckbewehrung 18 ø22 hat das

einen größeren Einfluss auf die Verformung als bei den Bewehrungen mit Material B550 B. Deswegen wurde der Elastizitätsmodul nur bei diesem Werkstoff reduziert.

Die Stahlplatten, die für die Lagersituation und die Lasteinleitung modelliert wurden, haben ein linear elastisches Materialverhalten mit einem E-Modul von  $999.000 \text{ N/mm}^2$ .

Das Finite Elemente Netz wurde im Bereich der Kontaktfläche mit einer Länge von 1,5 mm gewählt, im Nahbereich der Fuge (20 cm links und rechts davon) mit einem Rechtecksnetz mit einer Länge von 0,5 cm versehen und die restlichen Bereiche bekamen ein Netz mit einer Kantenlänge von 2 cm.

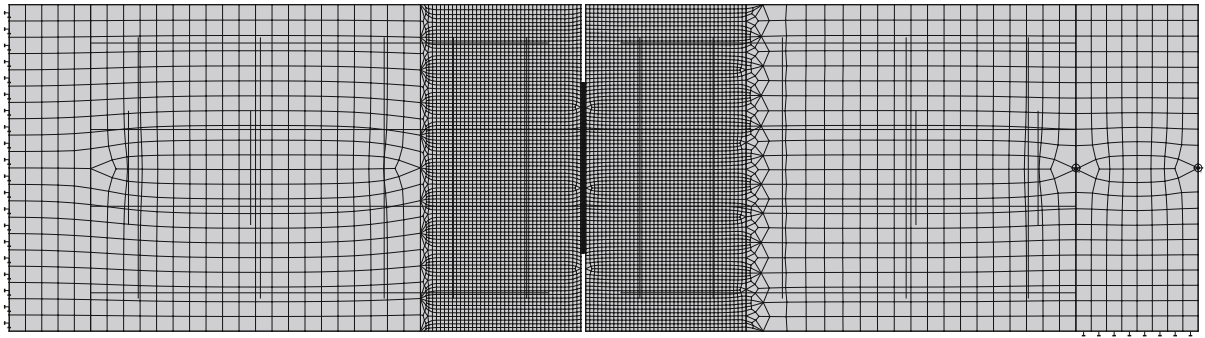


Abbildung 5.3: Modellabbildung Typ MT in ATENA 2D®

### Berechnung

Für die Berechnung wurde das Analysesystem Standard Newton-Raphson verwendet und eine stufenweise Lastaufbringung von 0,4 mm pro Laststufe angesetzt. Bei der Modelleingabe wurden zwei Lastfälle erstellt. Der erste Lastfall diente zur Eingabe der Lagerungsbedingungen und Lastfall zwei wurde mit der weggesteuerten Last versehen. Im Anschluss wurden zwischen 11 und 17 Laststufen simuliert. Diese Anzahl war abhängig vom Tübbingtyp und den getroffenen Variationen.

Nach der Berechnung des Modells wurden Ergebnisse erhalten, die weder die Traglasten der Versuche noch die Stauchungen abbilden konnten. Die Traglasten aus ATENA 2D® sind in **Tabelle 5.7** ersichtlich, in der die Traglasten und Stauchungen mit den Werten aus der Versuchsdurchführung verglichen wurden.

Für Typ RT wurde eine Last-Verformungsbeziehungen erstellt, die man der **Abbildung 5.5** entnehmen kann.

Beim Typen MT ist außer der Betrachtung des Regeltyps noch ein Modell von MT V01 und MT V02 mit den tatsächlich aufeinander getroffenen Druckstäben (80% bzw. 65% laut Kapitel 4.3.2) berechnet und auch zwei weitere Modelle, die einen Abstand der Druckstäbe von der Fuge berücksichtigen. Eine exemplarische Darstellung dieser Variationsmöglichkeiten ist **Abbildung 5.4** zu entnehmen. Diese Last-Verformungsbeziehungen sind **Abbildung 5.6** und **Abbildung 5.7** zu entnehmen.

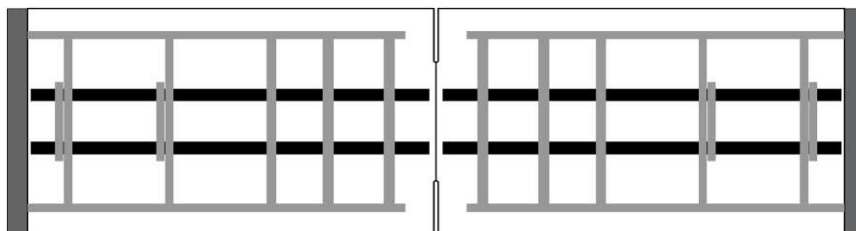


Abbildung 5.4: Abstand der Druckstäbe von der Längsfuge

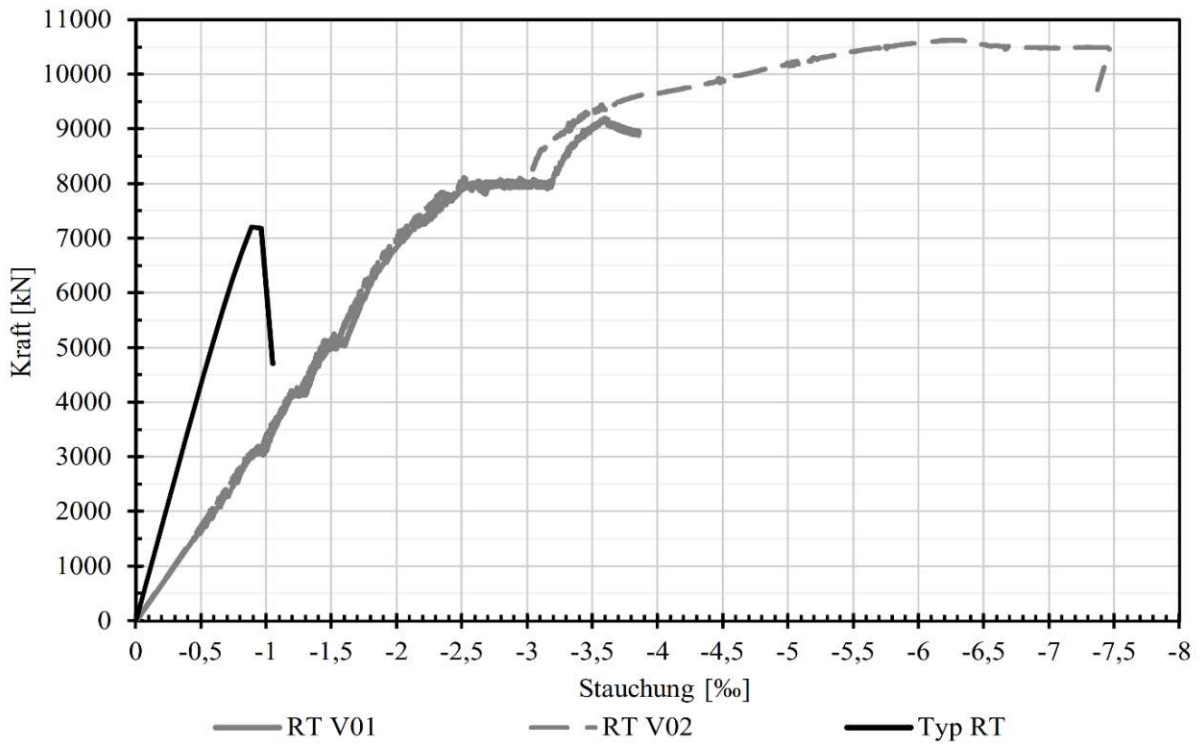


Abbildung 5.5: Last-Verformungsbeziehung Typ RT ATENA 2D®

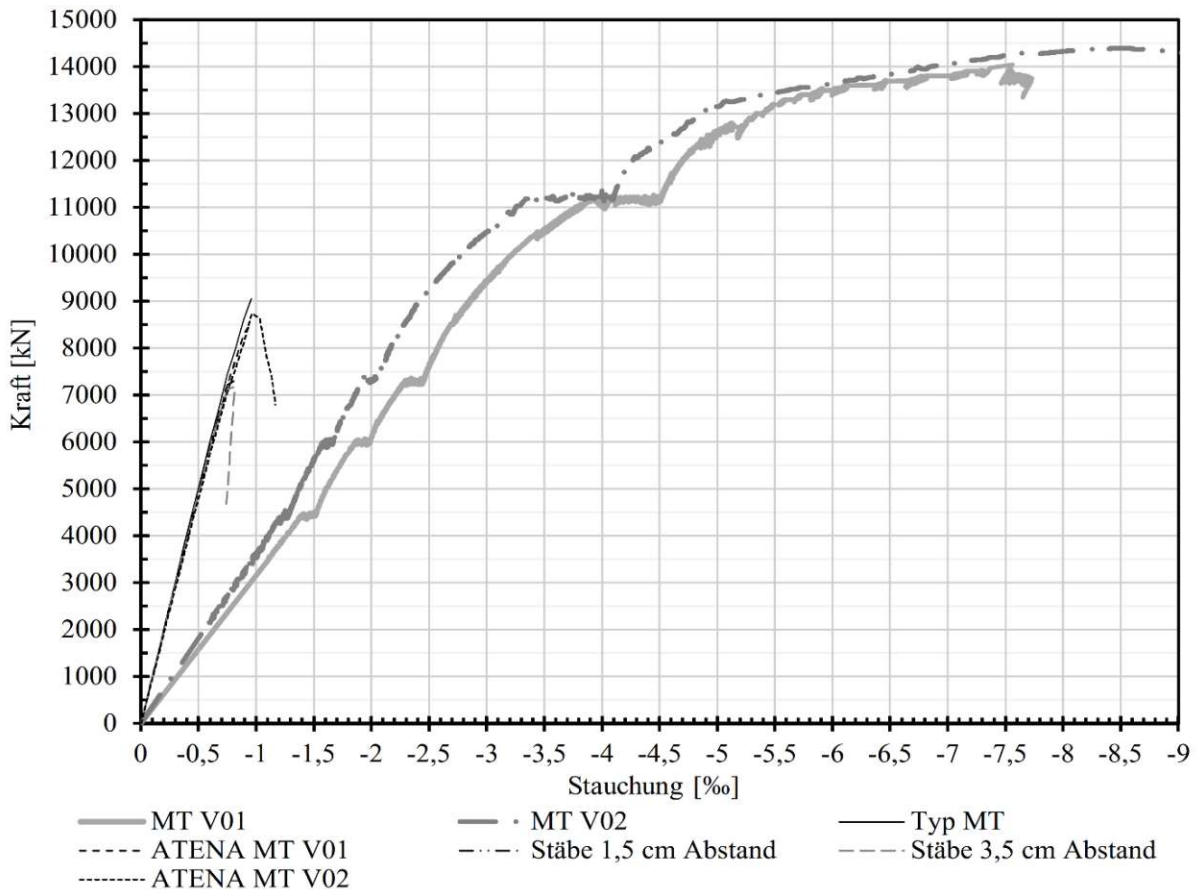
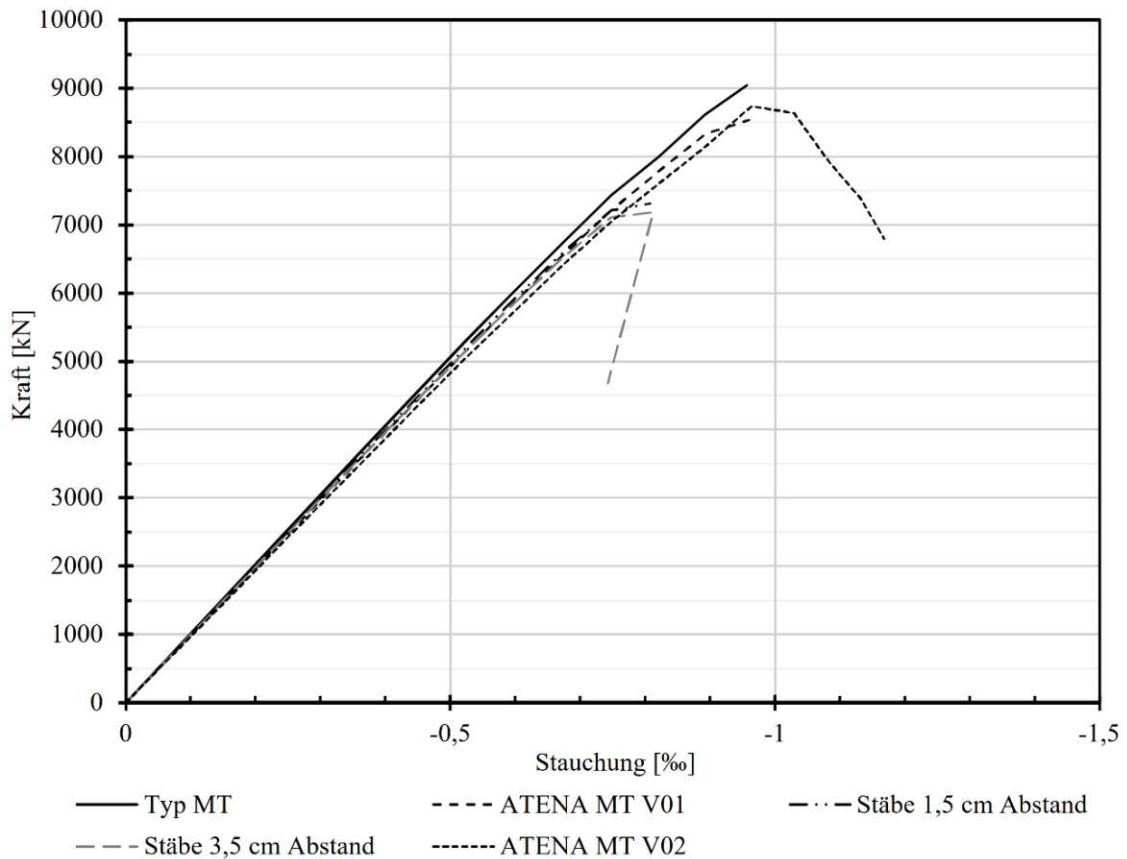


Abbildung 5.6: Last-Verformungsbeziehung Typ MT ATENA 2D®



**Abbildung 5.7:** Last-Verformungsbeziehung Typ MT ATENA 2D®, detailliert

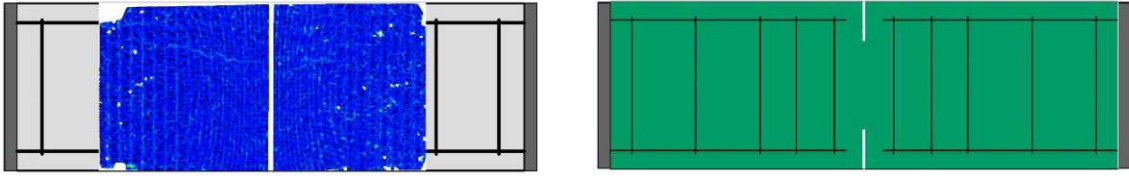
In **Abbildung 5.7** ist ein klarer Abfall der Traglast erkennbar, wenn man die Druckstäbe nicht bis zur Kontaktfläche führt. In der Modellierung und Nachrechnung beträgt dieser Unterschied ca. 20%.

**Tabelle 5.7:** Vergleich ATENA 2D®- und Versuchsergebnisse

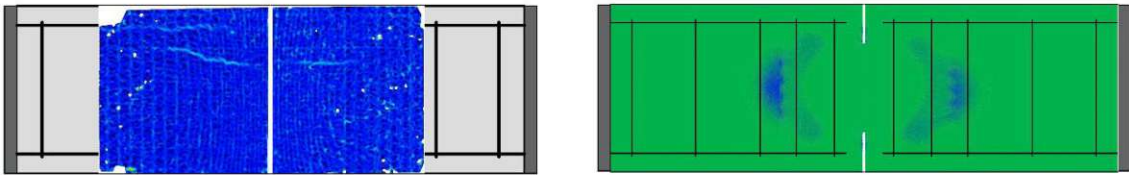
|           | Typ | F         | $F_i / F_{\max}$ | $\varepsilon_i$ | $\varepsilon_i / \varepsilon_{\max}$ |
|-----------|-----|-----------|------------------|-----------------|--------------------------------------|
| ATENA 2D® |     | 7.202 kN  | 0,68             | -0,9            | 0,14                                 |
| Versuch 2 | RT  | 9.198 kN  | 0,87             | -3,6            | 0,57                                 |
| Versuch 3 |     | 10.626 kN | 1,0              | -6,3            | 1,0                                  |
| ATENA 2D® |     | 9.043 kN  | 0,63             | -1,0            | 0,12                                 |
| Versuch 1 | MT  | 14.049 kN | 0,98             | -7,6            | 0,92                                 |
| Versuch 4 |     | 14.404 kN | 1,0              | -8,3            | 1,0                                  |

Als weiteres Ergebnis aus der Programmeingabe kann man auch zu jeder Laststufe ein Rissbild erzeugen. Somit kann das reale Verhalten der Rissentwicklung, das mit dem photogrammetrischen Messsystem ermittelt wurde, mit den Berechnungsergebnissen verglichen werden. Die Rissbilder aus ATENA 2D wurden bei der Systemmodellierung von Typ RT mit RT V02 (siehe **Abbildung 5.8**) und von Typ MT mit MT V02 (siehe **Abbildung 5.9**) verglichen.

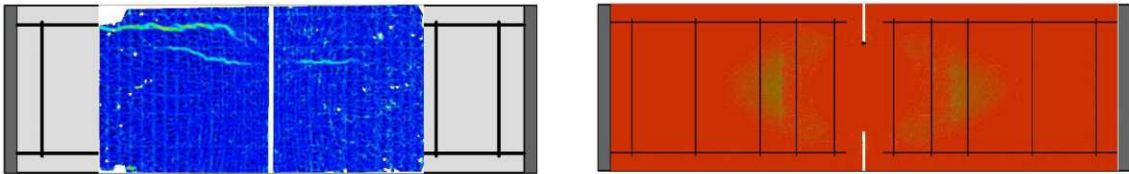
Haltephase 3.100 kN



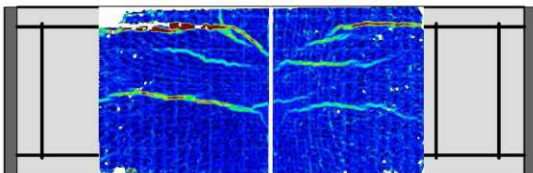
Haltephase 4.200 kN



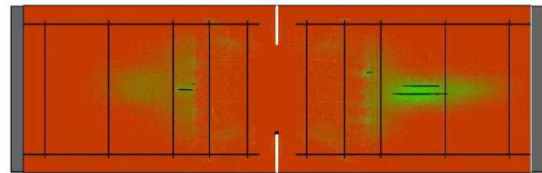
Haltephase 5.100 kN



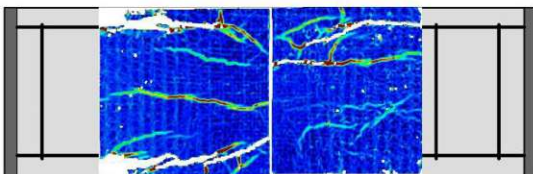
Haltephase 8.100 kN



7.202 kN - Höchstlast



10.626 kN - Höchstlast



Ende Versuchsnachbildung 4.702 kN

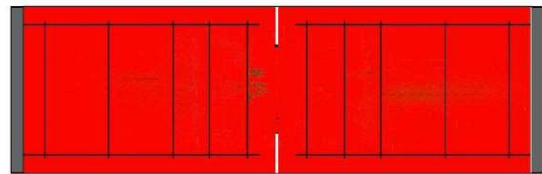
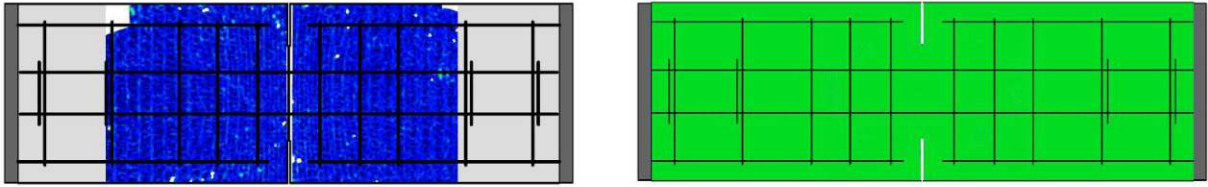


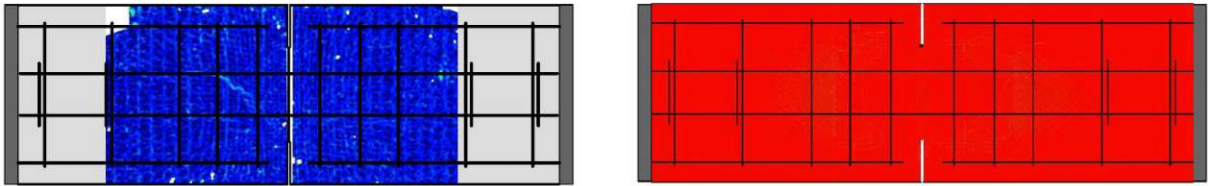
Abbildung 5.8: Vergleich Rissbilder Typ RT Aramis (linke Spalte) und ATENA 2D® (rechte Spalte)



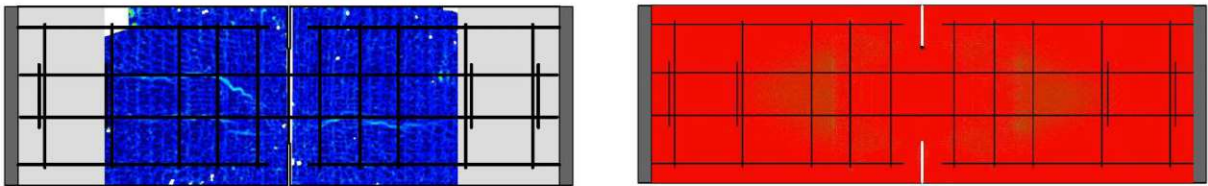
Haltephase 4.450 kN



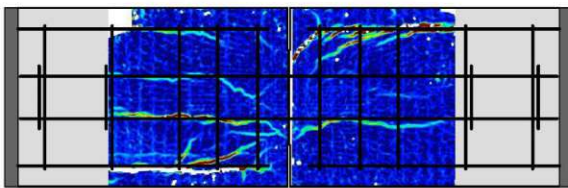
Haltephase 6.000 kN



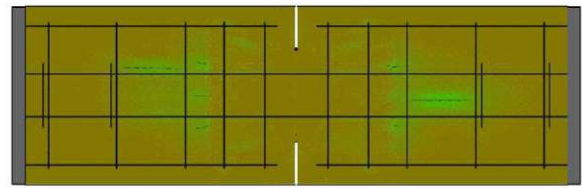
Haltephase 7.300 kN



Haltephase 11.200 kN



9.043 kN - Höchstlast



14.404 kN - Höchstlast

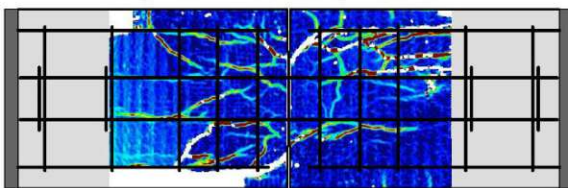


Abbildung 5.9: Vergleich Rissbilder Typ MT Aramis (linke Spalte) und ATENA 2D® (rechte Spalte)

## Resümee

Da es sich bei ATENA 2D® um ein 2D-Programm handelt und der Versuchsaufbau und die Versuchsnachbildung in ATENA 3D® besser abgebildet werden könnte, kam es bei der Auswertung zu Ungenauigkeiten. Die Verformungen, die in ATENA 2D® berechnet wurden, liegen bis zu 87% unter den Verformungen, die im Versuch aufgetreten sind und auch die Lasten aus ATENA 2D® liegen weit unter den Versuchslasten die in der experimentellen Untersuchung erreicht wurden. Nach Vergleich der Rissbilder konnte des Weiteren erkannt werden, dass das Rissbild und somit der Versagensmechanismus nicht mit den realen Versuchen übereinstimmt. Diese Ungenauigkeiten können auf folgende vier Gründe zurückgeführt werden.

- Das dreidimensionale Problem wurde auf ein zweidimensionales Problem „reduziert“: Die Bewehrung konnte nicht in ihrer Vollständigkeit dargestellt werden und das verändert die Gesamtsteifigkeit und das Verhalten des Systems. In der Realität kommt es aufgrund der Umschnürungsbewehrung zum Aufbau eines mehraxialen Spannungszustandes, durch diesen kommt es im umschnürten Bereich zu einer Erhöhung der Betondruckfestigkeit. Dieser mehraxiale Spannungszustand konnte sich in ATENA 2D® nicht ausbilden.
- Ablösen der Betondeckung: Im Laufe des Versuches löste sich die Betondeckung der Tübinge ab und verminderte so den Betonquerschnitt. Dieses Verhalten konnte man in ATENA 2D® nicht modelliert werden, hat aber Auswirkungen auf das Verhalten, da ab dem Zeitpunkt des Ablösens der Betondeckung nur mehr ein verminderter Querschnitt für die Aufnahme der Belastung zur Verfügung steht.
- Haltephasen im Versuch: Die Haltephasen und somit die Kriechphasen, die in der Lastgeschichte der Versuche (siehe **Tabelle 3.6** und **Tabelle 3.7**) angegeben sind, konnten im Programm nicht abgebildet werden. Das verhindert einen direkten Vergleich der Last-Verformungsbeziehungen zwischen ATENA 2D® und den Versuchsauswertungen in Kapitel 4.
- Modellierung der Kontaktfläche: Aufgrund der kleinen Dimension der Kontaktfläche mit einer Stärke von nur 3 mm und der Ausbildung eines Makronetzes in der Fuge die noch kleiner ausfallen muss kann die darauffolgende Berechnung Probleme verursachen. Generell ist es schwierig das Verhalten der Fuge nachzubilden.

Eine Berechnung in ATENA 3D® wird in weiterführenden Schritten daher empfohlen.

## 5.3. Diskussion

### 5.3.1. Traglastberechnungen

Die Ergebnisse, die im vorangegangenen Abschnitt berechnet wurden, werden in diesem Abschnitt diskutiert und miteinander verglichen.

Wie in **Abbildung 5.1** zu sehen, variieren die Ergebnisse der unterschiedlichen Berechnungsvorschriften um ca.  $\pm 15\%$ . Des Weiteren werden nur die Ergebnisse und Nachrechnungen für den Typ MT betrachtet, da bereits die beiden Versuche mit dem Tübbing RT eine große Differenz der aufnehmbaren

maximalen Druckkraft lieferten und es so schwieriger ist eine Aussage über die Nachrechnungen zu treffen.

Die Versuchsnachrechnung mittels ATENA 2D® ist keine geeignete Variante zur Berechnung der Tragfähigkeit. Die Berücksichtigung einer Umschnürungsbewehrung und die Entstehung eines 3-dimensionalen Spannungszustandes war nicht möglich, weshalb die erreichten Bruchlasten aus den Versuchen nicht nachgebildet werden konnten.

Die Berechnungsmodelle, deren Grundlage die SIA 262 [12] bildet, überschätzen die Tragfähigkeit der Tübbinge, egal ob mit den Anpassungen nach Professor Kaufmann oder nach den Anpassungen von Professor Kaufmann und Professor Kollegger.

Mit der Quadratwurzelformel laut EC 2 [5] bekommt man bessere Ergebnisse, jedoch wird diese trotzdem nicht als Berechnung für die Traglast empfohlen. Durch fehlende Informationen in der Berechnung über die Ausbildung der Leiterbewehrung, die aber einen maßgebenden Effekt auf das Tragverhalten der Tübbinge hat, wird die Berechnung nach Gleichung (1) nicht empfohlen.

Der Formelapparat, der in Kapitel 2.3.5 beschrieben wird, liefert zwar über alle Versuche gesehen mit einem statistischen Mittelwert der Ausnutzung von 1,00 das beste Ergebnis, doch entsteht dieser Mittelwert nur aufgrund des Versuches RT V02. Würde man diesen Versuch nicht in der Auswertung berücksichtigen gibt die Quadratwurzelformel nach EC 2 [5] bessere Ergebnisse aus. Deshalb wird vorgeschlagen durch weitere Versuche und einer Variation der Leiterabstände die Formeln zur Berechnung  $s'_{ca}$  und  $s'_{cb}$  anzupassen und zu optimieren, da auch der Abstand zwischen zweiter und dritter Leiter in die Gleichungen miteingeht.

### 5.3.2. Resümee Typ MT

Die Versuche zeigen einen klaren Erfolg des patentierten Tübbings. Eine Laststeigerung von bis zu 36% war möglich. Wie in den ATENA 2D® Berechnungen mit der Variationen des Abstandes der Bewehrungslage der Druckstäbe zur Kontaktfläche hin ersichtlich, ist es wichtig, eine exakte Herstellung zu gewährleisten und beim Einbau der Tübbinge keine gravierenden Ungenauigkeiten zu erlauben. Werden grobe Fehler gemacht, kann keine Erhöhung der Tragfähigkeit gewährleistet werden und der Einsatz des Tübbings erweist sich als nicht effizient. Verhindert man aber diese Fehler, kann man einen tragfähigeren Tübbingring herstellen und somit in höher belastete Zonen einen Bau eines Tunnels ermöglichen oder man kann bei weniger belasteten Zonen die Dicke des Tübbings verringern. Die Verringerung der Tübbingdicke bringt eine Einsparung in Bezug auf den Betonverbrauch, aber auch eine Verringerung des Ausbauquerschnittes bei der Tunnelherstellung, wodurch wiederum eine Kosten- und Zeitersparnis erreicht werden kann.

### 5.3.3. Ausblick

Um eine bessere Aussagekraft für die Tragfähigkeit der Tübbinge des Typs MT zu bekommen, sind weiterführende Untersuchungen und Versuche notwendig, damit man eine statistische Auswertung durchführen kann. Eine Variation des Leiterbewehrungsabstandes und die getätigten ATENA 2D® Untersuchungen mit den Unterschieden in der Bewehrungsführung der Druckstäbe sollten in Versuchen analysiert werden. Eine weitere Möglichkeit und Tübbingkonfiguration wäre es, wenn die Längsstäbe des Tübbings nicht nur an die Leiterbewehrung angeheftet werden, sondern wenn diese eine tragende

Schweißverbindung bekommen würden. Dies könnte eine positive Auswirkung auf die Umschnürungswirkung bzw. auf das Tragverhalten der Längsfuge erzielen. Durch eine größere Anzahl von Versuchen und Variation der Versuchsparameter kann die Berechnung nach Kapitel 2.3.7 angepasst werden. Um so die Möglichkeit einer effizienten Bemessung von Tübbing-Längsfugen durchführen zu können.

---

## 6. Zusammenfassung

Der Baustoff Stahlbeton hat seinen Stand als führendes Bauprodukt, den er in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts erreicht hat, noch immer nicht verloren. In Bezug auf die hohe Dauerhaftigkeit, das Tragverhalten und die vielen Variationsmöglichkeiten ist Stahlbeton eine sehr gute Wahl für die unterschiedlichsten Arten von Bauvorhaben. Im Tunnelbau kommt Stahlbeton seine Dauerhaftigkeit und das Tragverhalten auf Druck zugute. Da der Mensch – und somit auch seine Bauwerke – immer nach mehr streben, wird auch dem Tunnelbau immer mehr abverlangt. Einerseits wird bei erhöhten Belastungen der Tunnelröhre eine Vergrößerung der Tübbingdicke und somit eine Vergrößerung des Ausbruchquerschnittes notwendig. Andererseits will man in bereits erreichten Tiefen eine wirtschaftlichere Herstellung der Tunnelröhre gewährleisten. Diesen Aspekten versucht man mit dem neu entwickelten Tübbing (Typ MT), der an der TU Wien erfunden und patentiert wurde, gerecht zu werden.

Bei höher belasteten Tübbingungen kann man durch den Einsatz der hochfesten Druckstäbe in der Längsfuge, dem Bereich des Tübbings der durch seine Querschnittsverjüngung als Gelenk dient, die Abmessungen der im Regelfall angewendeten Tübbinge beizubehalten. Bei weniger belasteten Tunnelröhren ist es möglich, die Tübbingdicke zu verringern, was wiederum den Ausbruchquerschnitt verringert und eine positive Auswirkung auf den Tunnelvortrieb, den Materialverbrauch und die Baudauer hat.

In der Einleitung wird ein kurzer Ausblick auf die Entstehung des Baustoffes geboten und danach auf die Verbesserungsmöglichkeiten, die bei Tübbingungen möglich sind, eingegangen.

In Kapitel 2 wurden grundlegende Informationen über den Tunnelbau bezüglich Entstehung und Bauart sowie ein erster Einblick in Tübbinge vermittelt. Danach wurde auf die Normenentwicklung und die Berechnungsansätze zur Bemessung der Tragfähigkeit von Tübbing-Längsfugen eingegangen: beginnend mit der Wurzelformel nach EC 2 [5], darauf folgend die Berücksichtigung der Umschnürungswirkung der Bewehrung lt. SIA 262 [12], Ergänzungen von Herrn Professor Kaufmann [13] sowie zuletzt Ergänzungen von Herrn Professor Kaufmann und Professor Kollegger und der Ansatz zur Erhöhung der Betondruckfestigkeit unter Vorhandensein von Querdruck nach EC 2 [5]. Bereits patentierte Möglichkeiten zur Erhöhung der Tragfestigkeit wurden aufgezählt und deren Nachteile in Bezug auf die Dauerhaftigkeit aufgezeigt. Ende des Kapitels wurde auf die Idee des neu patentierten Tübbingtyps MT näher eingegangen.

Im dritten Kapitel wird ausführlich auf die experimentellen Untersuchungen eingegangen, die im Anschluss zur Interpretation und Conclusio der Tübbinge Typ MT dienen: die Dimensionen der Tübbinge und deren Herstellung, die Beschreibung der verwendeten Baustoffe und der Ablauf der Versuchsdurchführung mit allen verwendeten Messsystemen, dem genauen Versuchsaufbau und der Ablauf an den Versuchstagen im Prüflabor. Es wurden je zwei Versuche mit den Tübbingungen Typ RT und dem neu modifizierten Typen MT durchgeführt, um Vergleiche für die Wirkungsweise der hochfesten Druckstäbe  $\varnothing 22$  tätigen zu können.

Im Anschluss an die Versuchsdurchführungen wurden die Daten aller Messsysteme aufbereitet, um sie miteinander vergleichen zu können. Die Datensätze aus der hydraulischen Presse mit den Werten der Wegaufnehmer wurden in ein Last-Verformungsdiagramm eingearbeitet. Mit dem photogrammetrischen Messsystem der Firma GOM konnte ein Diagramm für die Rissentwicklung erstellt werden, um

die vorhandene Last bei Erreichen der zulässigen Rissbreite nach **Abbildung 2.5** zu erhalten. Des Weiteren konnten mittels Aramis Rissbilder ausgegeben werden, die den Versagensmechanismus darstellen. Die Auswertung und Erstellung der Last-Verformungsbeziehungen erfolgte getrennt für die unterschiedlichen Tübbingtypen und Versuche und wurde schließlich in ein gemeinsames Diagramm eingepflegt, um einen direkten Vergleich anstellen zu können. Die händisch durchgeführten Rissaufzeichnungen wurden digitalisiert und sind in den unterschiedlichen Haltephasen angegeben. Die Auswertungen und Rissbilder wurden in vollzähliger Form in den Anhängen C und D eingefügt.

In Kapitel 5 wurden Berechnungen für die Tragfähigkeit der Tübbing-Längsfuge mit den verschiedenen Berechnungsansätzen angestellt. Grundlage dieser Berechnungen wurden bereits in Kapitel 2.3 näher erläutert. Im Zuge der Berechnungen wurde das Programm ATENA 2D® vorgestellt, das für die Berechnung mittels Finiten-Elemente-Methode (FEM) genutzt wird und grundsätzlich sehr gut für Versuchsnachbildungen geeignet ist. Es konnten die Bruchlasten und Stauchungen aus den Versuchen zwar nicht nachgebildet werden, aber es war möglich, eine Variation der Bewehrungsführung des Typs MT vorzunehmen, um so einen besseren Einblick in das Verhalten der Druckstäbe zu bekommen und für spätere Versuche geeignete Versuchskörper zu erstellen und diese Ergebnisse versuchstechnisch zu untersuchen. Nach dem Beenden der Traglastberechnungen, stellt die Diskussion der erhaltenen Ergebnisse den Abschluss der Arbeit dar. In der Diskussion über die errechneten Ergebnisse wurde ersichtlich, dass die Ansätze nach der SIA 262 [12] die Tragfähigkeit der Tübbinge überschätzt, die Wurzelformel nach [5] sehr passende Ergebnisse liefert, aber durch die fehlenden Informationen über die Leiterbewehrung im Tübbing kein passender Rechnungsansatz ist. Die Formulierung von Herrn Professor Kollegger, der die Ergänzungen von Herrn Professor Kaufmann [13] erweiterte, ist ein viel zielführender Weg um die Tragfähigkeit der Tübbing-Längsfugen zu berechnen. Die aktuellen Berechnungsansätze sind im Allgemeinen nicht 100% geeignet um eine sichere und wirtschaftliche Dimensionierung sicherzustellen.

Im Ausblick wurde empfohlen, dass weiterführende Versuche mit dem Einbringen der Informationen der bereits getätigten Untersuchungen und den Variationsmöglichkeiten der Druckstäbe die wissenschaftliche Forschung für den Typ MT vorantreiben würde und einen Berechnungsformalismus für Tübbinge mit dem speziellen Tragverhalten der Leiterbewehrung (und Druckstäben) hervorbringen könnte. Um die Berechnungen nach EC 2 [5, 6] Abschnitt 3.1.9 mit Ergänzungen von Professor Kaufmann und Professor Kollegger zu optimieren, sollten mehr Versuche mit verschiedenen Leiterabständen und Bewehrungsmengen durchgeführt werden, umso die Wichtung der Leiterabstände – die in deren Berechnungsansatz am zielführendsten erscheint – zu optimieren und eine realitätsnahe Bemessung von Tübbing-Längsfugen gewährleisten zu können.

# Literaturverzeichnis

- [1] Adam, D.: Tunnelbau im Festgestein und Lockergestein, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Wien, Auflage WS 2016/17
- [2] Empfehlungen für den Entwurf, die Herstellung und den Einbau von Tübbingringen, Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen E. V. (DAUB), Oktober 2013
- [3] ÖN EN 1991-2. Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken (konsolidierte Fassung). Österreichisches Normungsinstitut, März 2012.
- [4] ÖN EN B 1991-2. Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken (konsolidierte Fassung). Österreichisches Normungsinstitut, März 2012.
- [5] ÖN EN 1992-2. Eurocode 2 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 2: Betonbrücken – Bemessungs- und Konstruktionsregeln (konsolidierte Fassung). Österreichisches Normungsinstitut, März 2012.
- [6] ÖN B 1992-2. Eurocode 2 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 2: Betonbrücken – Bemessungs- und Konstruktionsregeln – Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1992-2, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen. Österreichisches Normungsinstitut, September 2014.
- [7] Huber, P.: Beurteilung der Querkrafttragfähigkeit bestehender Stahlbeton- und Spannbetonbrücken. PhD thesis, Technische Universität Wien, Wien 2016.
- [8] Ril 853: Eisenbahntunnel planen, bauen und instand halten, DB Netz AG, Frankfurt am Main, 01.08.2003
- [9] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, ZTV-ING, Teil 5 Tunnelbau, Bundesanstalt für Straßenwesen, 01.02.2018
- [10] Richtlinie, Tübbingsysteme aus Beton, Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik (ÖVBB), August 2009
- [11] Spieth, H.P.: Das Verhalten von Beton unter hoher örtlicher Pressung und Teilbelastung unter besonderer Berücksichtigung von Spannbetonverankerungen. Technische Hochschule Stuttgart, 1959
- [12] SIA 262 - Betonbau, Schweizer Norm, Herausgeber: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 01.01. 2013
- [13] Kaufmann, W.: Bemessung von Tübbing-Längsfugen unter Ansatz einer Umschnürung nach SIA 262, Institut für Baustatik und Konstruktion Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 13.02.2019
- [14] AT 518840 A1: „Verbundsegment, Tunnelschale und Verfahren“ 2018-01-15, Österreichische Patentanmeldung, Anmelder Porr Bau Gmbh, Vertreter: Puchberger & Parnter Patentanwälte, Veröffentlicht am: 15.01.2018
- [15] EP 1 243 753 A1: „Tübbingelement zum Auskleiden von Tunneln“ Europäische Patentanmeldung, Erfinder: Dipl.-Ing. Dahl Johannes, Vertreter: Rohmann Michael, Dr. et al Patentanwälte, Veröffentlichungstag: 25.09.2002

- [16] DE 2522789: „Ausbauelement und Verfahren zu seiner Herstellung“ Offenlegungsschrift Deutsches Patentamt, , Pont-a-Mousson S.A., Nancy (Frankreich), Oger, Jacques Francois Marie, Anmeldetag 22.05.1975
- [17] US 1 969 810 A: „Tunnel Lining“, United States Patent Office, Malcolm McAlpine, Veröffentlichung: 14.08.1934
- [18] GB 1 502 207 A: „Concrete Segment“, Anmelder Tsuzuki J (JP), Veröffentlichung: 22.02.1978
- [19] Suter, R., Bergmeister, K.: „Tübbinge aus Stahlfaserbeton, Optimierung der Bewehrung durch experimentelle Untersuchungen“, Beton- und Stahlbetonbau 99 (2004), Heft 11, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin
- [20] Schmidt-Thrö, G., Tabka, B., Smarslik, M., Scheufler, W., Fischer, O., Mark, P.: „Experimente zur Teilflächenpressung mit vorwiegend ebener Lastausbreitung“, Beton- und Stahlbetonbau 113 (2018), Heft 2, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin
- [21] Bauschinger, J.: „Versuche mit Quadern aus Naturstein. In: Mitteilungen aus dem Mechanisch Technischen Laboratorien der Technischen Hochschule München 6 (1876), S. 1-20
- [22] ONR 23303 Prüfverfahren Beton (PVB) – Nationale Anwendung der Prüfnormen für Beton und seiner Ausgangsstoffe. Österreichisches Normungsinstitut, September 2010.
- [23] ÖNORM EN 10080: Stahl für die Bewehrung von Beton – Schweißgeeigneter Betonstahl – Allgemeines. Österreichisches Normungsinstitut, September 2005



# Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| <b>Abbildung 2.1:</b> Einteilung der Betontübbinge in Ringtypen .....  | 4  |
| <b>Abbildung 2.2:</b> Schematische Skizze Tübbingsystem .....  | 5  |
| <b>Abbildung 2.3:</b> Tübbing-Längsfuge.....   | 5  |
| <b>Abbildung 2.4:</b> Normenentwicklung der österreichischen Bemessungsnormen für Stahlbeton ab 1950, Ausschnitt entnommen aus [7].....  | 7  |
| <b>Abbildung 2.5:</b> Definition und Beschreibung der Anforderungsklassen an das Ausbausystem [10] .....   | 7  |
| <b>Abbildung 2.6:</b> Ermittlung der Teilflächenbelastung, Bild 6.29 ÖNORM EN 1992-1-1 [5].....  | 9  |
| <b>Abbildung 2.7:</b> Graphische Interpretation der Längsfugendickenreduktion .....  | 9  |
| <b>Abbildung 2.8:</b> Druckglieder mit Umschnürungswirkung, Figur 14 [12].....   | 11 |
| <b>Abbildung 2.9:</b> Bernoulli- und Diskontinuitätsbereiche im Bereich der Tübbing-Längsfuge .....  | 11 |
| <b>Abbildung 2.10:</b> Veranschaulichung der wirksam umschnürten Fläche und der Fallunterscheidung. .  | 12 |
| <b>Abbildung 2.11:</b> Spannungs-Dehnungs-Linie für Beton unter mehraxialen Druckbeanspruchungen, Bild 3.6 ÖNORM EN 1992-1-1 [5].....  | 14 |
| <b>Abbildung 2.12:</b> Skizze zur Wichtung der Leiterabstände nach Kaufmann+Kollegger .....  | 15 |
| <b>Abbildung 2.13:</b> Skizze System Patent AT 518 840 A1 .....  | 17 |
| <b>Abbildung 2.14:</b> Skizze System Patent EP 1 243 753 A1 .....  | 18 |
| <b>Abbildung 2.15:</b> Skizze System Patent US 1 969 810 .....   | 19 |
| <b>Abbildung 2.16:</b> Patentierter Tübbing der TU Wien .....  | 20 |
| <b>Abbildung 3.1:</b> Systemskizze Tübbing mit Gleichlast und Lastausbreitung.....   | 22 |
| <b>Abbildung 3.2:</b> Auszug Schalplan .....   | 23 |
| <b>Abbildung 3.3:</b> Auszug aus den Bewehrungsplänen .....  | 24 |
| <b>Abbildung 3.4:</b> Herstellung der Versuchs- und Probekörper: (a) alle 8 Versuchskörper in ihrer Schalung (b) Typ MT mit Druckstäben (c) Einfüllen des Vergussmörtels (d) Vergussmörtelprismen..... | 25 |
| <b>Abbildung 3.5:</b> Versuchsaufbau schematische Darstellung .....  | 29 |
| <b>Abbildung 3.6:</b> Versuchsaufbau MT V01 .....  | 30 |
| <b>Abbildung 3.7:</b> Messsysteme. a) induktive Wegaufnehmer b) Kraftmessdosen .....   | 33 |
| <b>Abbildung 3.8:</b> Tübbing mit stochastischem Muster auf der Belastungsseite .....  | 33 |
| <b>Abbildung 4.1:</b> Last-Verformungsbeziehung, RT V02.....   | 35 |
| <b>Abbildung 4.2:</b> Konvexe Lastverteilungsfläche .....  | 36 |
| <b>Abbildung 4.3:</b> Manuelle Rissbildauswertung, RT V02 – Untersicht .....   | 37 |
| <b>Abbildung 4.4:</b> Manuelle Rissbildauswertung, RT V02 – Seitenfläche .....   | 37 |
| <b>Abbildung 4.5:</b> Rissentwicklung aus Aramis, RT V02.....  | 38 |
| <b>Abbildung 4.6:</b> Rissbild, RT V02 bei $F_{SLS}$ .....   | 39 |
| <b>Abbildung 4.7:</b> Rissbild, RT V02 bei $F_{ULS}$ .....   | 39 |
| <b>Abbildung 4.8:</b> Rissbild Versuchsende, RT V02.....   | 40 |
| <b>Abbildung 4.9:</b> Versagensbild MT V01, Untersicht .....   | 40 |
| <b>Abbildung 4.10:</b> Last-Verformungsbeziehung aus Datenauswertung der Wegaufnehmer, MT V02 ...  | 42 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Abbildung 4.11:</b> Manuelle Rissbildauswertung, MT V02 – Untersicht.....                                | 43 |
| <b>Abbildung 4.12:</b> Manuelle Rissbildauswertung, MT V02 – Seitenfläche.....                              | 43 |
| <b>Abbildung 4.13:</b> Rissentwicklung aus Aramis, MT V02 .....   | 44 |
| <b>Abbildung 4.14:</b> Rissbild, MT V02 bei $F_{SLS}$ .....   | 45 |
| <b>Abbildung 4.15:</b> Rissbild, MT V02 bei $F_{ULS}$ .....   | 45 |
| <b>Abbildung 4.16:</b> Rissbild Versuchsende, MT V02 .....  | 46 |
| <b>Abbildung 4.17:</b> Rissbilder aus Aramis bei Erreichen von $F_{SLS}$ , oben: Typ RT, unten Typ MT ..... | 47 |
| <b>Abbildung 4.18:</b> Kraft-Dehnungsbeziehung Vergleich Typ RT und MT .....                                | 48 |
| <b>Abbildung 4.19:</b> Abdrücke der Druckstäbe in der Kontaktfläche nach Versuchsdurchführung MT V02 .....  | 49 |
| <b>Abbildung 4.20:</b> Rissvergleich Typ RT und Typ MT .....  | 50 |
| <b>Abbildung 5.1:</b> Balkendiagramm der berechneten Traglasten und der Bruchlasten.....                    | 58 |
| <b>Abbildung 5.2:</b> Ausnutzung der berechneten Traglasten und der Bruchlasten .....                       | 59 |
| <b>Abbildung 5.3:</b> Modellabbildung Typ MT in ATENA 2D® .....   | 61 |
| <b>Abbildung 5.4:</b> Abstand der Druckstäbe von der Längsfuge .....  | 61 |
| <b>Abbildung 5.5:</b> Last-Verformungsbeziehung Typ RT ATENA 2D®.....                                       | 62 |
| <b>Abbildung 5.6:</b> Last-Verformungsbeziehung Typ MT ATENA 2D® .....                                      | 62 |
| <b>Abbildung 5.7:</b> Last-Verformungsbeziehung Typ MT ATENA 2D®, detailliert .....                         | 63 |
| <b>Abbildung 5.8:</b> Vergleich Rissbilder Typ RT Aramis (linke Spalte) und ATENA 2D® (rechte Spalte).....  | 64 |
| <b>Abbildung 5.9:</b> Vergleich Rissbilder Typ MT Aramis (linke Spalte) und ATENA 2D® (rechte Spalte).....  | 65 |
| <b>Abbildung A.1:</b> Schalplan Typ RT und Typ MT.....  | 77 |
| <b>Abbildung A.2:</b> Bewehrungsplan Typ RT .....   | 78 |
| <b>Abbildung A.3:</b> Bewehrungsplan Typ MT.....  | 79 |
| <b>Abbildung C.1:</b> Last-Verformungsbeziehung RT V01 .....  | 85 |
| <b>Abbildung C.2:</b> Rissentwicklung aus Aramis, RT V01 .....  | 86 |
| <b>Abbildung C.3:</b> Rissentwicklung bis 0,5 mm aus Aramis, RT V01 .....                                   | 86 |
| <b>Abbildung C.4:</b> Rissbild 3.100 kN und 4.200 kN aus Aramis, RT V01 .....                               | 87 |
| <b>Abbildung C.5:</b> Rissbild 5.100 kN und 8.000 kN aus Aramis, RT V01 .....                               | 88 |
| <b>Abbildung C.6:</b> Rissbild 9.198 kN aus Aramis, RT V01 .....  | 89 |
| <b>Abbildung C.7:</b> Rissbild Untersicht, RT V01 .....   | 90 |
| <b>Abbildung C.8:</b> Rissbild Seitenansicht, RT V01 .....  | 91 |
| <b>Abbildung C.9:</b> Last-Verformungsbeziehung, RT V02.....  | 92 |
| <b>Abbildung C.10:</b> Rissentwicklung aus Aramis, RT V02 .....   | 93 |
| <b>Abbildung C.11:</b> Rissentwicklung bis 0,5 mm aus Aramis, RT V02 .....                                  | 93 |
| <b>Abbildung C.12:</b> Rissbezeichnung und Rissweiten bei 8.000 kN aus Aramis, RT V02.....                  | 94 |
| <b>Abbildung C.13:</b> Rissbild 3.100 kN aus Aramis, RT V02 .....   | 94 |
| <b>Abbildung C.14:</b> Rissbild 4.200 kN aus Aramis, RT V02 .....   | 95 |
| <b>Abbildung C.15:</b> Rissbild 5.100 kN aus Aramis, RT V02.....  | 95 |
| <b>Abbildung C.16:</b> Rissbild 8.100 kN aus Aramis, RT V02 .....   | 96 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Abbildung C.17:</b> Rissbild 10.626 kN - Höchstlast aus Aramis, RT V02.....             | 96  |
| <b>Abbildung C.18:</b> Rissbild bei $F_{SLS}$ aus Aramis, RT V02 .....                     | 97  |
| <b>Abbildung C.19:</b> Rissbild Untersicht, RT V02 .....                                   | 98  |
| <b>Abbildung C.20:</b> Rissbild Seitenansicht, RT V02 .....                                | 99  |
| <b>Abbildung D.1:</b> Last-Verformungsbeziehung, MT V01 .....                              | 100 |
| <b>Abbildung D.2:</b> Rissentwicklung aus Aramis, MT V01 .....                             | 101 |
| <b>Abbildung D.3:</b> Rissentwicklung bis 0,5 mm aus Aramis, MT V01 .....                  | 101 |
| <b>Abbildung D.4:</b> Rissbild Untersicht, MT V01 .....                                    | 102 |
| <b>Abbildung D.5:</b> Rissbild Seitenansicht, MT V01 .....                                 | 103 |
| <b>Abbildung D.6:</b> Last-Verformungsbeziehung, MT V02 .....                              | 104 |
| <b>Abbildung D.7:</b> Rissentwicklung aus Aramis, MT V02 .....                             | 105 |
| <b>Abbildung D.8:</b> Rissentwicklung bis 0,5 mm aus Aramis, MT V02 .....                  | 105 |
| <b>Abbildung D.9:</b> Rissbezeichnung und Rissweiten bei 11.200 kN aus Aramis, MT V02..... | 106 |
| <b>Abbildung D.10:</b> Rissbild 4.450 kN aus Aramis, MT V02 .....                          | 106 |
| <b>Abbildung D.11:</b> Rissbild 6.000 kN aus Aramis, MT V02 .....                          | 107 |
| <b>Abbildung D.12:</b> Rissbild 7.300 kN aus Aramis, MT V02 .....                          | 107 |
| <b>Abbildung D.13:</b> Rissbild 11.200 kN aus Aramis, MT V02 .....                         | 108 |
| <b>Abbildung D.14:</b> Rissbild 14.404 kN – Höchstlast aus Aramis, MT V02 .....            | 108 |
| <b>Abbildung D.15:</b> Rissbild bei $F_{SLS}$ aus Aramis, MT V02 .....                     | 109 |
| <b>Abbildung D.16:</b> Rissbild Untersicht, MT V02.....                                    | 110 |
| <b>Abbildung D.17:</b> Rissbild Seitenansicht, MT V02 .....                                | 111 |
| <b>Abbildung D.18:</b> Vergleich Versuchsserien.....                                       | 112 |
| <b>Abbildung D.19:</b> Berührungsflächen Druckstäbe MT V01.....                            | 113 |
| <b>Abbildung D.20:</b> Berührungsflächen Druckstäbe MT V02.....                            | 113 |
| <b>Abbildung E.1:</b> Traglast nach EC [5, 6] Typ RT.....                                  | 114 |
| <b>Abbildung E.2:</b> Traglast nach Kapitel 2.3.4, Berechnung Teil 1/3 .....               | 115 |
| <b>Abbildung E.3:</b> Traglast nach Kapitel 2.3.4, Berechnung Teil 2/3 .....               | 116 |
| <b>Abbildung E.4:</b> Traglast nach Kapitel 2.3.4, Berechnung Teil 3/3 .....               | 117 |
| <b>Abbildung E.5:</b> Traglast nach Kapitel 2.3.5, Berechnung Teil 1/3 .....               | 118 |
| <b>Abbildung E.6:</b> Traglast nach Kapitel 2.3.5, Berechnung Teil 2/3 .....               | 119 |
| <b>Abbildung E.7:</b> Traglast nach Kapitel 2.3.5, Berechnung Teil 3/3 .....               | 120 |
| <b>Abbildung E.8:</b> Traglast nach Kapitel 2.3.6, Berechnung Teil 1/3 .....               | 121 |
| <b>Abbildung E.9:</b> Traglast nach Kapitel 2.3.6, Berechnung Teil 2/3 .....               | 122 |
| <b>Abbildung E.10:</b> Traglast nach Kapitel 2.3.6, Berechnung Teil 3/3.....               | 123 |
| <b>Abbildung E.11:</b> Traglast nach Kapitel 2.3.7, Berechnung Teil 1/3.....               | 124 |
| <b>Abbildung E.12:</b> Traglast nach Kapitel 2.3.7, Berechnung Teil 2/3.....               | 125 |
| <b>Abbildung E.13:</b> Traglast nach Kapitel 2.3.7, Berechnung Teil 3/3.....               | 126 |
| <b>Abbildung E.14:</b> Traglast nach Kapitel 2.3.8.....                                    | 127 |

# Tabellenverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabelle 3.1:</b> Betonzusammensetzung für 1m <sup>3</sup> Frischbeton, beide Versuchsserien, entnommen aus dem Chargenprotokoll der Firma Oberndorfer..... | 26 |
| <b>Tabelle 3.2:</b> Ergebnisse Materialprüfung Beton .....  | 27 |
| <b>Tabelle 3.3:</b> Materialparameter des hochfesten Bewehrungsstahl Klasse SAS 670/800.....  | 27 |
| <b>Tabelle 3.4:</b> Materialparameter des Vergussmörtels .....  | 28 |
| <b>Tabelle 3.5:</b> Zeitablauf.....   | 29 |
| <b>Tabelle 3.6:</b> Lastgeschichte Typ RT.....  | 31 |
| <b>Tabelle 3.7:</b> Lastgeschichte Typ MT.....  | 32 |
| <b>Tabelle 4.1:</b> Maximalbelastung und –wege aus RT V01 und RT V02.....   | 35 |
| <b>Tabelle 4.2:</b> Maximalbelastung und –wege aus MT V01 und MT V02 .....  | 41 |
| <b>Tabelle 4.3:</b> SLS-Lasten aus den Versuchen .....  | 46 |
| <b>Tabelle 4.4:</b> ULS-Lasten aus den Versuchen.....   | 48 |
| <b>Tabelle 5.1:</b> Traglasten nach EC 2 [5, 6].....  | 52 |
| <b>Tabelle 5.2:</b> Traglasten nach Kapitel 2.3.4 .....   | 53 |
| <b>Tabelle 5.3:</b> Traglasten nach Kapitel 2.3.5 .....   | 54 |
| <b>Tabelle 5.4:</b> Traglasten nach Kapitel 2.3.6 .....   | 55 |
| <b>Tabelle 5.5:</b> Traglasten nach Kapitel 2.3.7 .....   | 56 |
| <b>Tabelle 5.6:</b> Traglasten nach Kapitel 2.3.8 .....   | 57 |
| <b>Tabelle 5.7:</b> Vergleich ATENA 2D®- und Versuchsergebnisse .....   | 63 |
| <b>Tabelle B.1:</b> Materialprüfung Teil 1.....   | 80 |
| <b>Tabelle B.2:</b> Materialprüfung Teil 2.....   | 81 |
| <b>Tabelle B.3:</b> Materialprüfung Teil 3.....   | 82 |
| <b>Tabelle B.4:</b> Materialkennwerte Beton.....  | 83 |
| <b>Tabelle B.5:</b> Materialprüfung.....  | 84 |
| <b>Tabelle B.6:</b> Materialkennwerte Mörtel .....  | 84 |

# A. Geometrie und Bewehrungsführung

## A.1. Schalplan

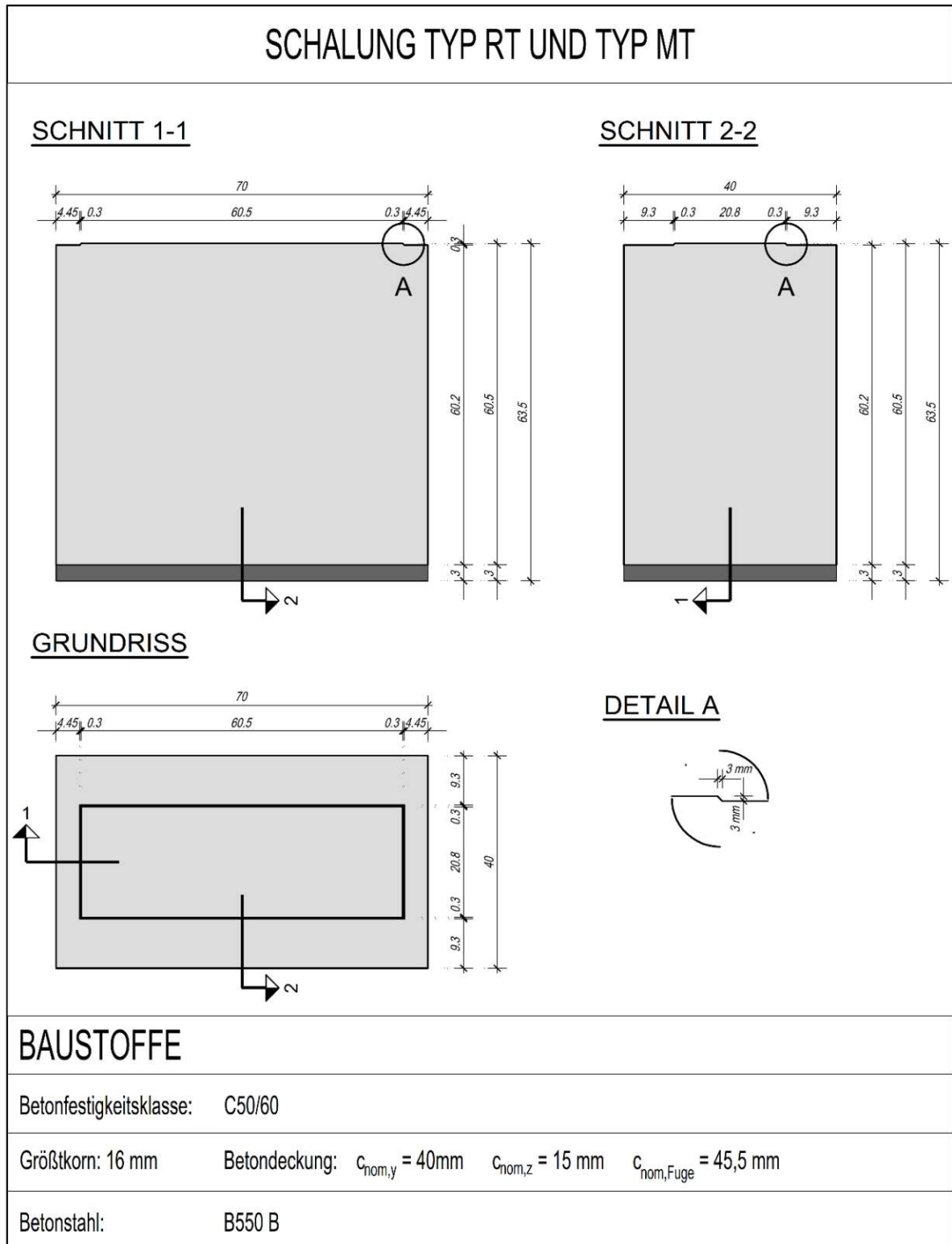


Abbildung A.1: Schalplan Typ RT und Typ MT

**A.2. Bewehrungsplan**

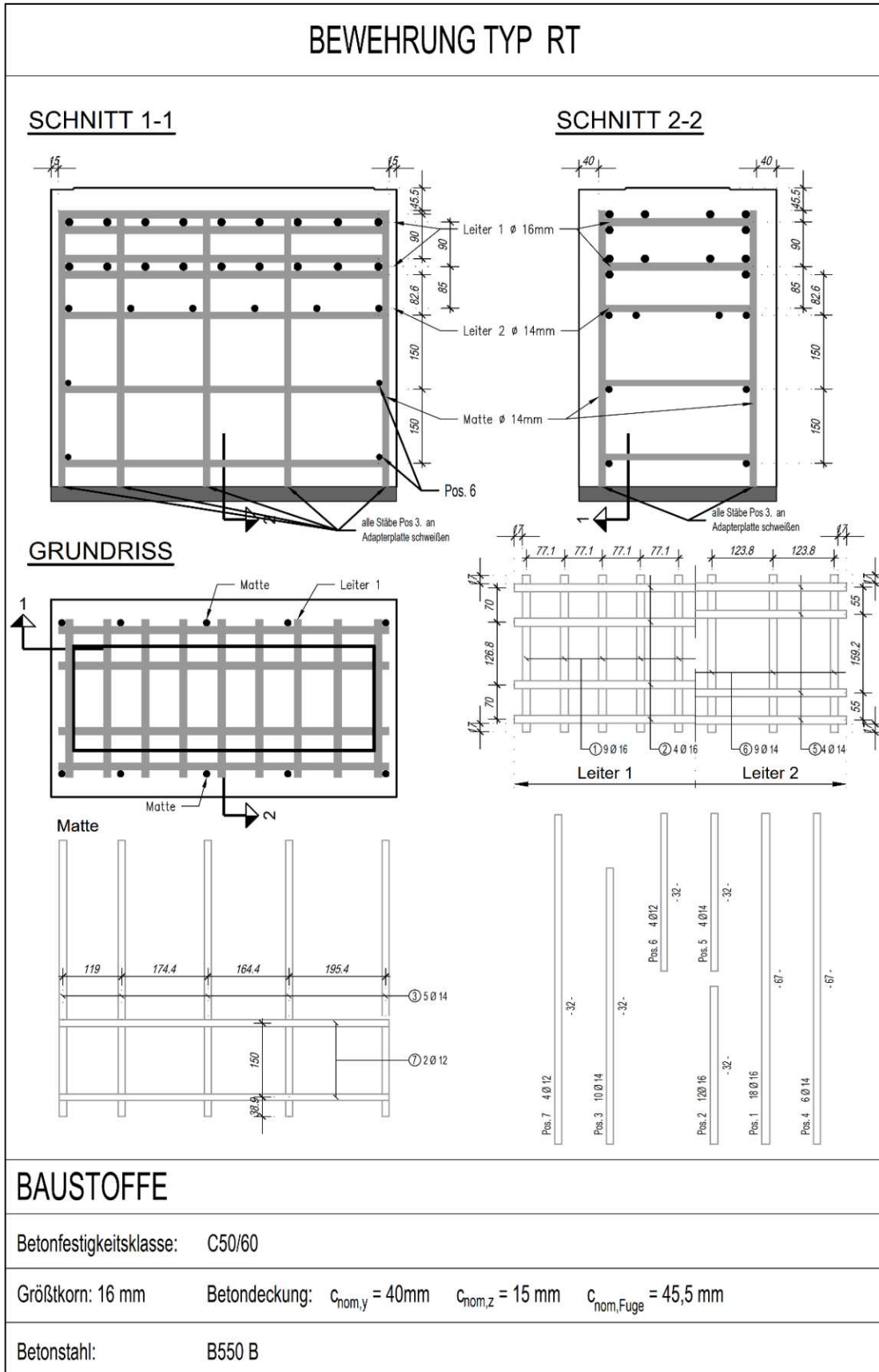


Abbildung A.2: Bewehrungsplan Typ RT

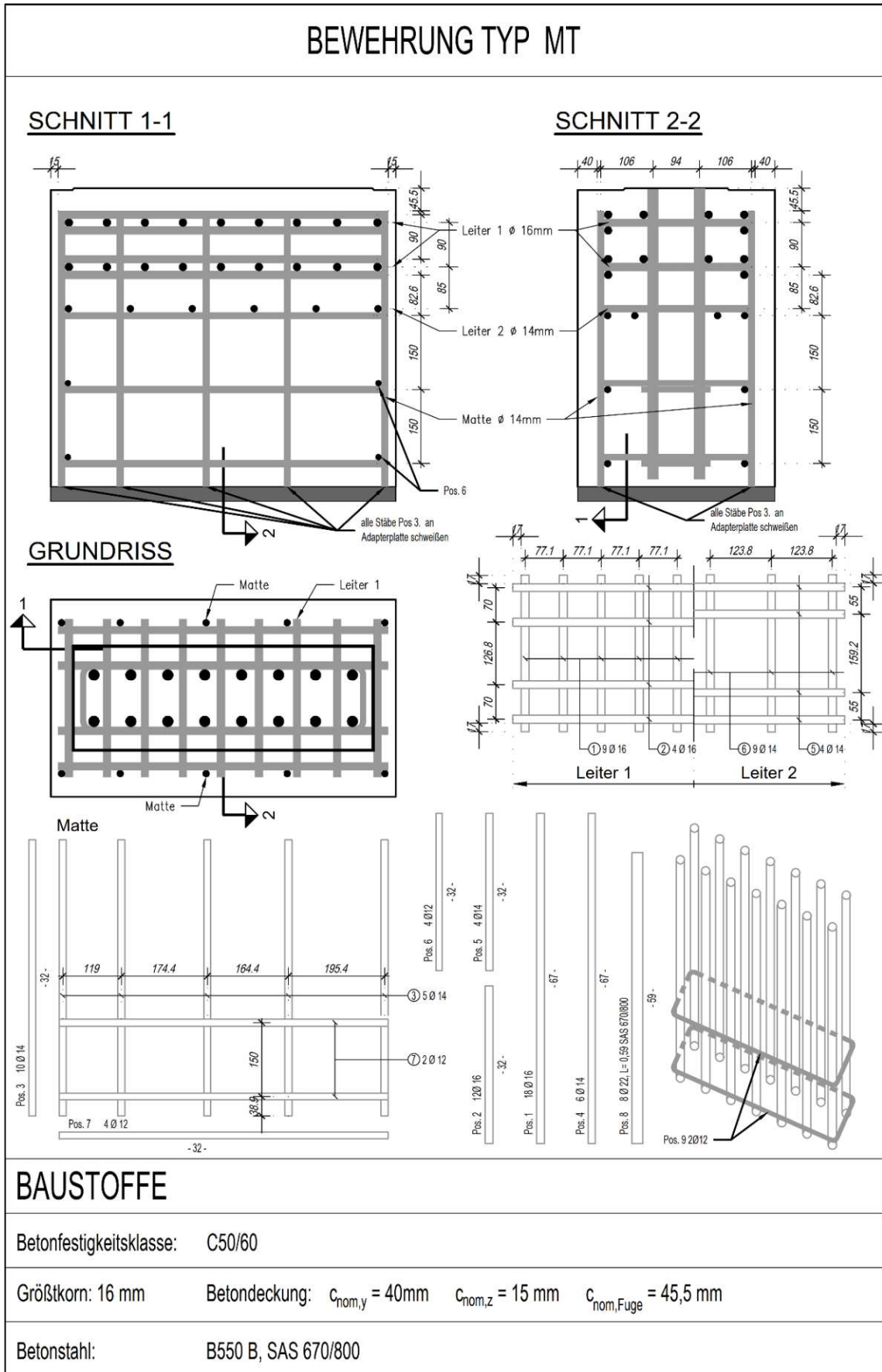


Abbildung A.3: Bewehrungsplan Typ MT

# B. Materialparameter

## B.1. Materialprüfung Beton

Tabelle B.1: Materialprüfung Teil 1

| Würfeldruckfestigkeit $f_{c,cube}$ von Probekörpern |                   |                      |                   |          |
|---|-------------------|----------------------|-------------------|----------|
| Prüfdatum:  |                   | Montag, 27. Mai 2019 |                   |          |
| Betonalter:   |                   | 10 Tage              |                   |          |
| geschätzte Würfeldruckfestigkeit                    |                   |                      |                   |          |
| $f_{c,cube}$  | 55                | N/mm <sup>2</sup>    |                   |          |
| Abmessungen Würfel                                  |                   |                      |                   |          |
| Schalung Kunststoff/Stahl                           |                   | K                    | K                 | K        |
| h   | 150               | mm                   |                   |          |
| Gewicht   | g                 | 8056,0               | 8159,4            | 8072,0   |
| erforderliche Belastungsgeschwindigkeit             |                   |                      |                   |          |
| Zeit  | 30                | bis                  | 60                | Sekunden |
| F   | 27,5              | kN/s                 | (bei 45 Sekunden) |          |
| ERGEBNISSE  |                   |                      |                   |          |
| Schalungsmaterial                                   |                   | K                    | K                 | K        |
| $f_{c,cube}$  | N/mm <sup>2</sup> | 54,24                | 56,02             | 55,55    |
| $\rho$  | g/cm <sup>3</sup> | 2,39                 | 2,42              | 2,39     |
| $f_{cm,cube}$                                       | N/mm <sup>2</sup> | 55,27                |                   |          |
| Streuung $f_{cm,cube}$                              | [-]               | 0,92                 |                   |          |
| Variationsk. $f_{cm,cube}$                          |                   | 1,67%                |                   |          |
| $\rho_{m,cube}$                                     | g/cm <sup>3</sup> | 2,40                 |                   |          |
| Streuung $\rho_{m,cube}$                            | [-]               | 0,02                 |                   |          |
| Variationsk. $\rho_{m,cube}$                        |                   | 0,69%                |                   |          |

| Würfeldruckfestigkeit $f_{c,cube}$ von Probekörpern |                   |                        |        |  |
|---|-------------------|------------------------|--------|--|
| Prüfdatum:  |                   | Dienstag, 28. Mai 2019 |        |  |
| Betonalter:   |                   | 11 Tage                |        |  |
| geschätzte Würfeldruckfestigkeit                    |                   |                        |        |  |
| $f_{c,cube}$  | 55                | N/mm <sup>2</sup>      |        |  |
| Abmessungen Würfel                                  |                   |                        |        |  |
| Schalung Kunststoff/Stahl                           |                   | K                      | K      |  |
| h   | 150               | mm                     |        |  |
| Gewicht   | g                 | 8133,0                 | 8030,6 |  |
| erforderliche Belastungsgeschwindigkeit             |                   |                        |        |  |
| Zeit  | 30                | bis                    | 60     |  |
| F   | 27,5              | kN/s                   |        |  |
| ERGEBNISSE  |                   |                        |        |  |
| Schalungsmaterial                                   |                   | K                      | K      |  |
| $f_{c,cube}$  | N/mm <sup>2</sup> | 55,07                  | 55,50  |  |
| $\rho$  | g/cm <sup>3</sup> | 2,41                   | 2,38   |  |
| $f_{cm,cube}$                                       | N/mm <sup>2</sup> | 55,29                  |        |  |
| Streuung $f_{cm,cube}$                              | [-]               | 0,30                   |        |  |
| Variationsk. $f_{cm,cube}$                          |                   | 0,55%                  |        |  |
| $\rho_{m,cube}$                                     | g/cm <sup>3</sup> | 2,39                   |        |  |
| Streuung $\rho_{m,cube}$                            | [-]               | 0,02                   |        |  |
| Variationsk. $\rho_{m,cube}$                        |                   | 0,90%                  |        |  |



Tabelle B.2: Materialprüfung Teil 2

| Spaltzugfestigkeit $f_{ct,sp}$ von Probekörpern |                   |                        |         |         |
|---|-------------------|------------------------|---------|---------|
| <b>Prüfdatum:</b>                               |                   | Mittwoch, 29. Mai 2019 |         |         |
| <b>Betonalter:</b>                              |                   | 12 Tage                |         |         |
| Abmessungen Zylinder                            |                   |                        |         |         |
| Schalung Kunststoff/Stahl                       |                   | S                      | S       | K       |
| h   | 300               | mm                     |         |         |
| d   | 150               | mm                     |         |         |
| Gewicht   | g                 | 12622,0                | 12903,2 | 12557,6 |
| erforderliche Belastungsgeschwindigkeit         |                   |                        |         |         |
| Belastungsgeschwindigkeit s                     | 0,05              | N/mm <sup>2</sup> *s   |         |         |
| <b>Laststeigerung R</b>                         | <b>3,5</b>        | <b>kN/s</b>            |         |         |
| ERGEBNISSE                                      |                   |                        |         |         |
| Schalungsmaterial                               |                   | S                      | S       | K       |
| F   | kN                | 237,56                 | 263,77  | 221,04  |
| $f_{ct,sp}$                                     | N/mm <sup>2</sup> | 3,36                   | 3,73    | 3,13    |
| fct   | N/mm <sup>2</sup> | 3,02                   | 3,36    | 2,81    |
| $\rho$  | g/cm <sup>3</sup> | 2,38                   | 2,43    | 2,37    |
| $f_{ctm,sp}$                                    | N/mm <sup>2</sup> | 3,41                   |         |         |
| $f_{ctm}$                                       | N/mm <sup>2</sup> | 3,07                   |         |         |
| Streuung $f_{ctm,sp}$                           | [-]               | 0,30                   |         |         |
| Variationsk. $f_{ctm,sp}$                       |                   | 8,95%                  |         |         |
| $\rho_{m,sp}$                                   | g/cm <sup>3</sup> | 2,39                   |         |         |
| Streuung $\rho_{m,sp}$                          | [-]               | 0,03                   |         |         |
| Variationsk. $\rho_{m,sp}$                      |                   | 1,45%                  |         |         |

| Würfeldruckfestigkeit $f_{c,cube}$ von Probekörpern |                   |                        |                   |          |        |        |
|---|-------------------|------------------------|-------------------|----------|--------|--------|
| <b>Prüfdatum:</b>                                   |                   | Mittwoch, 29. Mai 2019 |                   |          |        |        |
| <b>Betonalter:</b>                                  |                   | 12 Tage                |                   |          |        |        |
| geschätzte Würfeldruckfestigkeit                    |                   |                        |                   |          |        |        |
| $f_{c,cube}$  | 55                | N/mm <sup>2</sup>      |                   |          |        |        |
| Abmessungen Würfel                                  |                   |                        |                   |          |        |        |
| Schalung Kunststoff/Stahl                           |                   | K                      | K                 | K        | S      | S      |
| h   | 150               | mm                     |                   |          |        |        |
| Gewicht   | g                 | 7934,6                 | 7899,8            | 8008,0   | 8167,8 | 8076,0 |
| erforderliche Belastungsgeschwindigkeit             |                   |                        |                   |          |        |        |
| Zeit  | 30                | bis                    | 60                | Sekunden |        |        |
| <b>F</b>  | <b>27,5</b>       | <b>kN/s</b>            | (bei 45 Sekunden) |          |        |        |
| ERGEBNISSE  |                   |                        |                   |          |        |        |
| Schalungsmaterial                                   |                   | K                      | K                 | K        | S      | S      |
| $f_{c,cube}$  | N/mm <sup>2</sup> | 56,03                  | 52,97             | 58,49    | 62,58  | 63,13  |
| $\rho$  | g/cm <sup>3</sup> | 2,35                   | 2,34              | 2,37     | 2,42   | 2,39   |
| Stahlschalung                                       |                   |                        |                   |          |        |        |
| $f_{cm,cube}$                                       | N/mm <sup>2</sup> | 61,85                  |                   |          |        |        |
| Streuung $f_{cm,cube}$                              | [-]               | 1,76                   |                   |          |        |        |
| Variationsk. $f_{cm,cube}$                          |                   | 2,84%                  |                   |          |        |        |
| $\rho_{m,cube}$                                     | g/cm <sup>3</sup> | 2,40                   |                   |          |        |        |
| Streuung $\rho_{m,cube}$                            | [-]               | 0,01                   |                   |          |        |        |
| Variationsk. $\rho_{m,cube}$                        |                   | 0,62%                  |                   |          |        |        |

Tabelle B.3: Materialprüfung Teil 3

| Zylinderdruckfestigkeit $f_c$ von Probekörpern               |                   |                               |           |                   |           |           |           |
|--|-------------------|-------------------------------|-----------|-------------------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Prüfdatum:</b>  |                   | <b>Mittwoch, 29. Mai 2019</b> |           |                   |           |           |           |
| <b>Betonalter:</b>   |                   | <b>12 Tage</b>                |           |                   |           |           |           |
| geschätzte Zylinderdruckfestigkeit                           |                   |                               |           |                   |           |           |           |
| $f_{c,geschätzt}$  | 49,03             | N/mm <sup>2</sup>             |           |                   |           |           |           |
| Abmessungen Zylinder   |                   |                               |           |                   |           |           |           |
| Schalung Kunststoff/Stahl                                    |                   | K                             | K         | S                 | S         | S         | S         |
| h  | mm                | 296                           | 294,5     | 297               | 297       | 298       | 297       |
| d  | mm                | 150                           |           |                   |           |           |           |
| Gewicht  | g                 | 12451,8                       | 12351,8   | 12633,6           | 12575,2   | 12667,4   | 12707,6   |
| Belastungsgeschwindigkeit mit geschätzter Zylinderfestigkeit |                   |                               |           |                   |           |           |           |
| Zeit   | 30                | bis                           | 60        | Sekunden          |           |           |           |
| $F_{geschätzt}$  | <b>19,3</b>       | kN/s                          |           | (bei 45 Sekunden) |           |           |           |
| Belastungsgeschwindigkeit mit geprüfter Zylinderfestigkeit   |                   |                               |           |                   |           |           |           |
| $f_{c,geprüft}$  | 49,69             | N/mm <sup>2</sup>             |           |                   |           |           |           |
| Zeit   | 30                | bis                           | 60        | Sekunden          |           |           |           |
| $F_{geprüft}$  | <b>19,5</b>       | kN/s                          |           | (bei 45 Sekunden) |           |           |           |
| <b>ERGEBNISSE</b>  |                   |                               |           |                   |           |           |           |
|  |                   | K                             | K         | S                 | S         | S         | S         |
| F  | kN                | 878,16219                     | 914,02494 | 896,06388         | 933,38188 | 908,66406 | 932,26075 |
| $f_c$  | N/mm <sup>2</sup> | 49,69                         | 51,72     | 50,71             | 52,82     | 51,42     | 52,76     |
| $\rho$   | g/cm <sup>3</sup> | 2,38                          | 2,37      | 2,41              | 2,40      | 2,41      | 2,42      |
| Stahlschalung  |                   |                               |           |                   |           |           |           |
| $f_{cm}$   | N/mm <sup>2</sup> | 51,93                         |           |                   |           |           |           |
| Streuung $f_{cm}$  |                   | 1,04                          |           |                   |           |           |           |
| Variationsk. $f_{cm}$  |                   | 2,00%                         |           |                   |           |           |           |
| $\rho_m$   |                   | 2,41                          |           |                   |           |           |           |
| Streuung $\rho_m$  |                   | 0,01                          |           |                   |           |           |           |
| Variationsk. $\rho_m$  |                   | 0,43%                         |           |                   |           |           |           |

Tabelle B.4: Materialkennwerte Beton

| Materialkennwerte mit Stahlschalung |                 |                   |             |             |             |           |
|-------------------------------------|-----------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| Beton                               |                 |                   |             |             |             |           |
|                                     |                 | Typ 2.1+2.4       | Typ 1.1+1.2 | Typ 1.3+1.4 | Typ 2.2+2.3 |           |
|                                     |                 | 27.05.2019        | 28.05.2019  | 28.05.2019  | 29.05.2019  |           |
|                                     |                 | 10 d              | 11 d        | 11 d        | 12 d        |           |
| Zylinderdruckfestigkeit             | $f_{cm}$        | N/mm <sup>2</sup> | 51,41       | 51,43       | 51,43       | 51,93     |
|                                     | $\rho_m$        | g/cm <sup>3</sup> |             |             |             | 2,41      |
| Würfeldruckfestigkeit               | $f_{cm,cube}$   | N/mm <sup>2</sup> | 55,27       | 55,29       | 55,29       | 61,85     |
|                                     | $\rho_{m,cube}$ | g/cm <sup>3</sup> | 2,40        | 2,39        | 2,39        | 2,40      |
| Spaltzugfestigkeit                  | $f_{ctm,sp}$    | N/mm <sup>2</sup> |             |             |             | 3,41      |
|                                     | $f_{ctm}$       | N/mm <sup>2</sup> |             |             |             | 3,07      |
|                                     | $\rho_{m,sp}$   | g/cm <sup>3</sup> |             |             |             | 2,39      |
| Elastizitätsmodul                   | $E_{bm}$        | N/mm <sup>2</sup> |             |             |             | 33.807,22 |

## B.2. Materialprüfung Vergussmörtel

Tabelle B.5: Materialprüfung

| Druckfestigkeit                         |                      |          |       |          |       |          |      |
|---|----------------------|----------|-------|----------|-------|----------|------|
| Prüfdatum                               | Montag, 27. Mai 2019 |          |       |          |       |          |      |
| Betonalter                              | 10 Tage              |          |       |          |       |          |      |
| erforderliche Belastungsgeschwindigkeit |                      |          |       |          |       |          |      |
| Laststeigerung R                        | 2,4                  | kN/s     |       |          |       |          |      |
| ERGEBNISSE                              |                      |          |       |          |       |          |      |
|   |                      | Prisma 1 |       | Prisma 2 |       | Prisma 3 |      |
| Gewicht                                 | g                    | 566,8    |       | 564,2    |       | 569      |      |
| $R_c$                                   | N/mm <sup>2</sup>    | 73,28    | 73,24 | 73,17    | 70,56 | 75,86    | 75,3 |
| $\rho$                                  | g/cm <sup>3</sup>    | 2,21     |       | 2,20     |       | 2,22     |      |
| $R_{cm}$                                | N/mm <sup>2</sup>    | 73,57    |       |          |       |          |      |
| Streuung_ $R_{cm}$                      | [-]                  | 1,88     |       |          |       |          |      |
| Variationsk._ $R_{cm}$                  |                      | 2,55%    |       |          |       |          |      |
| $\rho_m$                                | g/cm <sup>3</sup>    | 2,21     |       |          |       |          |      |
| Streuung_ $\rho_m$                      | [-]                  | 0,01     |       |          |       |          |      |
| Variationsk._ $\rho_m$                  |                      | 0,42%    |       |          |       |          |      |

| Druckfestigkeit                         |                        |          |  |          |       |          |       |
|---|------------------------|----------|--|----------|-------|----------|-------|
| Prüfdatum                               | Mittwoch, 29. Mai 2019 |          |  |          |       |          |       |
| Betonalter                              | 12 Tage                |          |  |          |       |          |       |
| erforderliche Belastungsgeschwindigkeit |                        |          |  |          |       |          |       |
| Laststeigerung R                        | 2,4                    | kN/s     |  |          |       |          |       |
| ERGEBNISSE                              |                        |          |  |          |       |          |       |
|   |                        | Prisma 1 |  | Prisma 2 |       | Prisma 3 |       |
| Gewicht                                 | g                      | 566      |  | 568,4    |       | 557,6    |       |
| $R_c$                                   | N/mm <sup>2</sup>      | 74,42    |  | 79,06    | 79,61 | 82,79    | 79,75 |
| $\rho$                                  | g/cm <sup>3</sup>      | 2,21     |  | 2,22     |       | 2,18     |       |
| $R_{cm}$                                | N/mm <sup>2</sup>      | 79,13    |  |          |       |          |       |
| Streuung_ $R_{cm}$                      | [-]                    | 3,01     |  |          |       |          |       |
| Variationsk._ $R_{cm}$                  |                        | 3,80%    |  |          |       |          |       |
| $\rho_m$                                | g/cm <sup>3</sup>      | 2,20     |  |          |       |          |       |
| Streuung_ $\rho_m$                      | [-]                    | 0,02     |  |          |       |          |       |
| Variationsk._ $\rho_m$                  |                        | 1,01%    |  |          |       |          |       |

Tabelle B.6: Materialkennwerte Mörtel

| Vergussmörtel   |             |                   |       |       |
|-----------------|-------------|-------------------|-------|-------|
| Druckfestigkeit | $R_{cm}$    | N/mm <sup>2</sup> | 73,57 | 79,13 |
|                 | $\rho_{fm}$ | g/cm <sup>3</sup> | 2,21  | 2,20  |

# C. Typ RT

## C.1. RT V01

### C.1.1 Auswertung hydraulische Presse

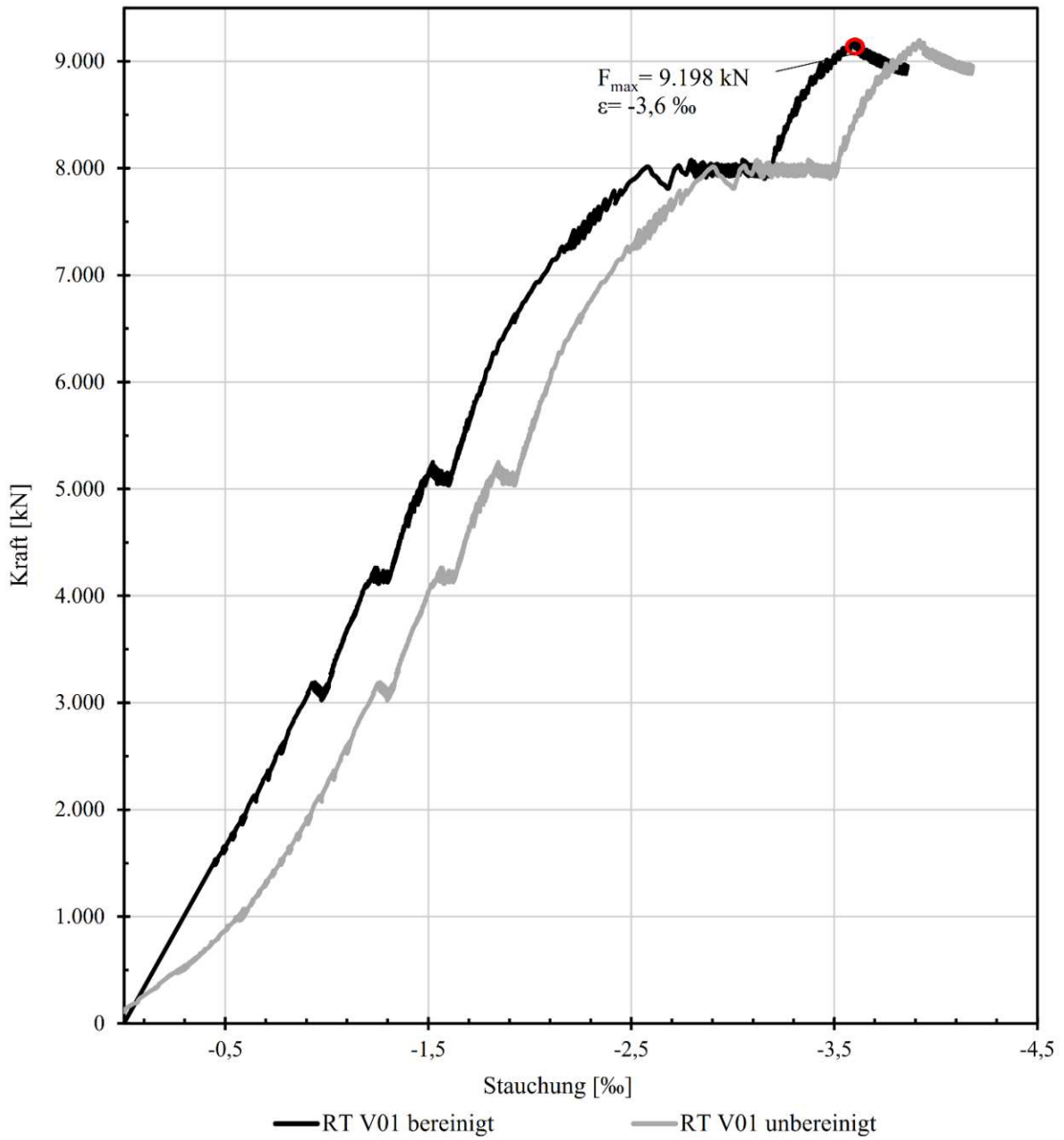
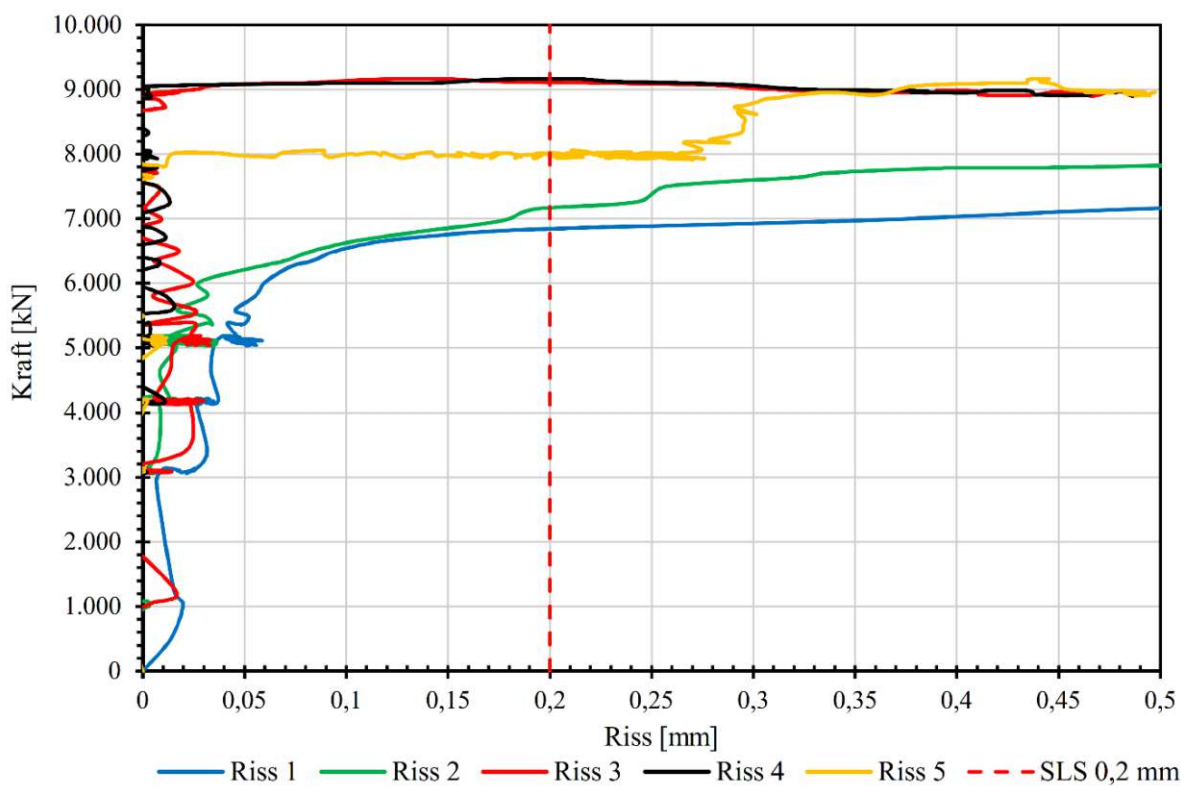
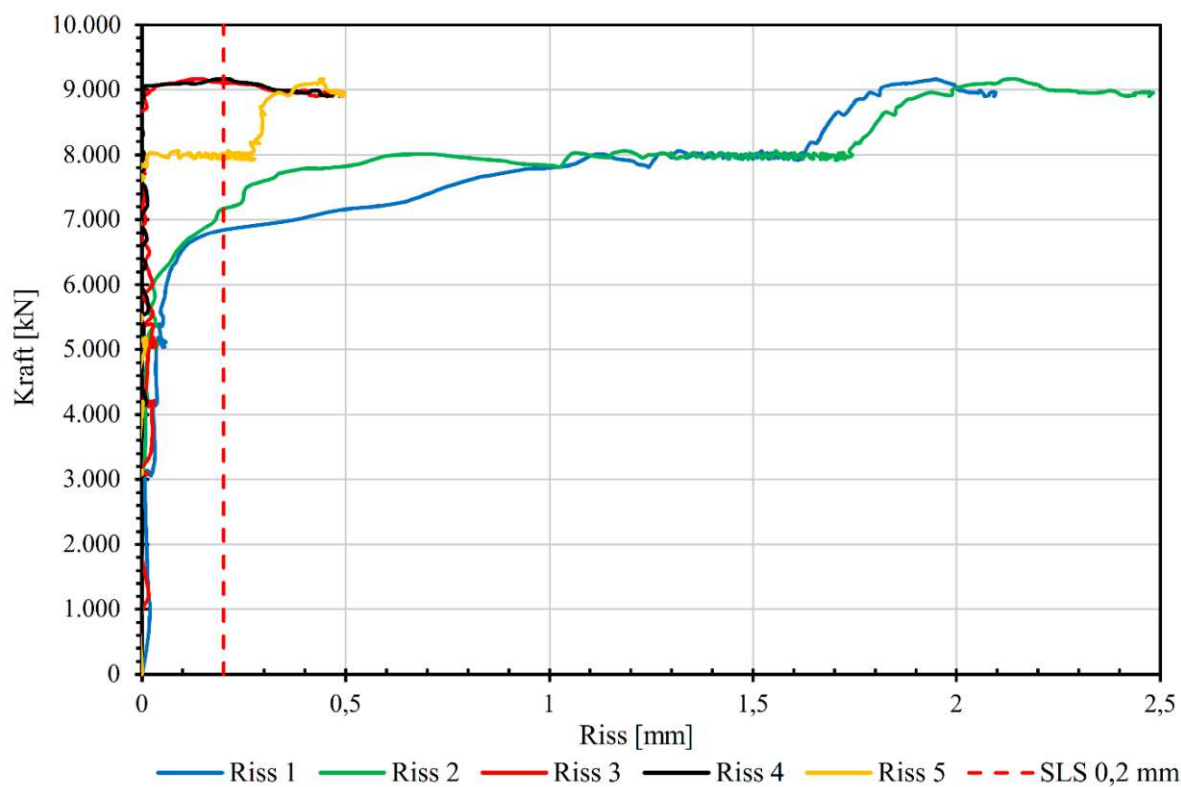


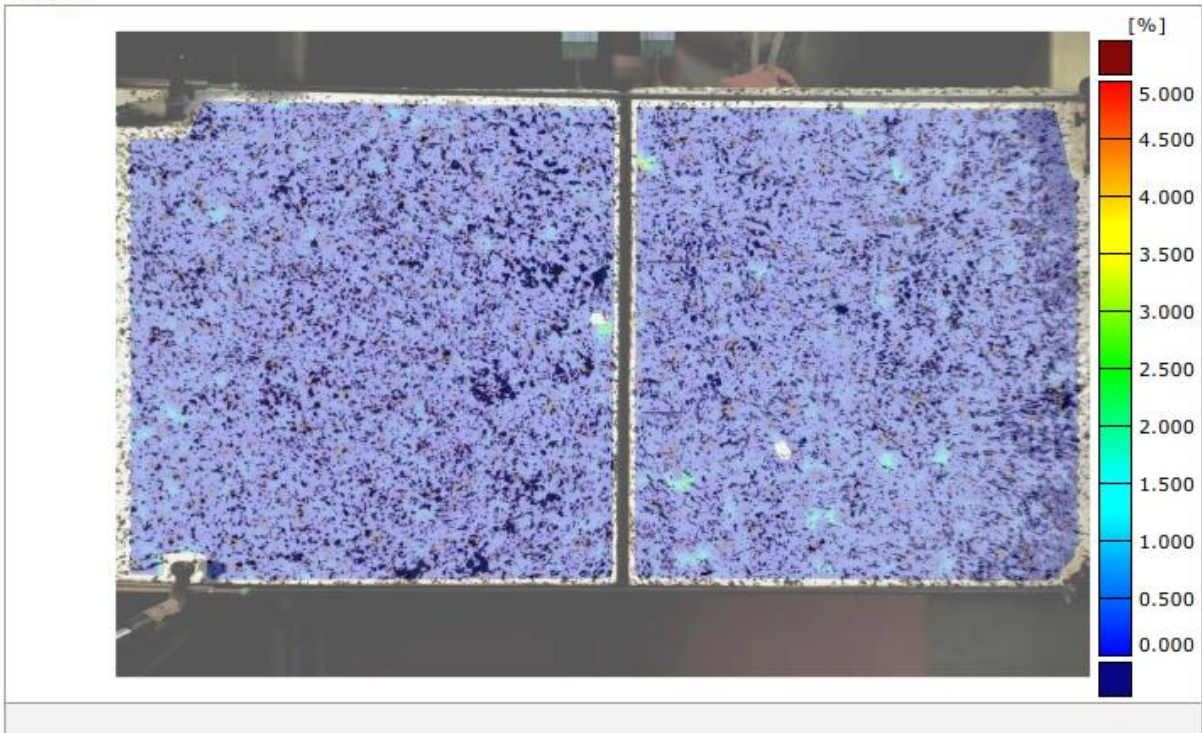
Abbildung C.1: Last-Verformungsbeziehung RT V01

## C.1.2 Auswertung Aramis



## 3.100 kN und 4.200 kN

3.100 kN



4.200 kN

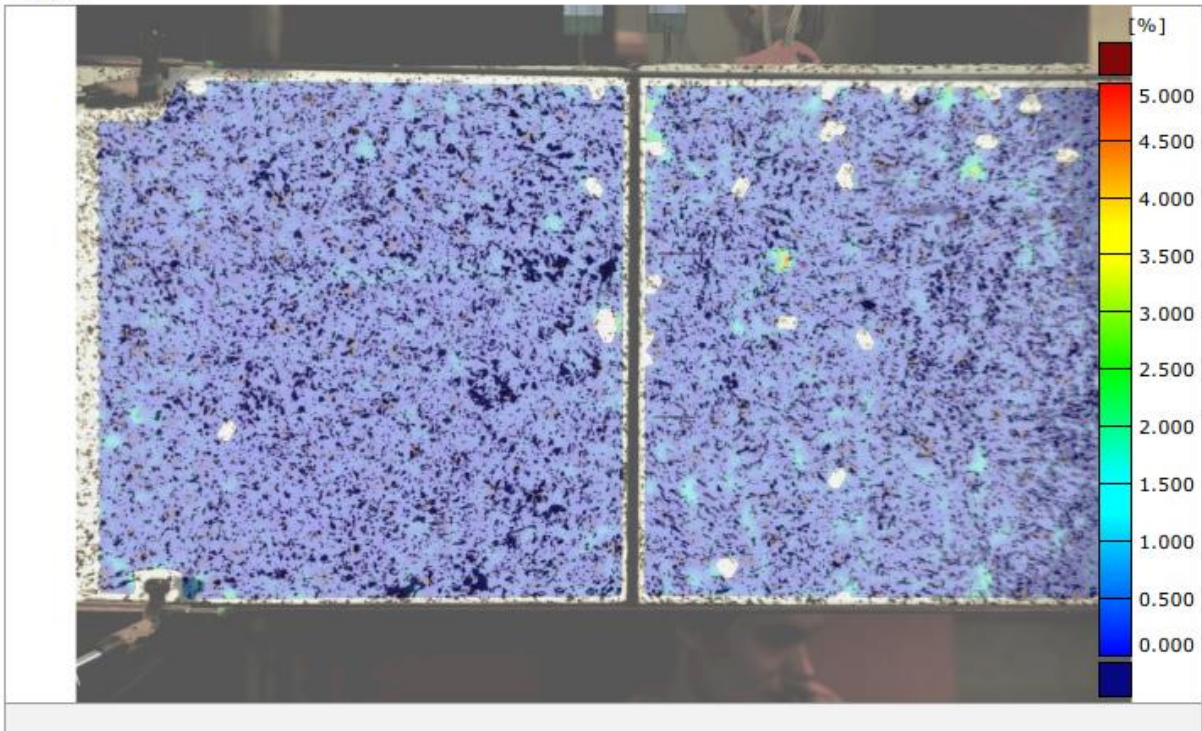
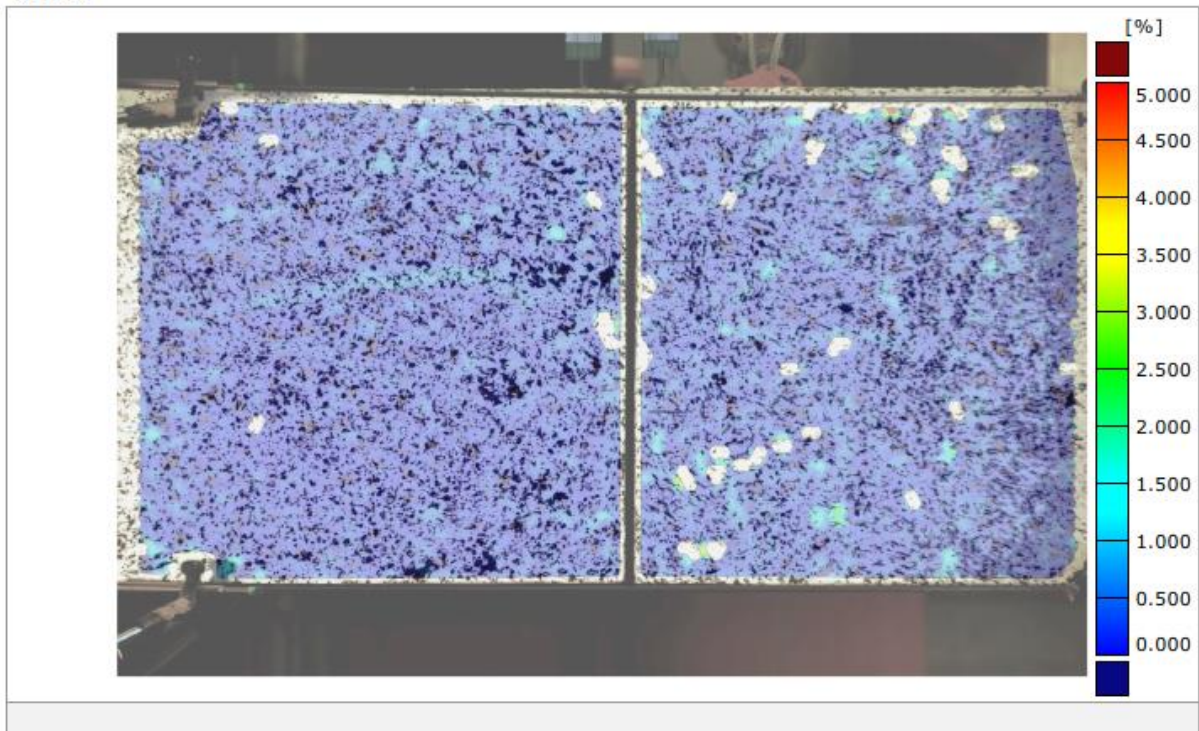


Abbildung C.4: Rissbild 3.100 kN und 4.200 kN aus Aramis, RT V01

## 5.100 kN und 8.000 kN

5.100 kN



8.000 kN

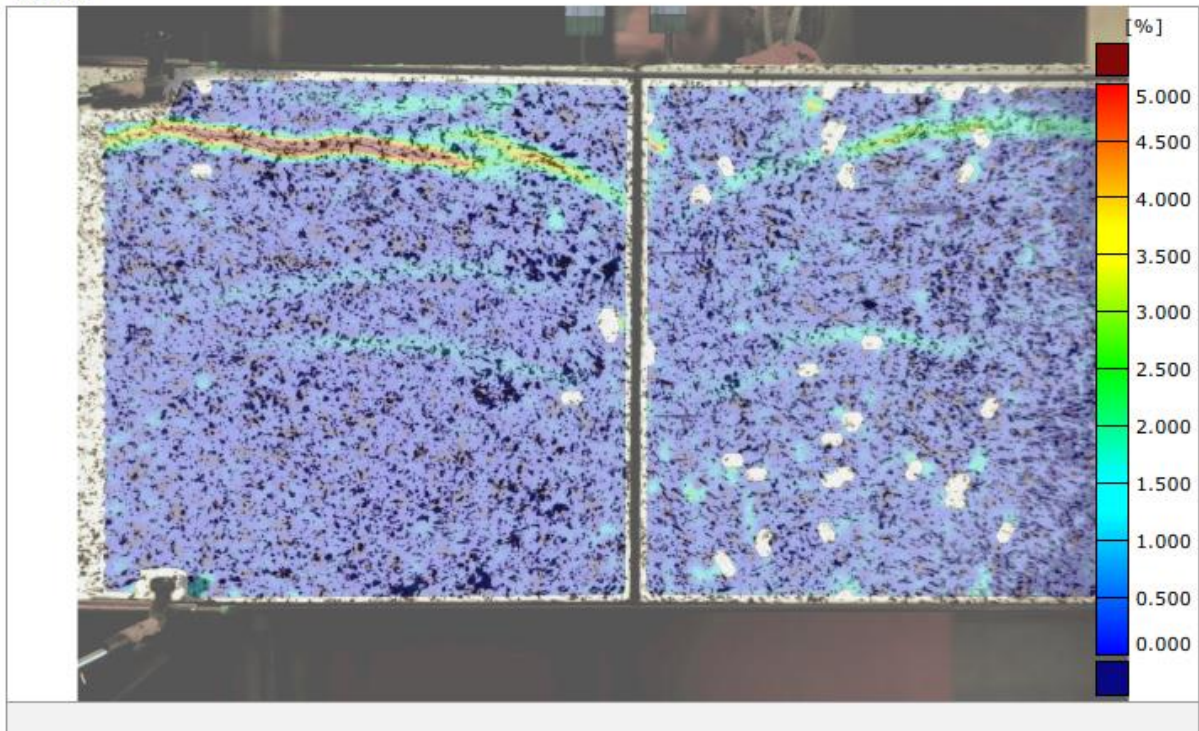


Abbildung C.5: Rissbild 5.100 kN und 8.000 kN aus Aramis, RT V01



## 9.198 kN - Höchstlast

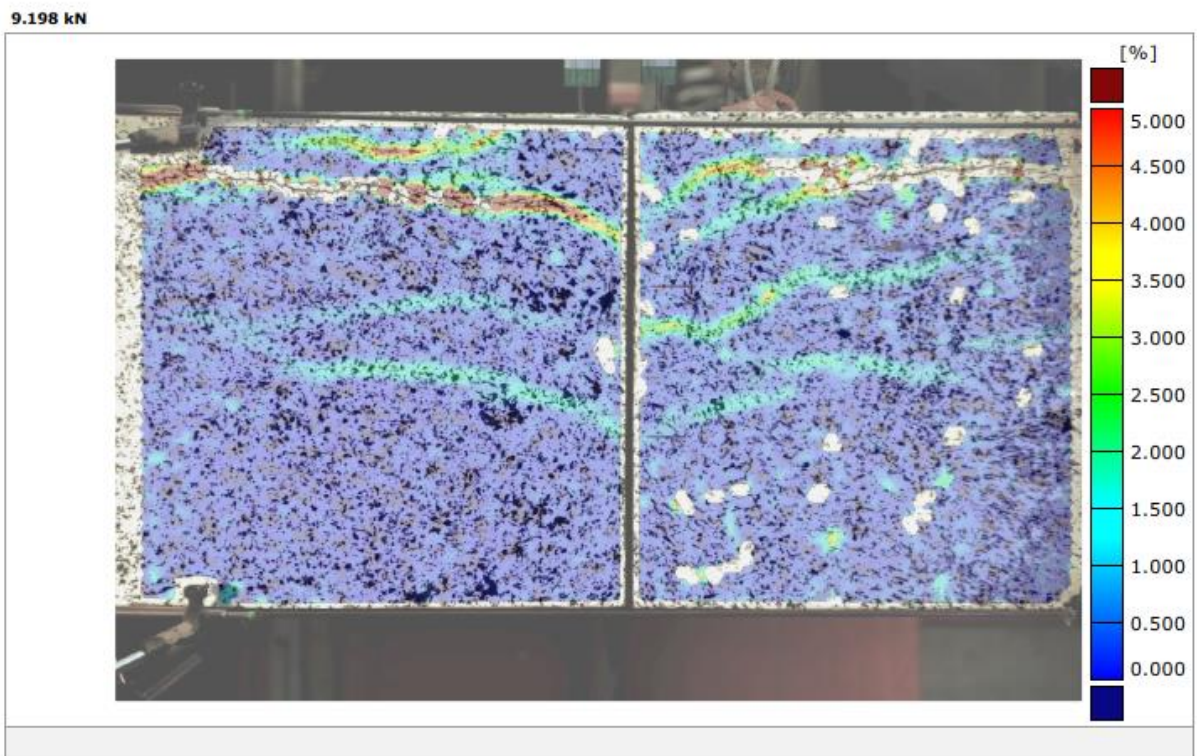
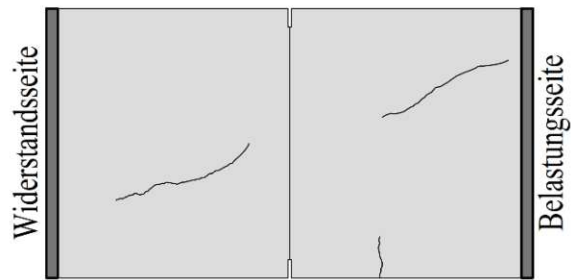


Abbildung C.6: Rissbild 9.198 kN aus Aramis, RT V01

### C.1.3 Händische Rissaufzeichnung

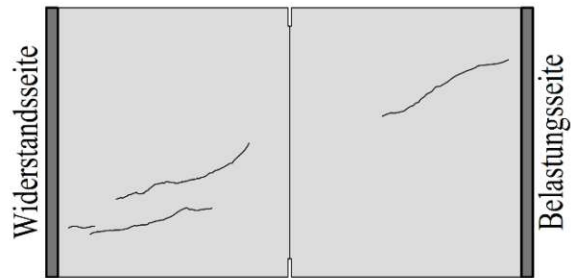
Haltephase 3.100 kN

33,0% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



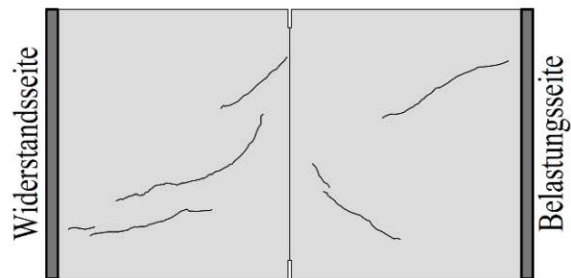
Haltephase 4.200 kN

44,6% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



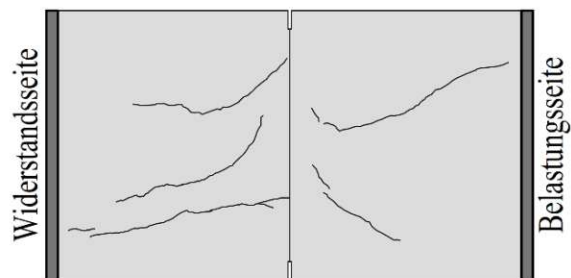
Haltephase 5.100 kN

54,1% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



Haltephase 8.100 kN

83,2% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



Bruchlast 9.198 kN

98,0% der Bruchlast aus der Lastgeschichte

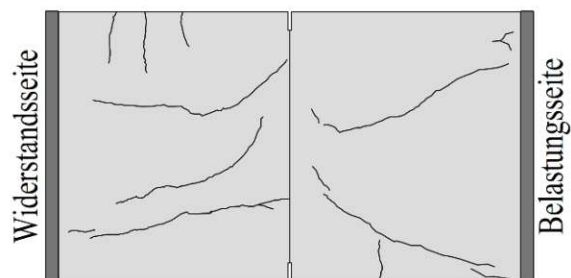
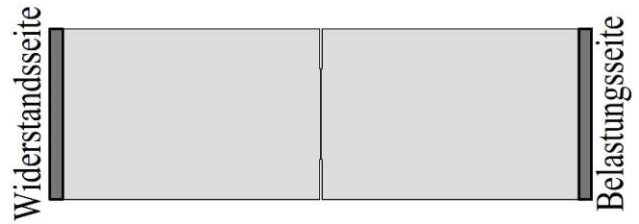


Abbildung C.7: Rissbild Untersicht, RT V01

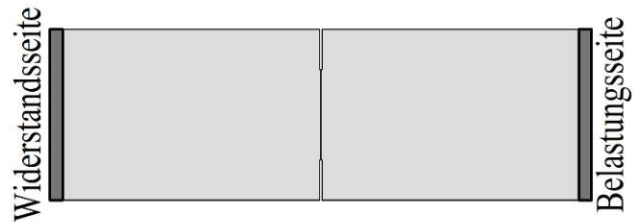
Haltephase 3.100 kN

33,0% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



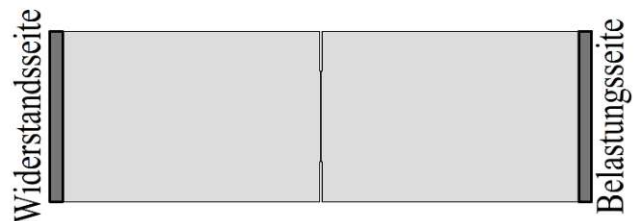
Haltephase 4.200 kN

44,6% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



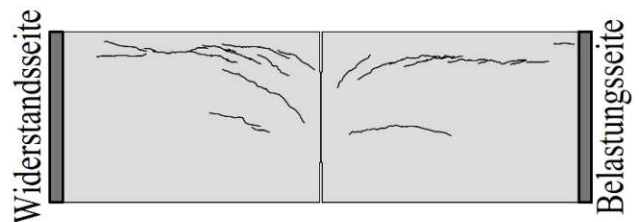
Haltephase 5.100 kN

54,1% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



Haltephase 8.100 kN

83,2% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



Bruchlast 9.198 kN

98,0% der Bruchlast aus der Lastgeschichte

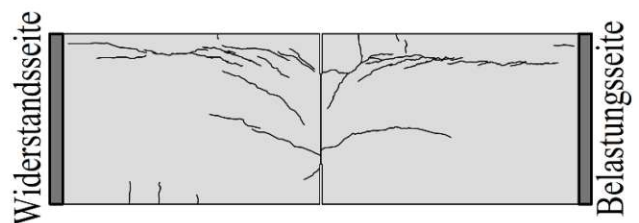


Abbildung C.8: Rissbild Seitansicht, RT V01

## C.2. RT V02

### C.2.1 Auswertung hydraulische Presse

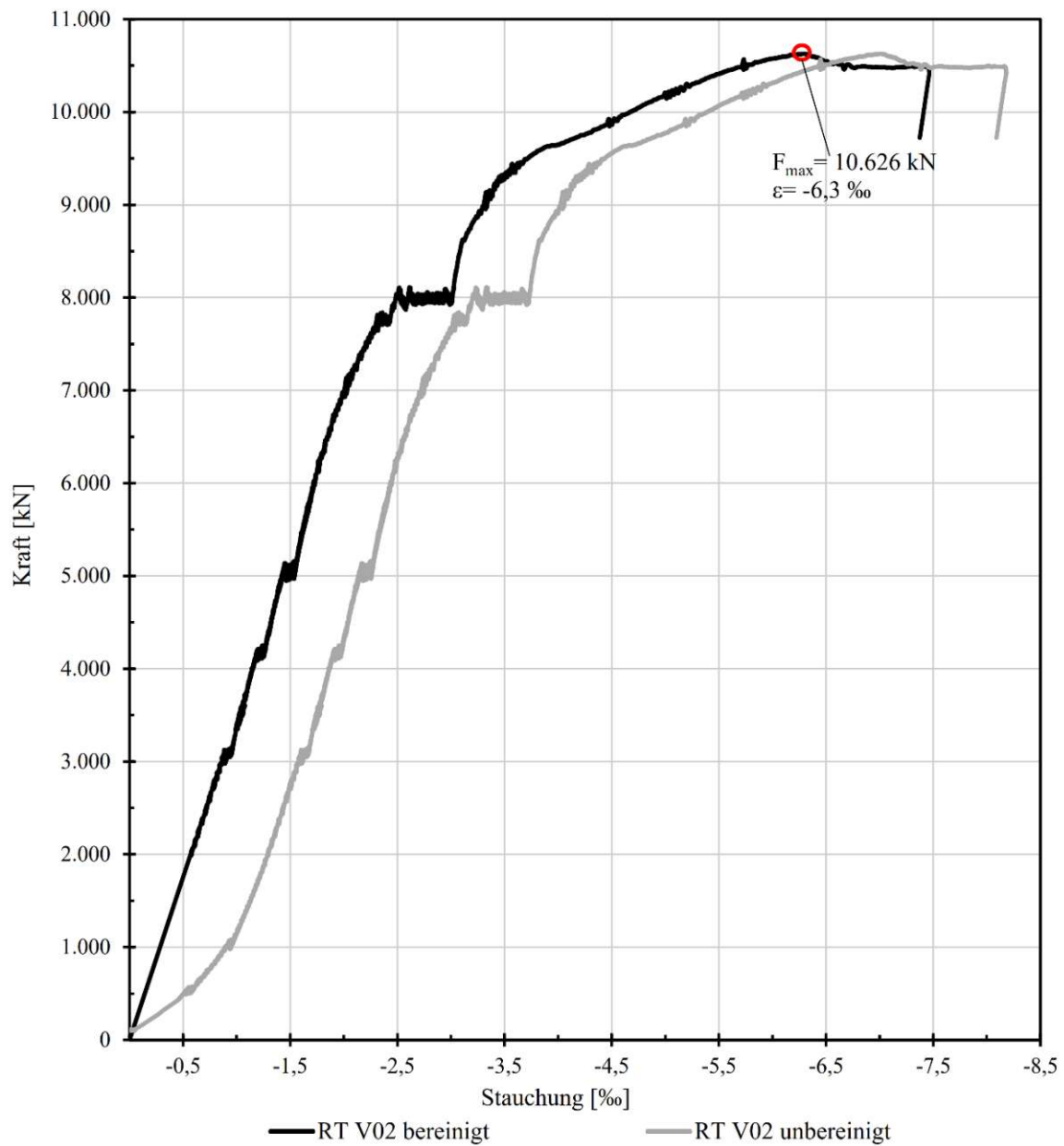


Abbildung C.9: Last-Verformungsbeziehung, RT V02

## C.2.2 Auswertung Aramis

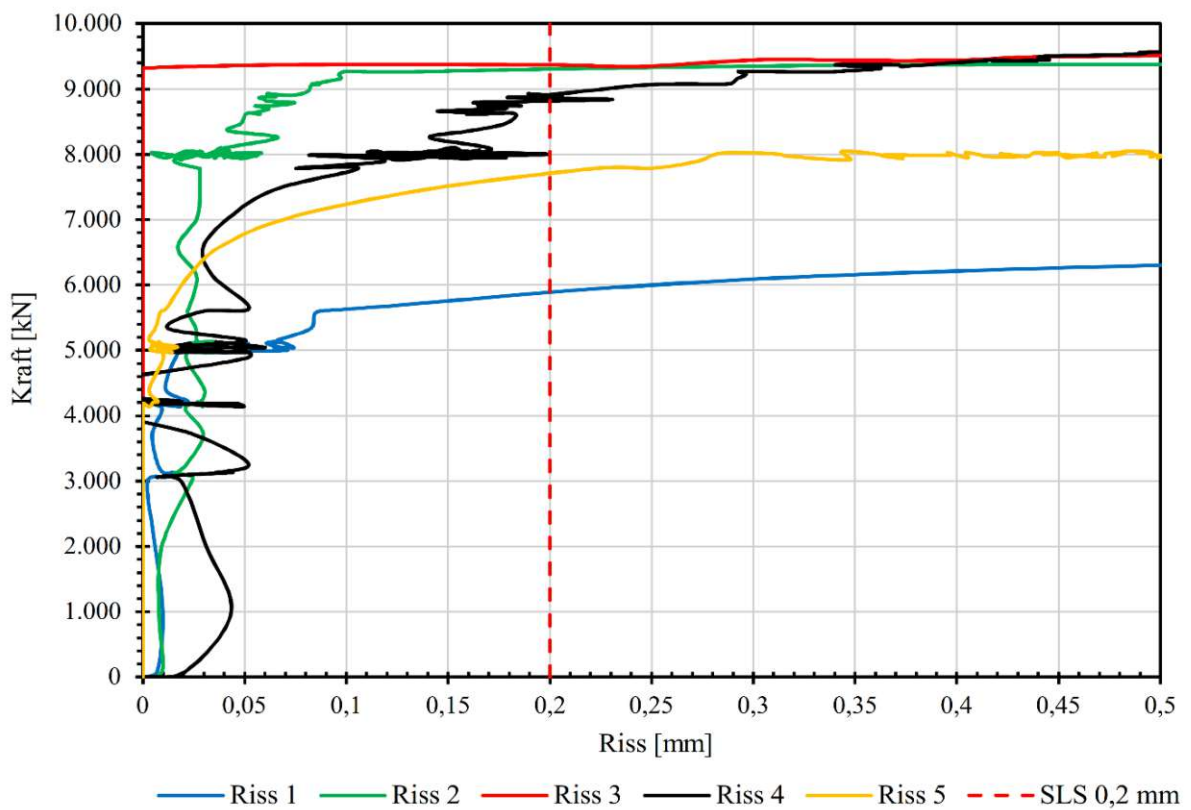
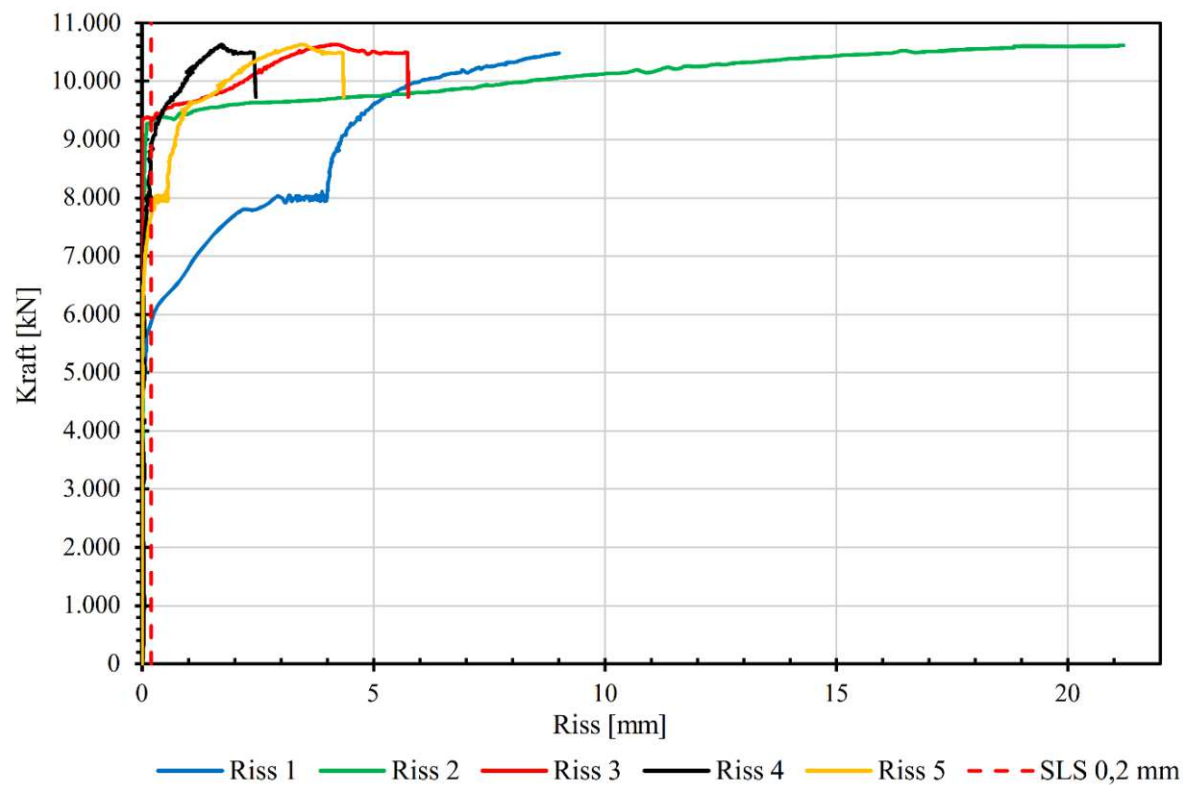


Abbildung C.11: Rissentwicklung bis 0,5 mm aus Aramis, RT V02

Rissbezeichnung und Weiten bei 8.000 kN

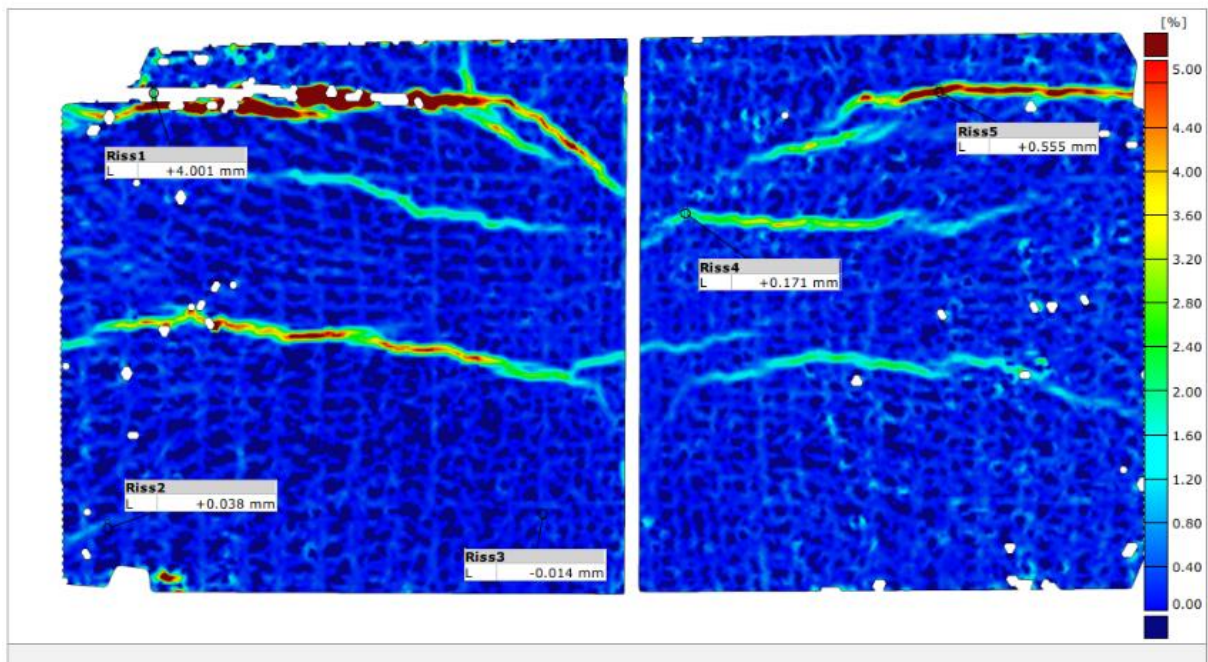


Abbildung C.12: Rissbezeichnung und Rissweiten bei 8.000 kN aus Aramis, RT V02

3.100 kN

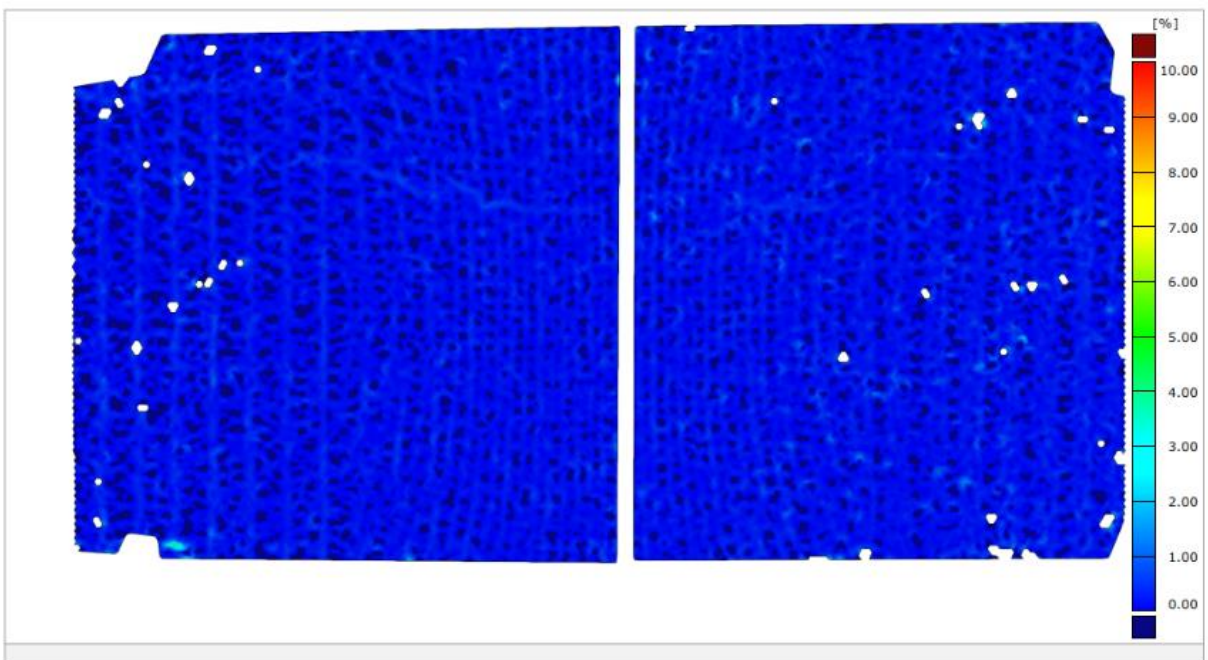


Abbildung C.13: Rissbild 3.100 kN aus Aramis, RT V02

4.200 kN

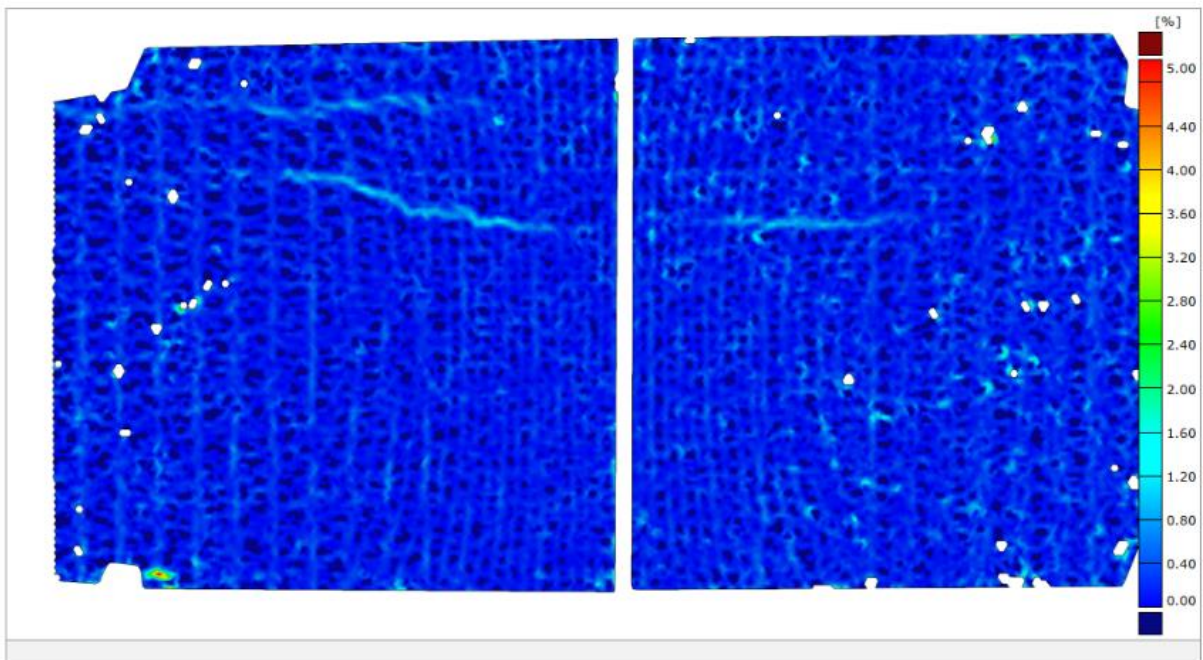


Abbildung C.14: Rissbild 4.200 kN aus Aramis, RT V02

5.100 kN

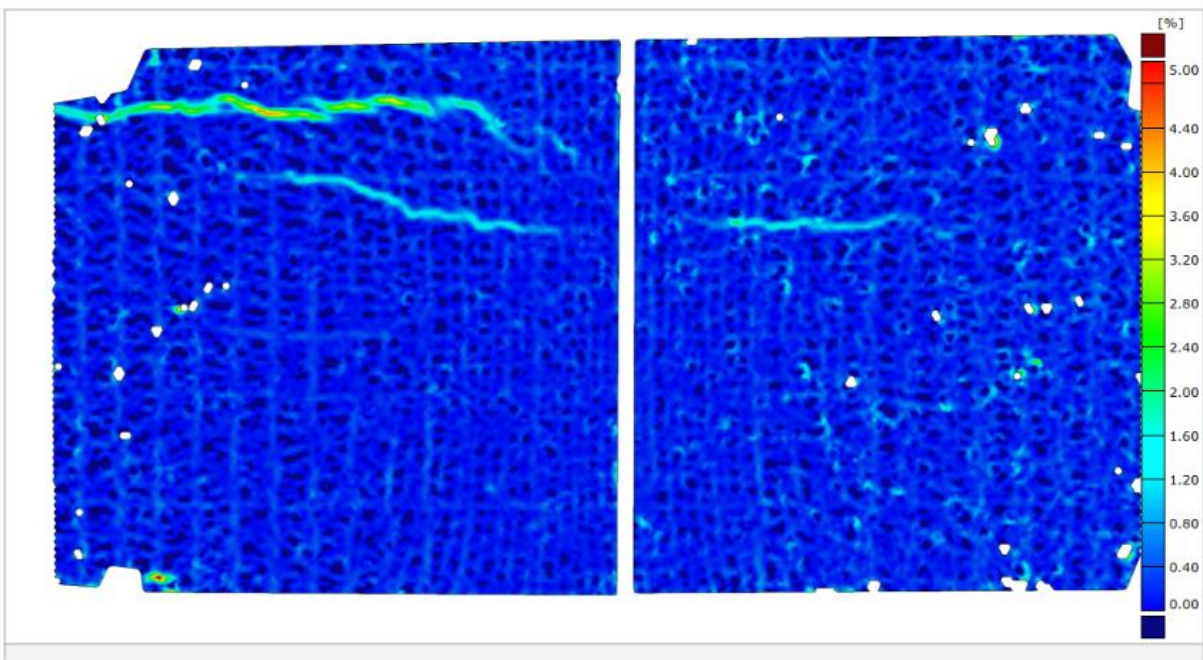


Abbildung C.15: Rissbild 5.100 kN aus Aramis, RT V02

8.100 kN

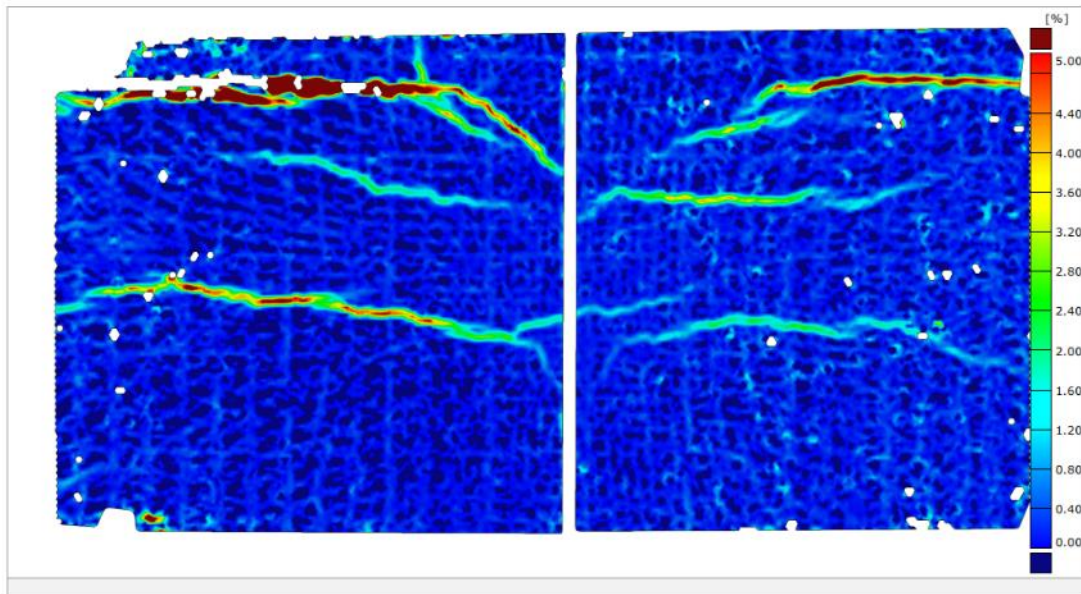


Abbildung C.16: Rissbild 8.100 kN aus Aramis, RT V02

10.626 kN - Höchstlast

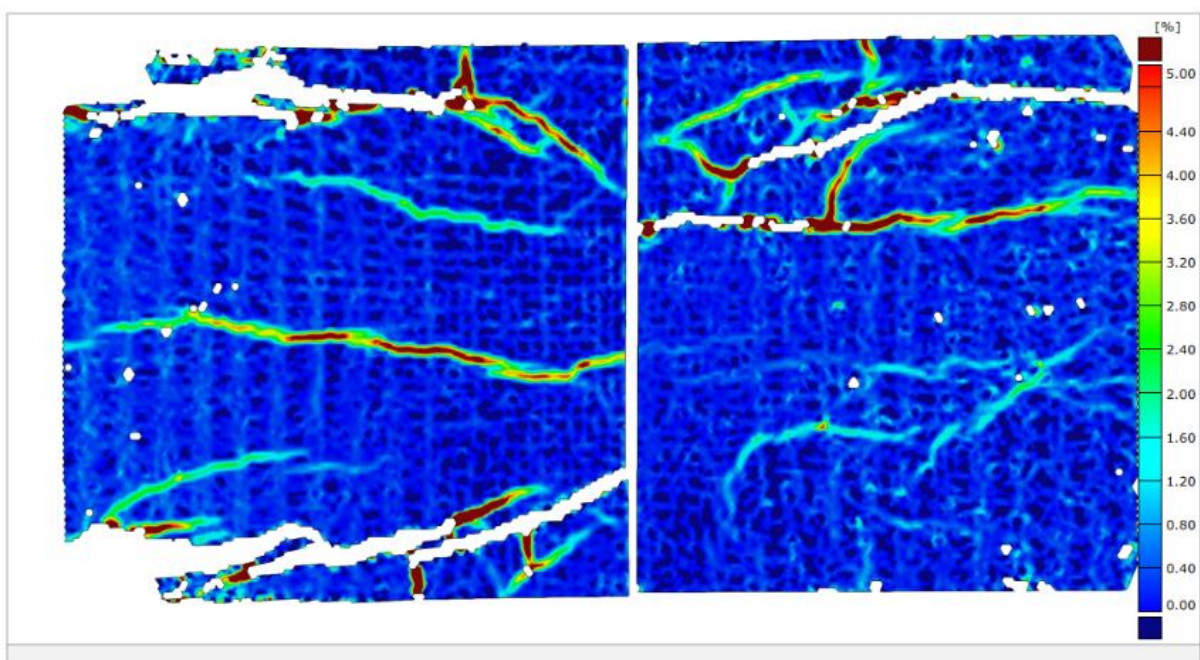
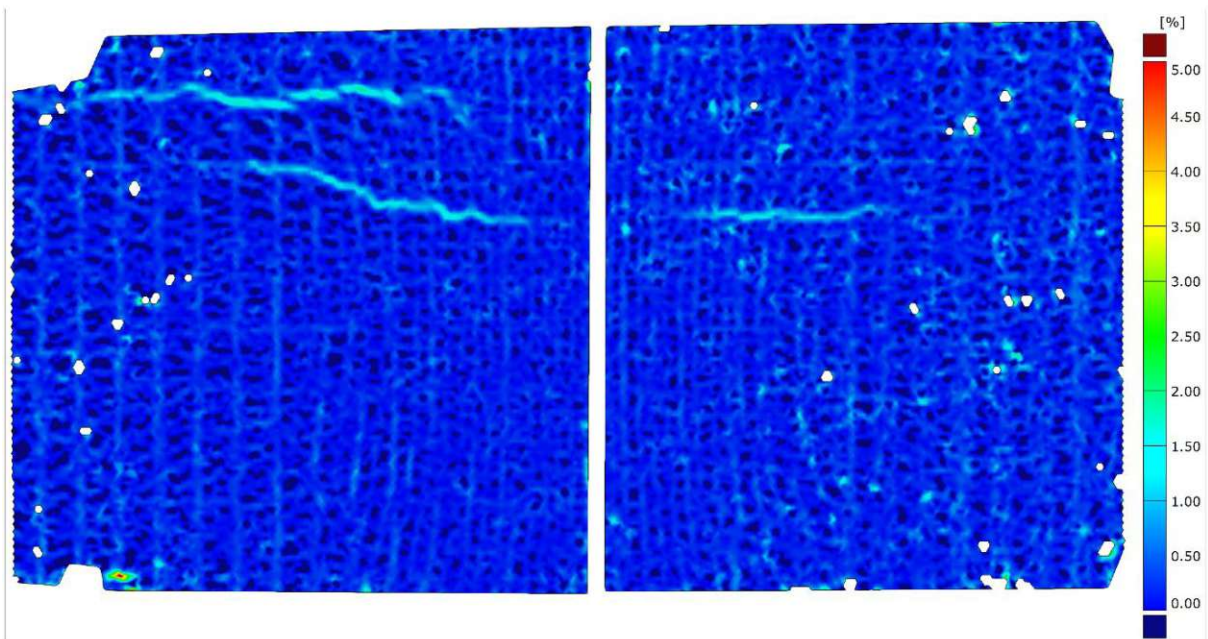


Abbildung C.17: Rissbild 10.626 kN - Höchstlast aus Aramis, RT V02



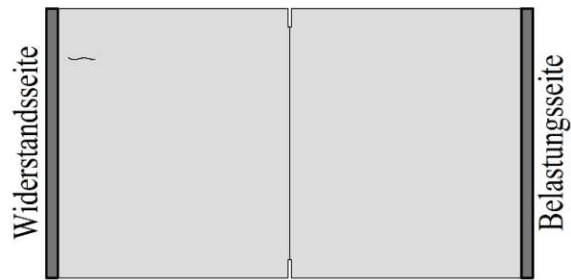
Rissbild bei SLS-Last 5.892 kN

Abbildung C.18: Rissbild bei  $F_{SLS}$  aus Aramis, RT V02

### C.2.3 Händische Rissaufzeichnung

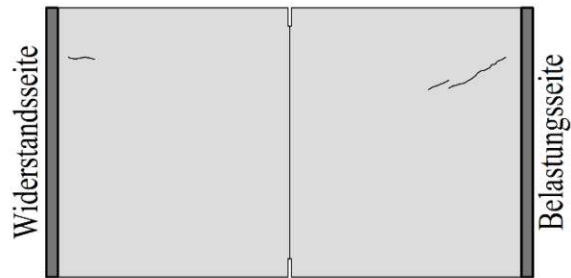
Haltephase 3.100 kN

33,0% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



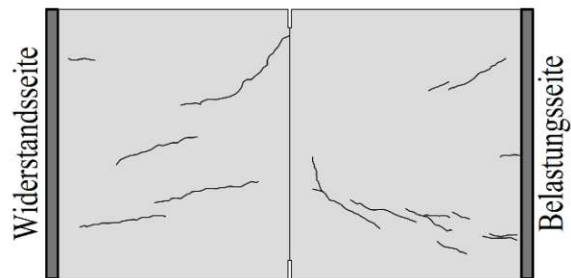
Haltephase 4.200 kN

44,6% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



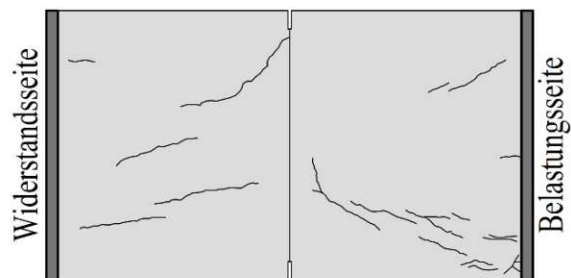
Haltephase 5.100 kN

54,1% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



Haltephase 8.100 kN

83,2% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



Bruchlast 10.626 kN

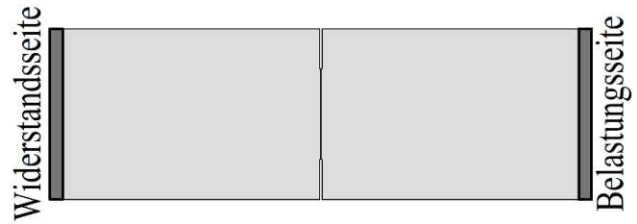
113,2% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



Abbildung C.19: Rissbild Untersicht, RT V02

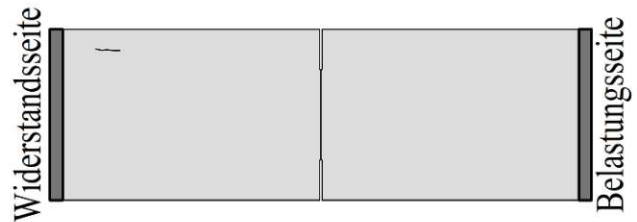
Haltephase 3.100 kN

33,0% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



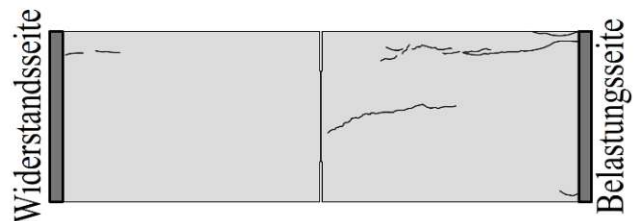
Haltephase 4.200 kN

44,6% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



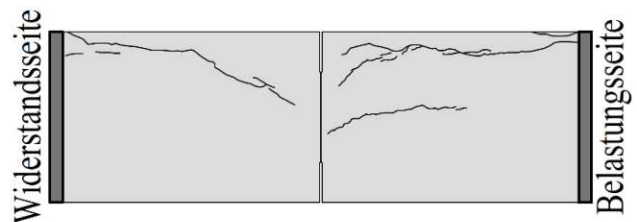
Haltephase 5.100 kN

54,1% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



Haltephase 8.100 kN

83,2% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



Bruchlast 10.626 kN

113,2% der Bruchlast aus der Lastgeschichte

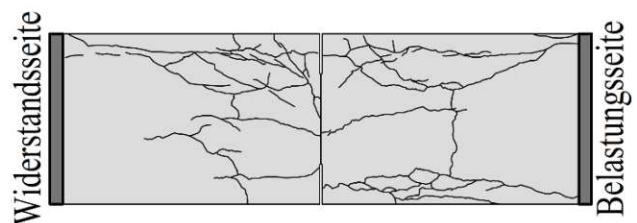


Abbildung C.20: Rissbild Seitenansicht, RT V02

# D. Typ MT

## D.1. MT V01

### D.1.1 Auswertung hydraulische Presse

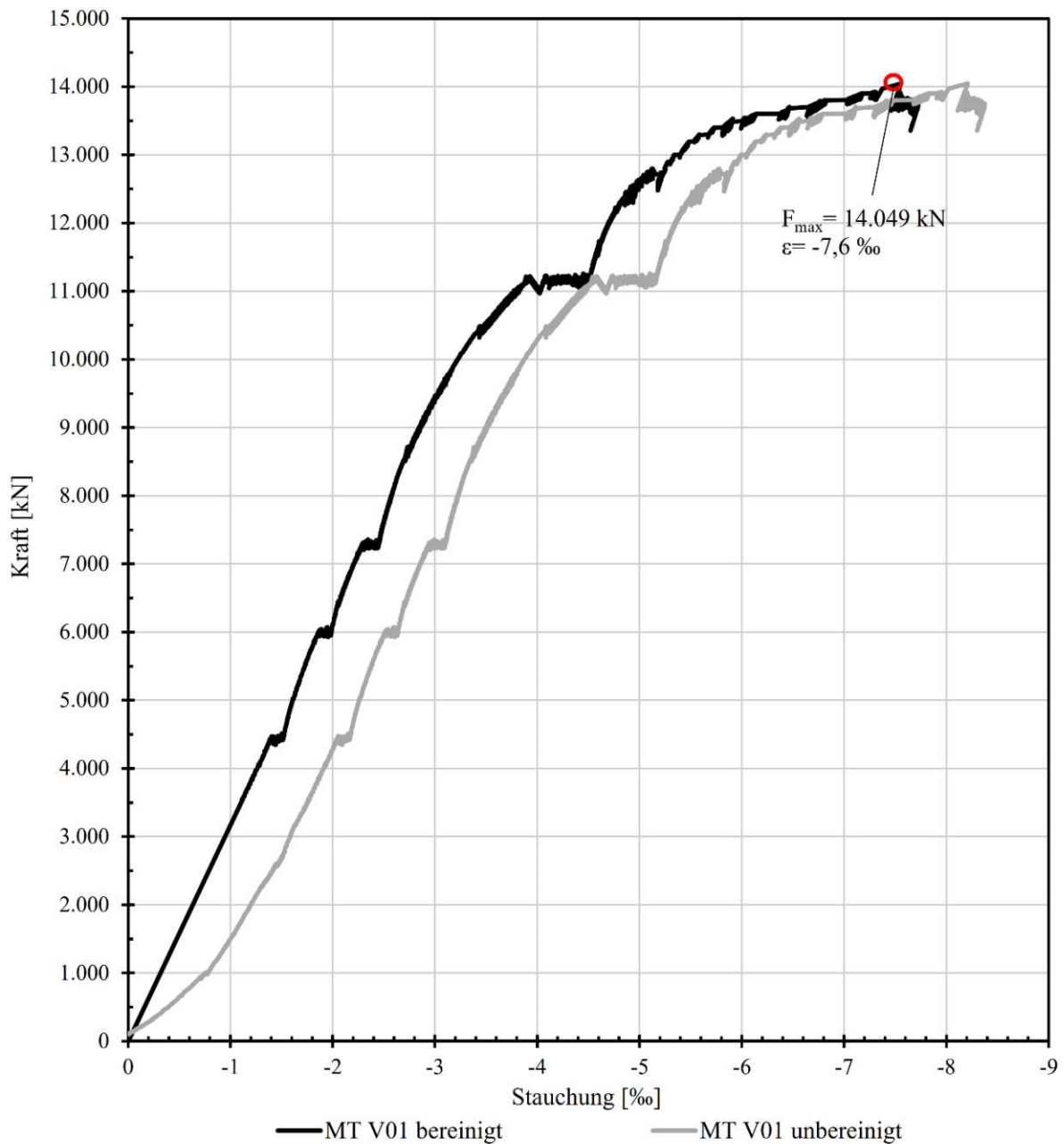


Abbildung D.1: Last-Verformungsbeziehung, MT V01

## D.1.2 Auswertung Aramis

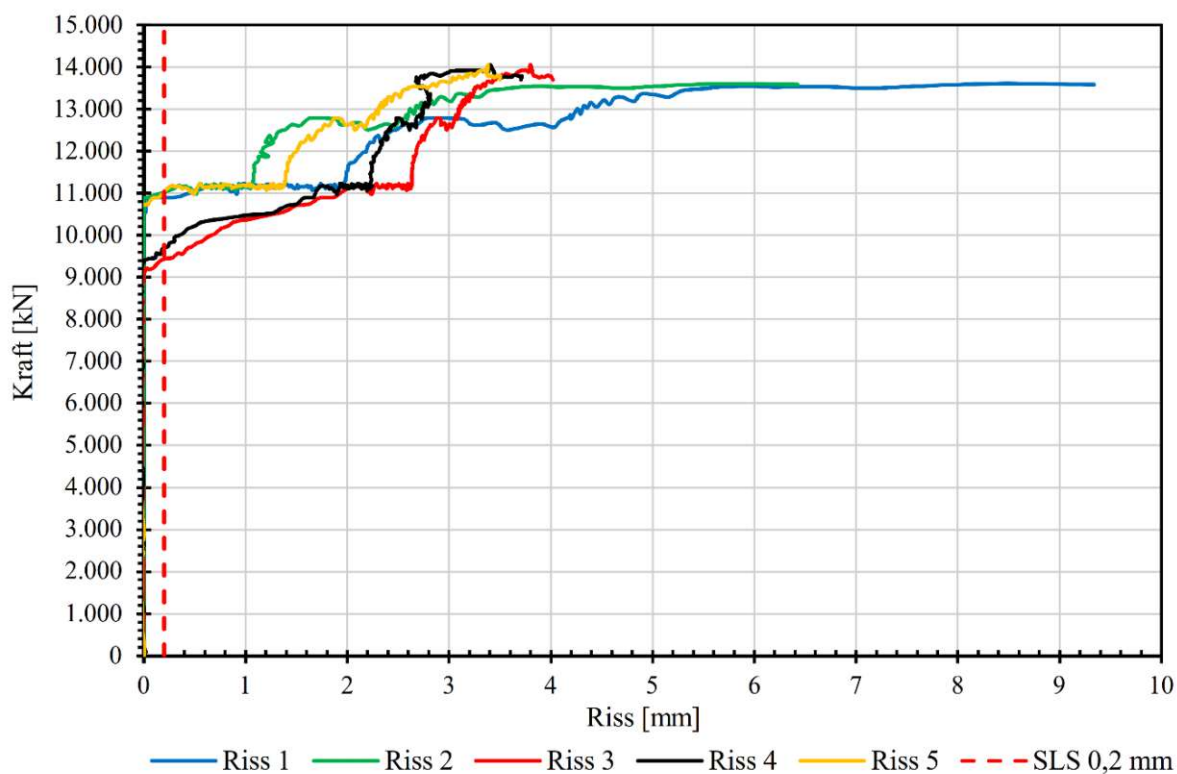


Abbildung D.2: Rissentwicklung aus Aramis, MT V01

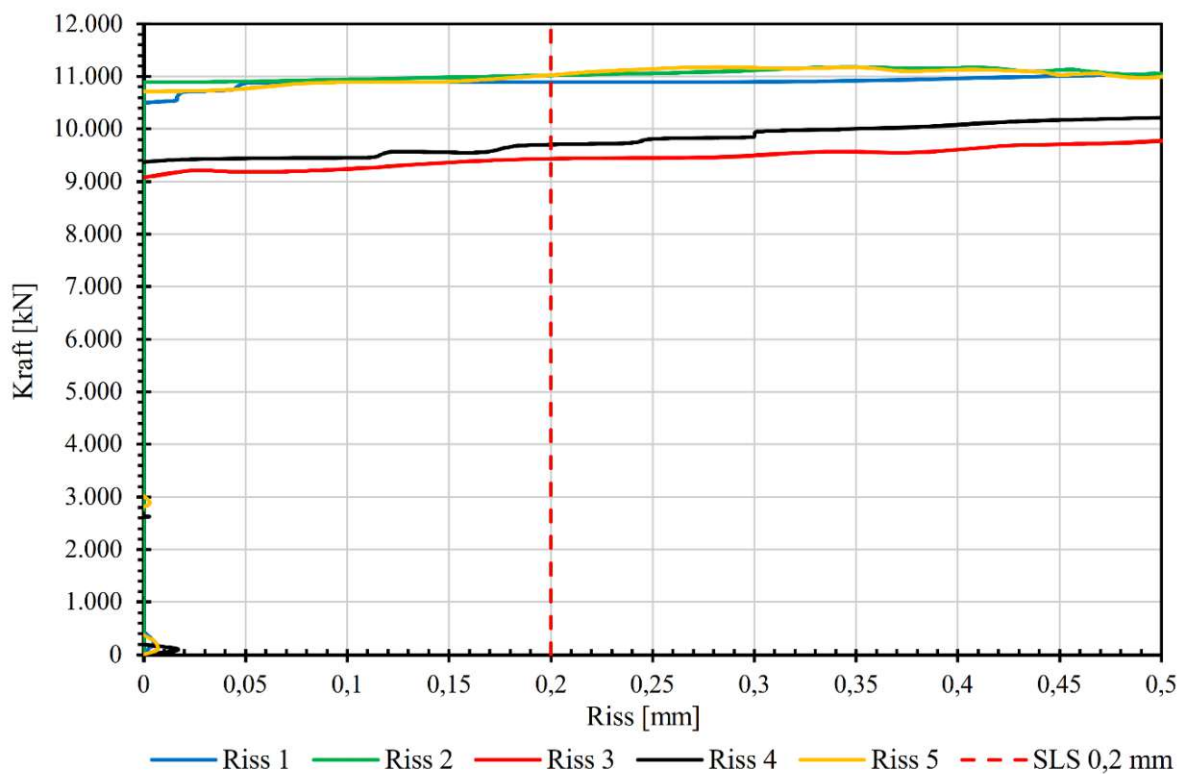
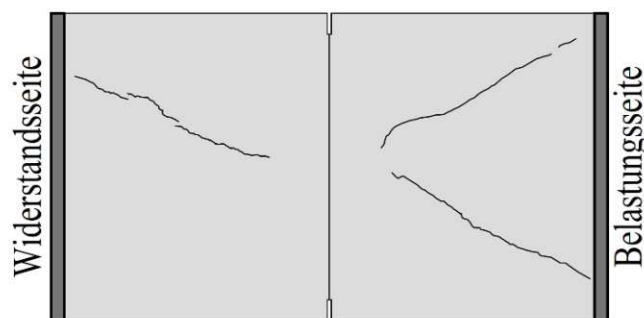


Abbildung D.3: Rissentwicklung bis 0,5 mm aus Aramis, MT V01

### D.1.3 Händische Rissaufzeichnung

Haltephase 4.450 kN

33,0% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



Haltephase 6.000 kN

44,6% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



Haltephase 7.300 kN

54,1% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



Haltephase 11.200 kN

83,2% der Bruchlast aus der Lastgeschichte

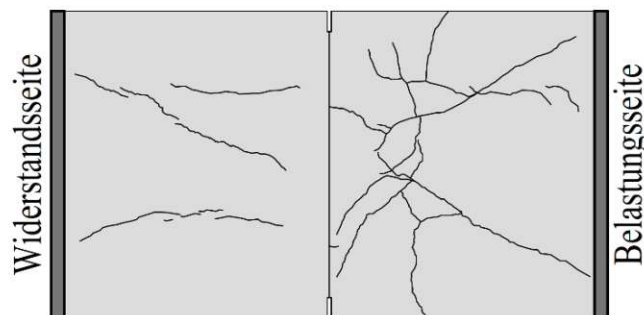
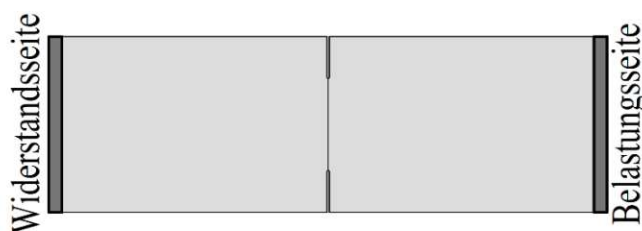


Abbildung D.4: Rissbild Untersicht, MT V01

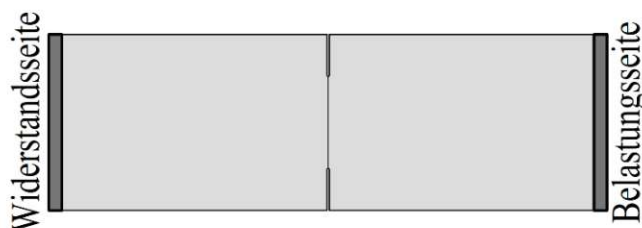
Haltephase 4.450 kN

33,0% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



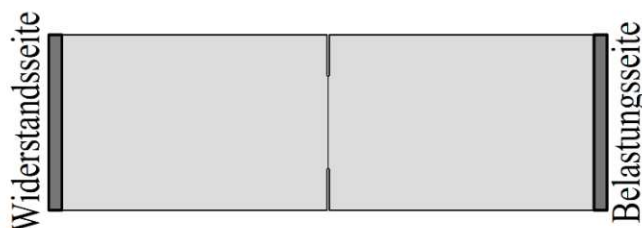
Haltephase 6.000 kN

44,6% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



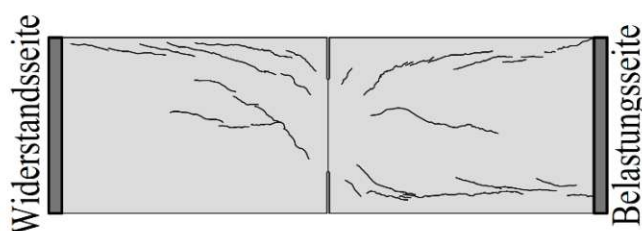
Haltephase 7.300 kN

54,1% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



Haltephase 11.200 kN

83,2% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



Bruchlast 14.049 kN

104,4% der Bruchlast aus der Lastgeschichte

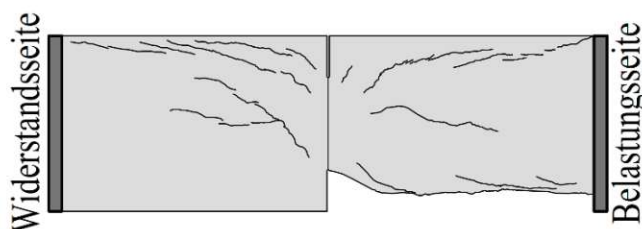


Abbildung D.5: Rissbild Seitenansicht, MT V01

## D.2. MT V02

### D.2.1 Auswertung hydraulische Presse

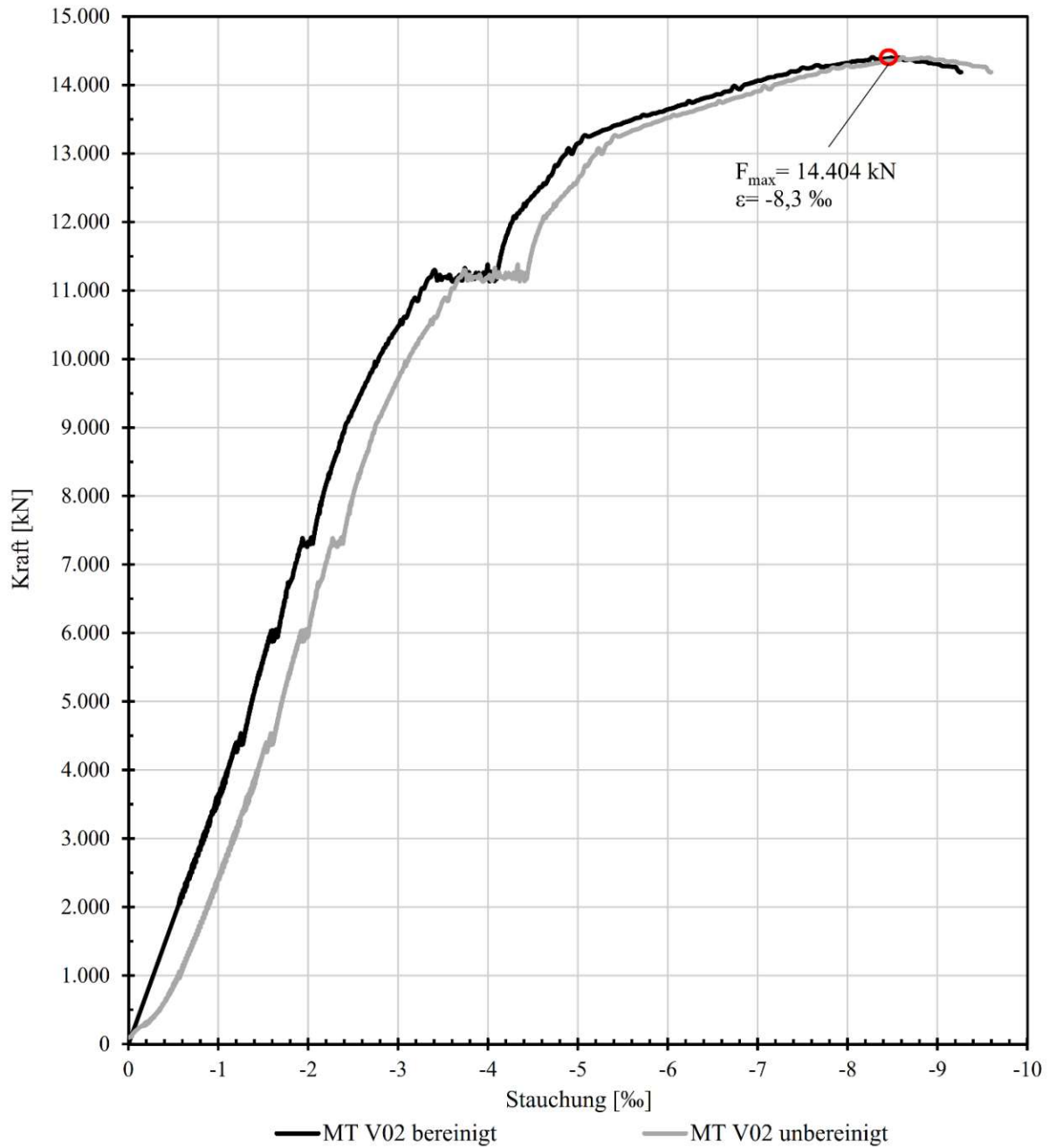
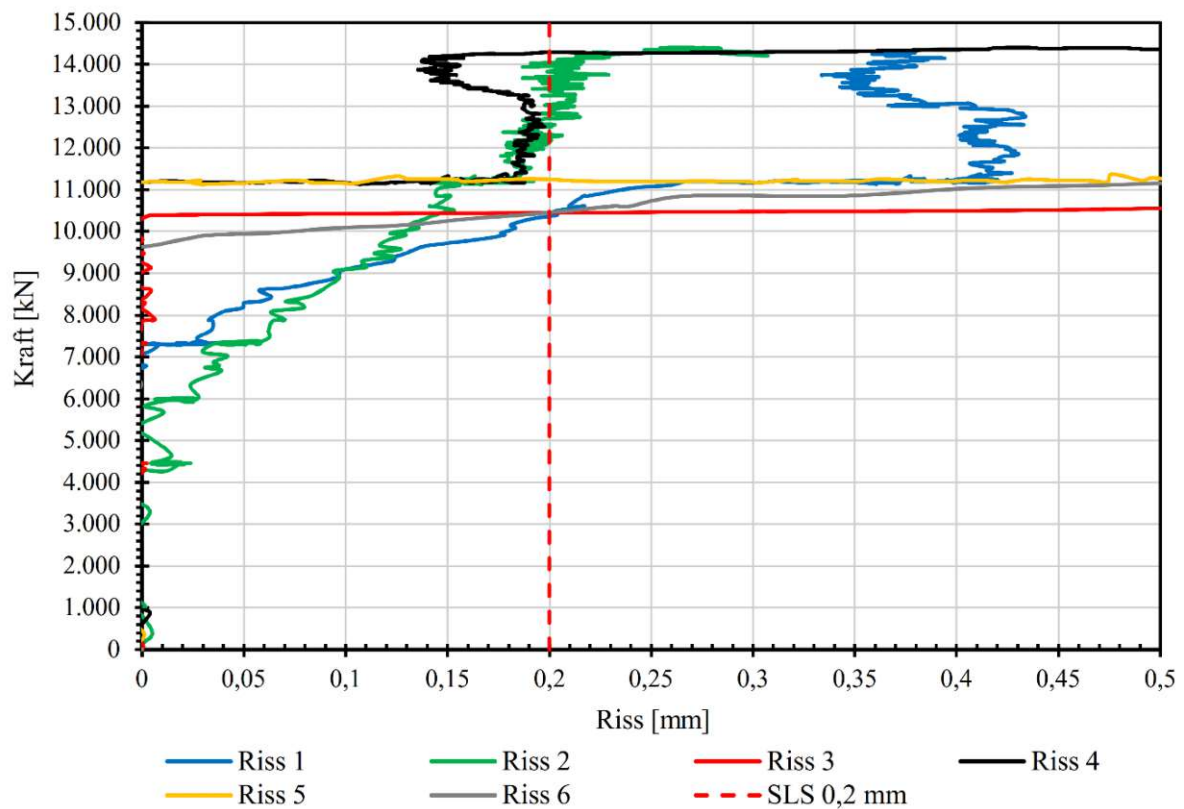
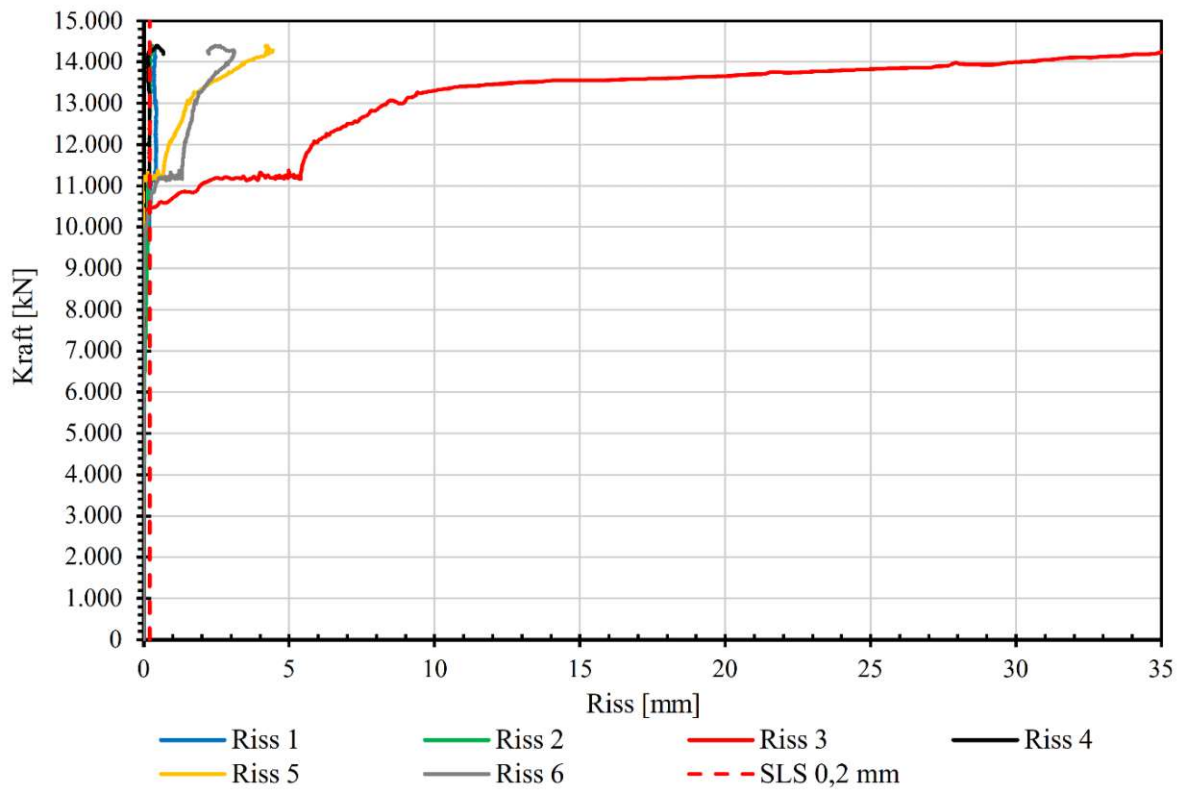


Abbildung D.6: Last-Verformungsbeziehung, MT V02



## D.2.2 Auswertung Aramis



Rissbezeichnung und Weiten bei 11.200 kN

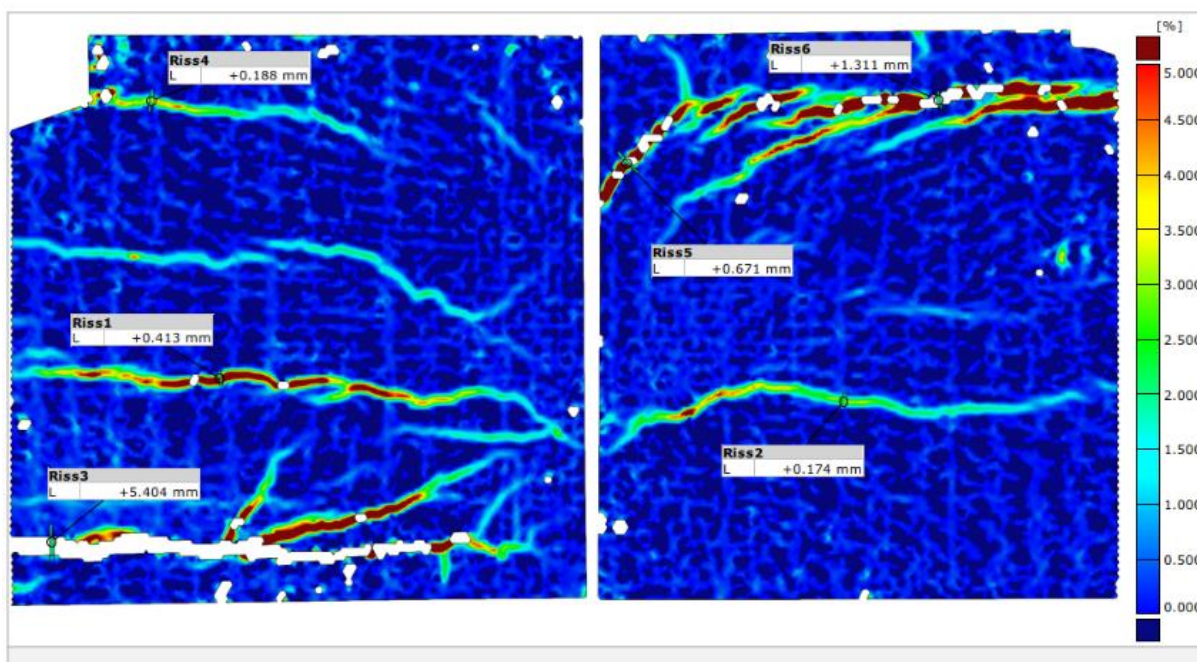


Abbildung D.9: Rissbezeichnung und Rissweiten bei 11.200 kN aus Aramis, MT V02

4.450 kN

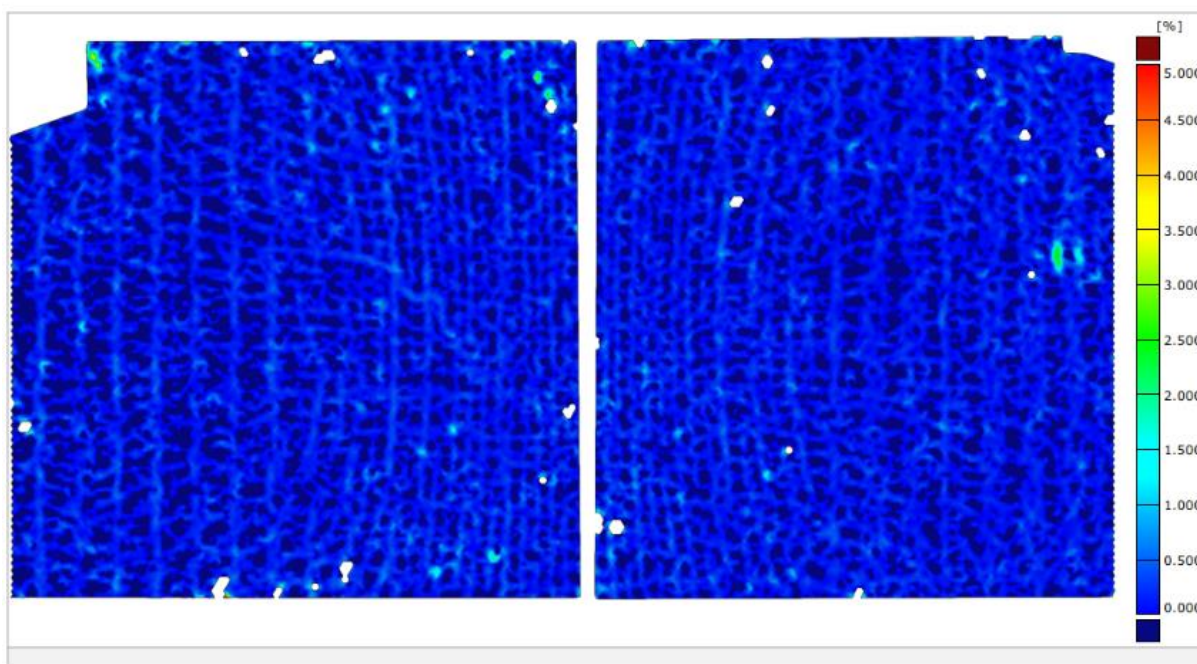


Abbildung D.10: Rissbild 4.450 kN aus Aramis, MT V02

6.000 kN

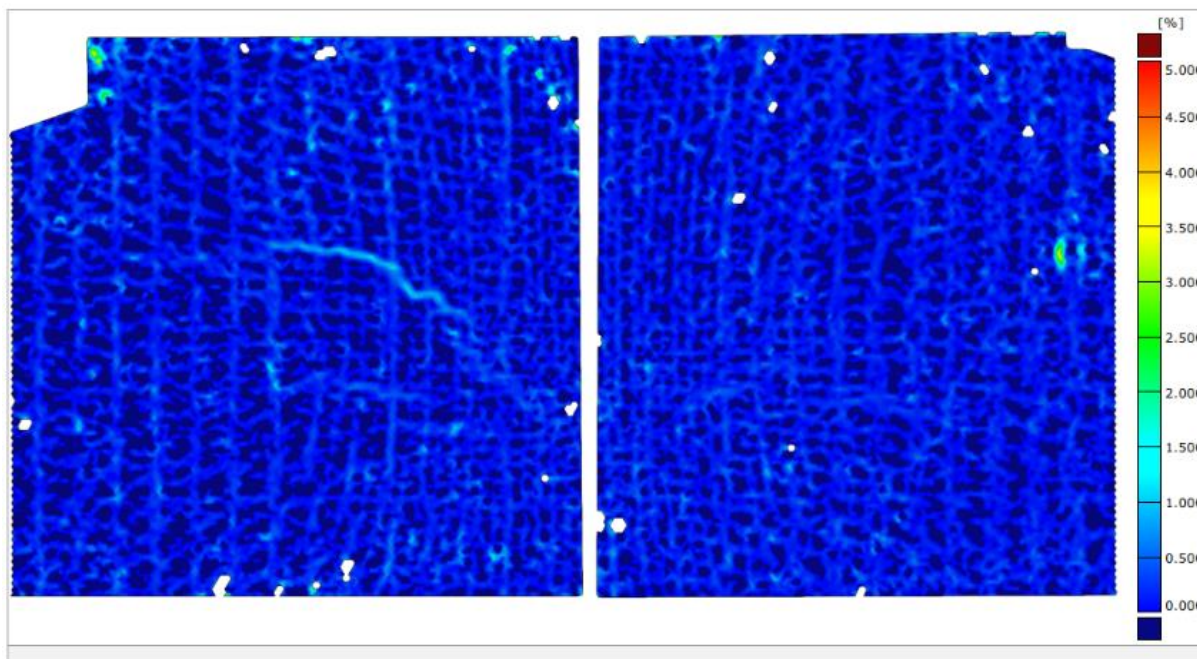


Abbildung D.11: Rissbild 6.000 kN aus Aramis, MT V02

7.300 kN

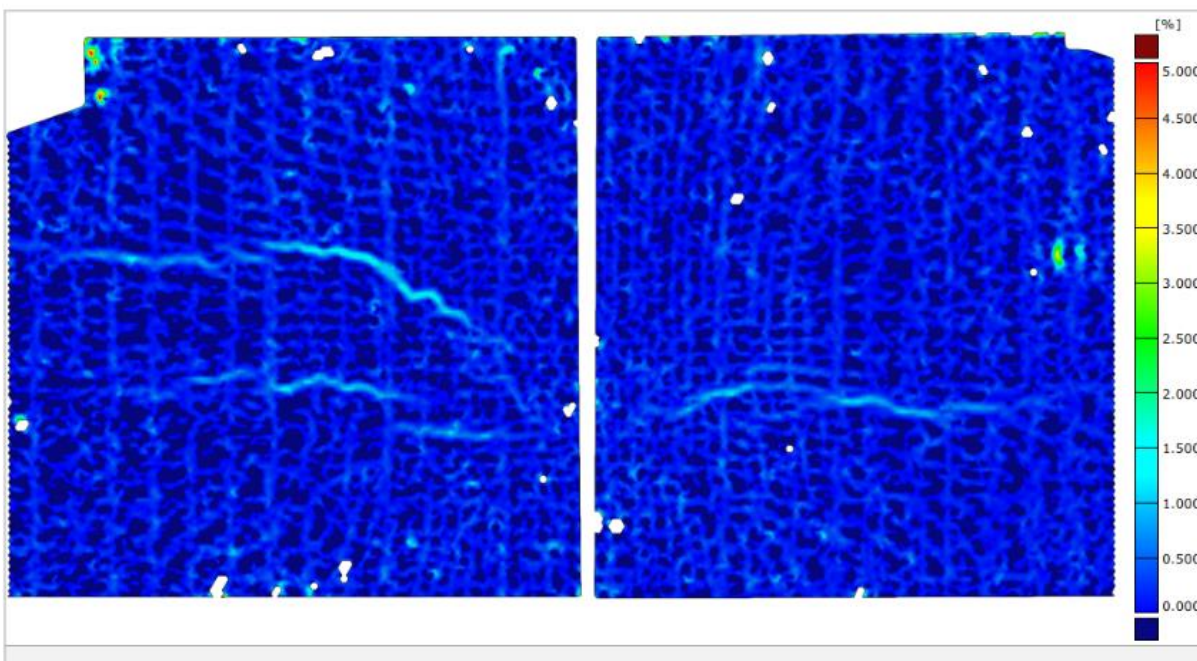


Abbildung D.12: Rissbild 7.300 kN aus Aramis, MT V02

11.200 kN

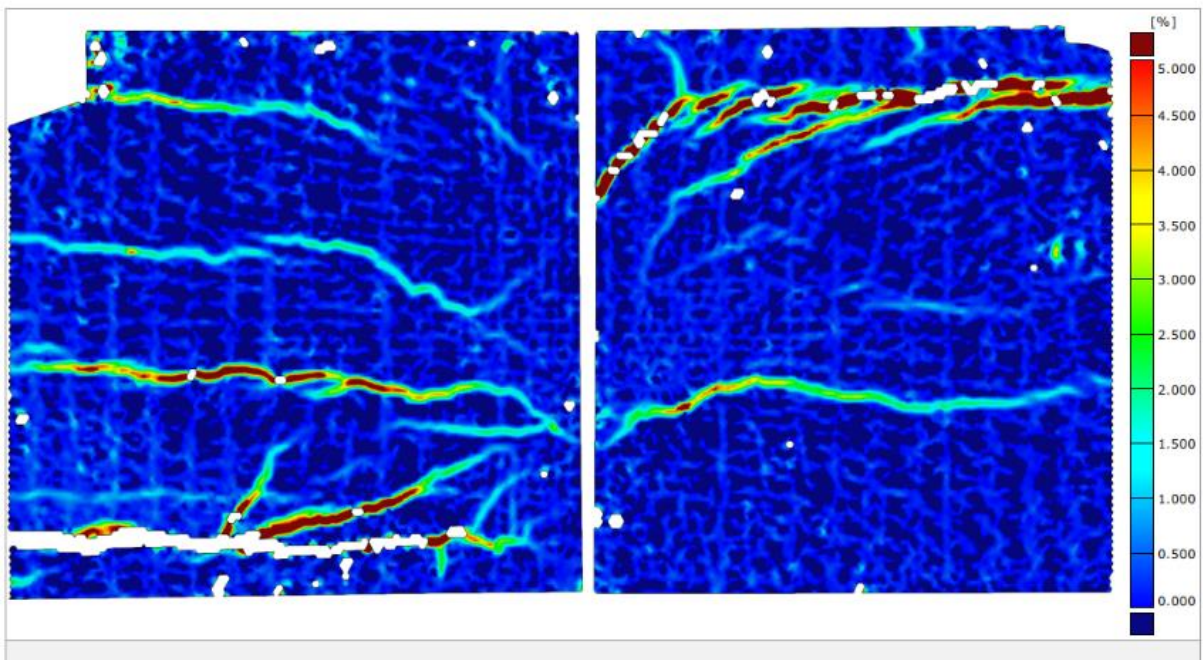


Abbildung D.13: Rissbild 11.200 kN aus Aramis, MT V02

14.404 kN - Höchstlast

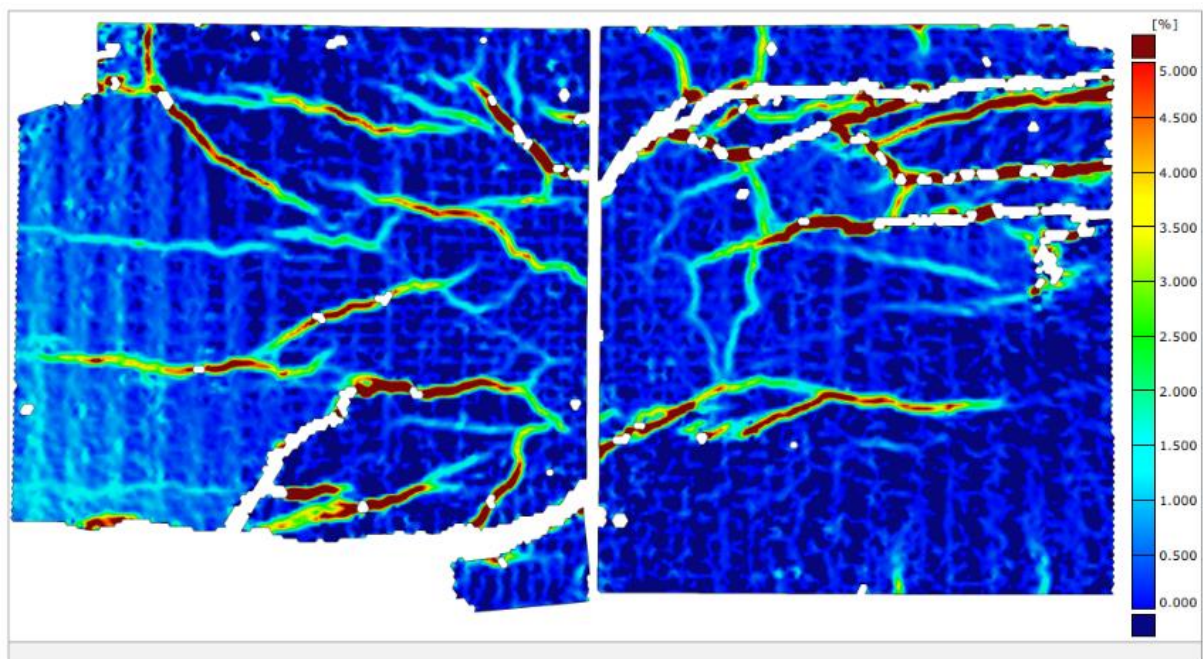
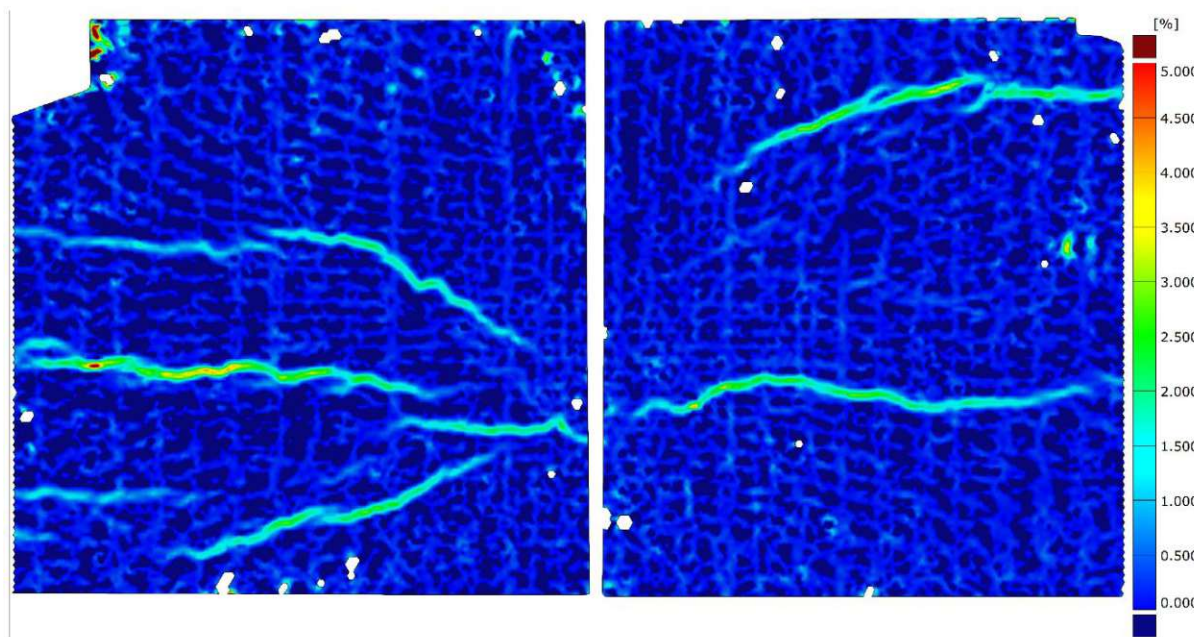


Abbildung D.14: Rissbild 14.404 kN – Höchstlast aus Aramis, MT V02

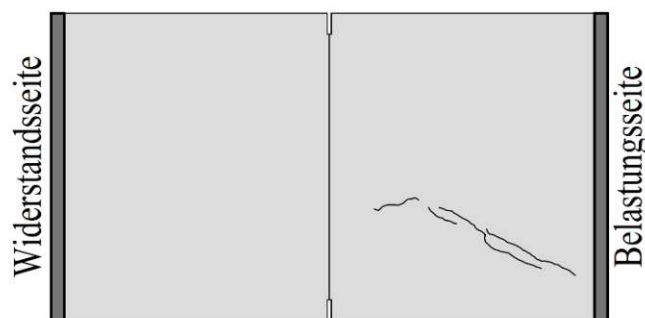
Rissbild bei SLS-Last 10.393 kN

Abbildung D.15: Rissbild bei  $F_{SLS}$  aus Aramis, MT V02

### D.2.3 Händische Rissaufzeichnung

Haltephase 4.450 kN

33,0% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



Haltephase 6.000 kN

44,6% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



Haltephase 7.300 kN

54,1% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



Haltephase 11.200 kN

83,2% der Bruchlast aus der Lastgeschichte

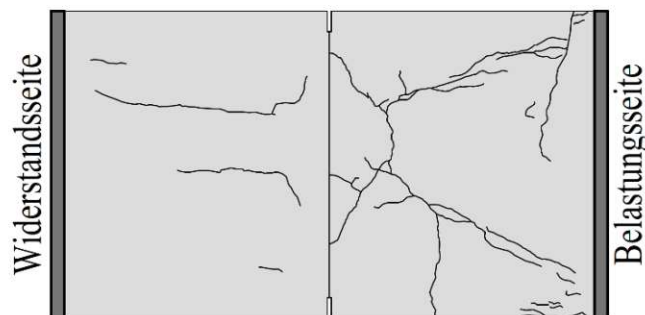
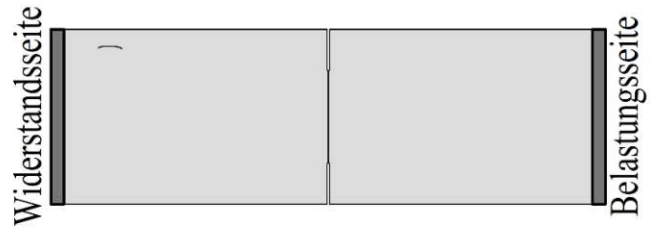


Abbildung D.16: Rissbild Untersicht, MT V02

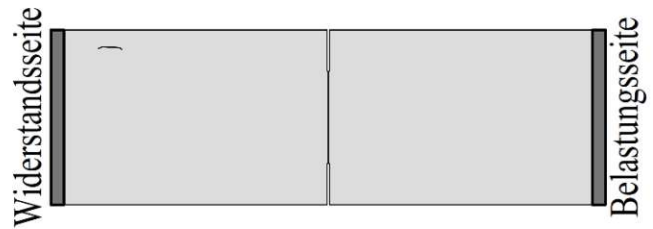
Haltephase 4.450 kN

33,0% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



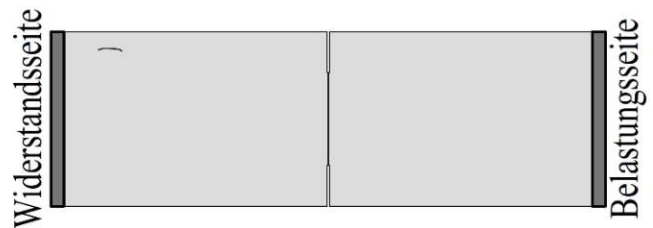
Haltephase 6.000 kN

44,6% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



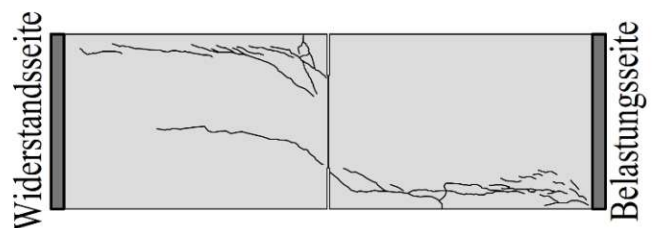
Haltephase 7.300 kN

54,1% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



Haltephase 11.200 kN

83,2% der Bruchlast aus der Lastgeschichte



Bruchlast 14.404 kN

106,6% der Bruchlast aus der Lastgeschichte

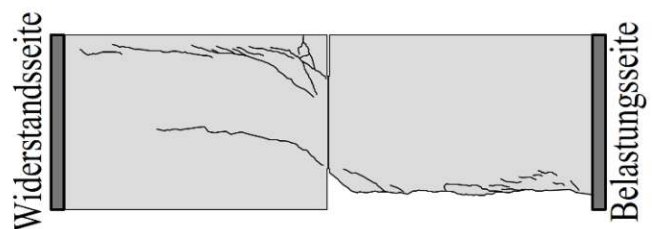


Abbildung D.17: Rissbild Seitenansicht, MT V02

### D.3. Vergleich Versuchsserien

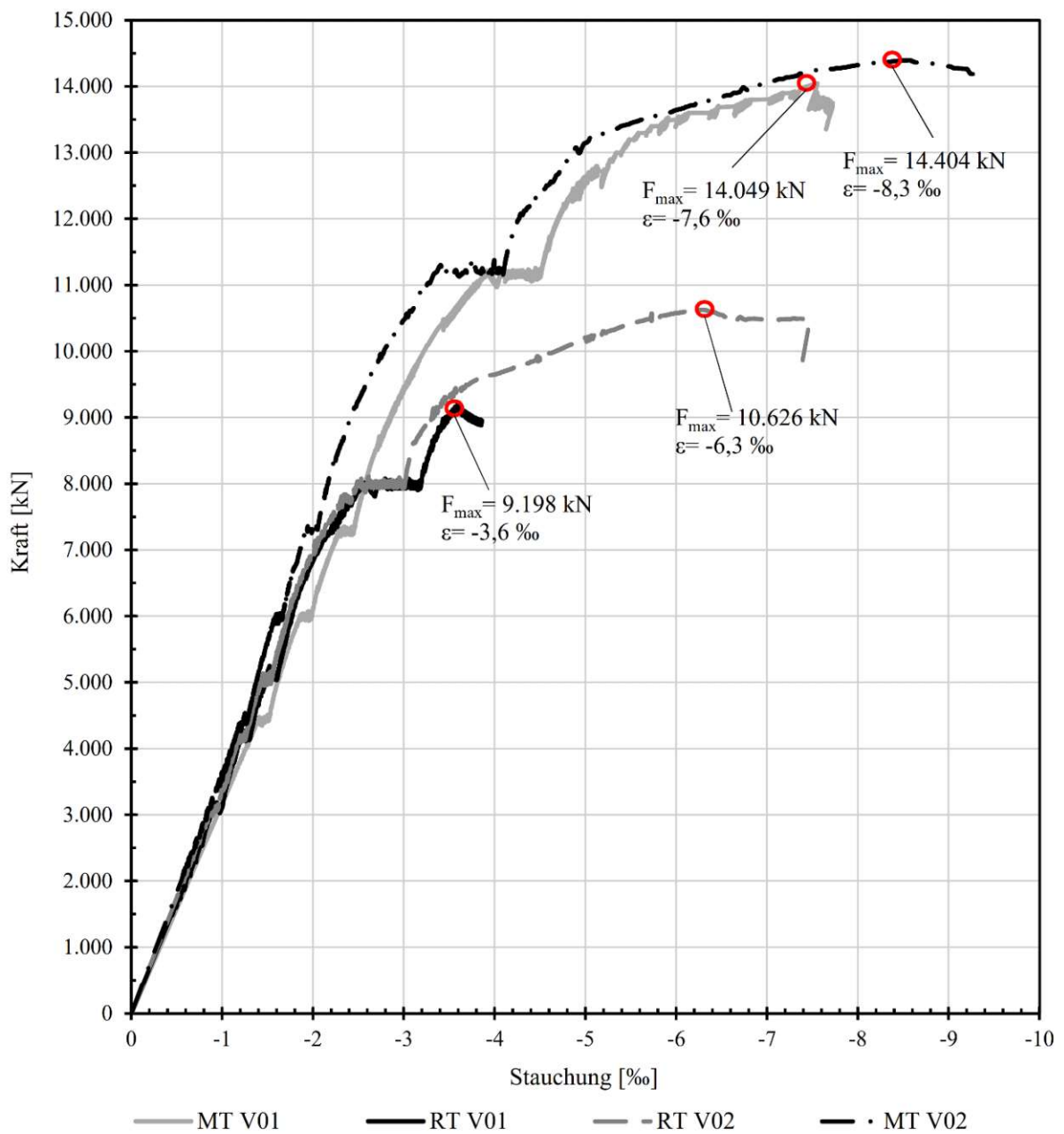


Abbildung D.18: Vergleich Versuchsserien



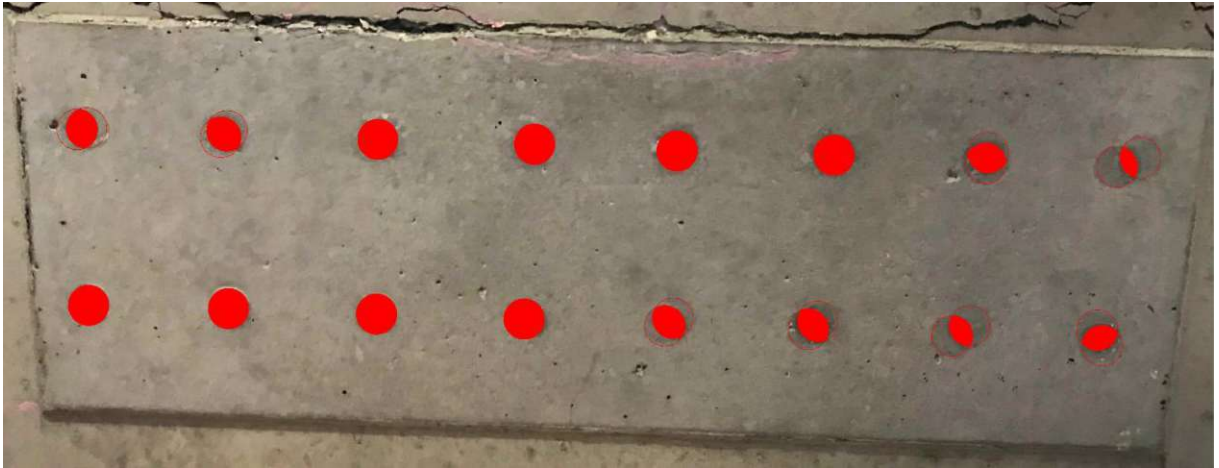


Abbildung D.19: Berührungsflächen Druckstäbe MT V01

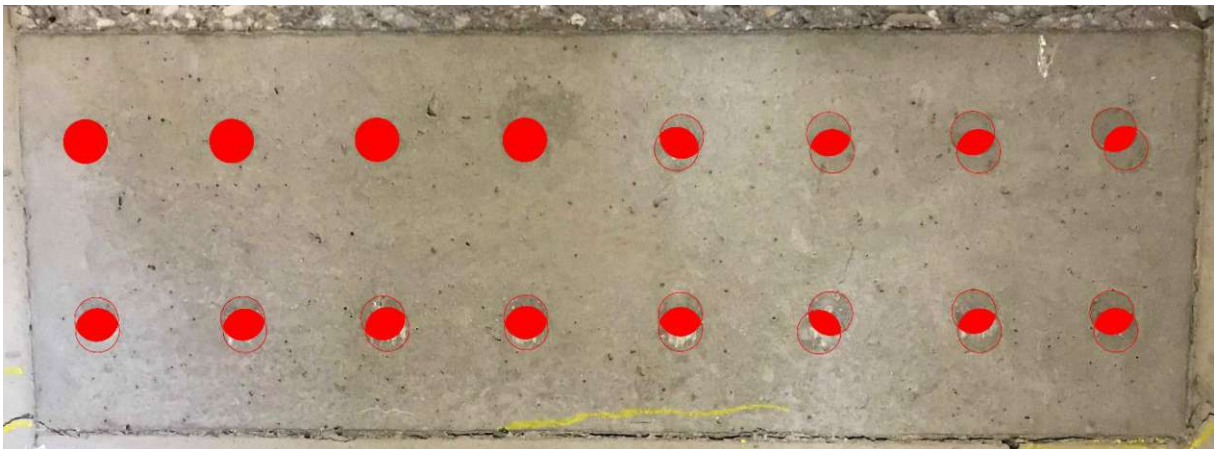


Abbildung D.20: Berührungsflächen Druckstäbe MT V02

# E. Ergebnisse Nachrechnung

## E.1. Berechnung EC 2, Abschnitt 6.7 [5, 6]

### Eingabewerte RT V01 und RT V02 (Alter: 11 Tage)

#### Abmessungen Tübbing

$$b = 70,0 \text{ cm}$$

$$d = 40,0 \text{ cm}$$

$$a_1 = 60,5 \text{ cm}$$

$$b_1 = 20,8 \text{ cm}$$

#### Materialkennwerte

$$f_{cm} = 51,43 \text{ N/mm}^2 = 5,143 \text{ kN/cm}^2$$

### Berechnung Traglast Tübbing RT

$$F_{Rm,EC2,6.7} = A_{c0} \times f_{cm} \times \sqrt{(A_{c1} / A_{c0})} \leq 3,0 \times f_{cm} \times A_{c0}$$

$$A_{c0} = b_1 \times a_1 = 1258,40 \text{ cm}^2$$

$$A_{c1} = b \times d = 2800,00 \text{ cm}^2$$

$$F_{Rm,EC2,6.7} = \min \begin{matrix} 1258,40 \text{ cm}^2 \times 5,13 \text{ kN/cm}^2 \times \sqrt{(2800 \text{ cm}^2 / 1258,40 \text{ cm}^2)} \\ 3,0 \times 5,13 \text{ kN/cm}^2 \times 1258,40 \text{ cm}^2 \end{matrix}$$

$$F_{Rm,EC2,6.7} = \min \begin{matrix} 9.653,9 \text{ kN} \\ 19.415,9 \text{ kN} \end{matrix}$$

$$F_{Rm,EC2,6.7} = \underline{\underline{9.653,9 \text{ kN}}}$$

### Ausnutzungsgrad Typ RT

$$F_{Bruchlast,RT V01} = \underline{\underline{9.198,0 \text{ kN}}}$$

$$F_{Bruchlast,RT V02} = \underline{\underline{10.626,0 \text{ kN}}}$$

$$\eta = \frac{F_{Bruchlast}}{F_{Rm,EC2,6.7}}$$

$$\eta_{RT V01} = \underline{\underline{0,95}}$$

$$\eta_{RT V02} = \underline{\underline{1,10}}$$

Abbildung E.1: Traglast nach EC [5, 6] Typ RT

## E.2. Berechnung SIA 262 Abschnitt 4.2.1.8 [12] mit Ergänzungen Kauf. und Querdruck

### Eingabewerte Tübbing MT V02

#### Abmessungen Tübbing

$$b = 70,0 \text{ cm}$$

$$A_{c1} = b \times d = 2800,00 \text{ cm}^2$$

$$d = 40,0 \text{ cm}$$

$$a_1 = 60,5 \text{ cm}$$

$$A_{c0} = b_1 \times a_1 = 1258,40 \text{ cm}^2$$

$$b_1 = 20,8 \text{ cm}$$

#### Betondeckung

$$c_{\text{nom},y} = 40,0 \text{ mm}$$

$$c_{\text{nom},z} = 15,0 \text{ mm}$$

$$c_{\text{nom},\text{Fuge}} = 48,4 \text{ mm}$$

#### Materialkennwerte

$$f_{\text{cm}} = 51,93 \text{ N/mm}^2 = 5,193 \text{ kN/cm}^2$$

$$\text{GK} = 16$$

#### Materialkennwerte B550 B

$$f_{y_k} = 550,0 \text{ N/mm}^2 = 55,00 \text{ kN/cm}^2$$

#### Materialkennwerte SAS670/800

$$f_{y_m, \text{SAS}} = 776,3 \text{ N/mm}^2 = 77,63 \text{ kN/cm}^2$$

$$\varnothing = 22 \text{ mm}$$

$$\text{Anzahl } n = 16$$

$$A_{sD} = 60,82 \text{ cm}^2$$

#### Bewehrungsführung Querrichtung - Tunnellängsrichtung

$$\varnothing = 16 \text{ mm}$$

$$\text{Anzahl } n = 9$$

$$A_{sy} = 18,10 \text{ cm}^2$$

#### Bewehrungsführung Längsrichtung - Tübbingdickenrichtung

$$\varnothing = 16 \text{ mm}$$

$$\text{Anzahl } n = 4$$

$$A_{sz} = 8,04 \text{ cm}^2$$

Abbildung E.2: Traglast nach Kapitel 2.3.4, Berechnung Teil 1/3

## Berechnung Traglast Tübbing MT

### Rechenwerte Bewehrungslage Querrichtung

$$\begin{array}{l}
 s_{cb,0} = 154,40 \text{ mm} \\
 s_{cb,1} = 88,5 \text{ mm} \\
 s_{cb,2} = 85 \text{ mm} \\
 2s'_{cb} = 208,20 \text{ mm} \\
 s'_{cb} = 104,10 \text{ mm} \\
 a_c = 615,75 \text{ mm}
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} s_{cb,0} \\ s_{cb,1} \\ s_{cb,2} \\ 2s'_{cb} \\ s'_{cb} \\ a_c \end{array}} \right\} \text{Abstände können Abbildung} \\
 \text{2.10 entnommen werden}$$

### Rechenwerte Bewehrungslage Längsrichtung

$$\begin{array}{l}
 s_{ca,0} = 116,00 \text{ mm} \\
 s_{ca,1} = 88,5 \text{ mm} \\
 s_{ca,2} = 85 \text{ mm} \\
 2s'_{ca} = 189,00 \text{ mm} \\
 s'_{ca} = 94,50 \text{ mm} \\
 b_c = 267,75 \text{ mm}
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} s_{ca,0} \\ s_{ca,1} \\ s_{ca,2} \\ 2s'_{ca} \\ s'_{ca} \\ b_c \end{array}} \right\} \text{Abstände können Abbildung} \\
 \text{2.10 entnommen werden}$$

### Fallunterscheidung wirksam umschnürte Fläche

$$v_y \text{ min} = \begin{cases} 1,0 \\ (b_c - s'_{cb}) / b_1 = 0,787 \end{cases}$$

$$v_z \text{ min} = \begin{cases} 1,0 \\ (a_c - s'_{ca}) / a_1 = 0,862 \end{cases}$$

### Erhöhungsfaktor Umschnürungswirkung

$$\omega_c = \min \begin{cases} \omega_y = (A_{sy} \times f_{yk}) / (a_c \times s'_{cb} \times f_{cm}) \\ \omega_z = (A_{sz} \times f_{yk}) / (b_c \times s'_{ca} \times f_{cm}) \end{cases}$$

$$\omega_c = \min \begin{cases} 0,2990 \\ 0,3366 \end{cases}$$

$$\omega_c = 0,2990$$

### Manteldruck nach SIA 262

$$\sigma_1 = -\omega_c \times f_{cm} \times v_y \times v_z$$

$$\sigma_1 = -10,53 \text{ N/mm}^2$$

Abbildung E.3: Traglast nach Kapitel 2.3.4, Berechnung Teil 2/3

**Traganteil Beton mit Umschnürungsbewehrung (=Leiterbewehrung)**

$$F_{Rm,SIA,Kauf,c} = (f_{cm} + 4 \times \omega_c \times f_{cm} \times v_z \times v_y) \times a_1 \times b_1$$

$$F_{Rm,SIA,Kauf,c} = 11.832,7 \text{ kN}$$

**Traganteil Druckstäbe**

$$F_{Rm,s} = A_s \times f_{ym,SAS} = 60,82 \text{ cm}^2 \times 77,63 \text{ kN/cm}^2 = 4.721,8 \text{ kN}$$

**Traglast Beton mit Umschnürungsbewehrung und Druckstäbe**

$$F_{Rm,SIA,Kauf.} = F_{Rm,SIA,Kauf,c} + F_{Rm,s}$$

$$F_{Rm,SIA,Kauf.} = \underline{\underline{16.554,5 \text{ kN}}}$$

**Ausnutzungsgrad Typ MT V02**

$$F_{Bruchlast,MT V02} = \underline{\underline{14.404,0 \text{ kN}}}$$

$$\eta = \frac{F_{Bruchlast}}{F_{Rm,SIA,Kauf.}} \qquad \eta_{MT V02} = \underline{\underline{0,87}}$$

Abbildung E.4: Traglast nach Kapitel 2.3.4, Berechnung Teil 3/3

### E.3. Berechnung EC 2 [5, 6] mit Ergänzungen Kauf. und Querdruck

#### Eingabewerte Tübbinge MT V02

##### Abmessungen Tübbing

$$b = 70,0 \text{ cm}$$

$$A_{c1} = b \times d = 2800,00 \text{ cm}^2$$

$$d = 40,0 \text{ cm}$$

$$a_1 = 60,5 \text{ cm}$$

$$A_{c0} = b_1 \times a_1 = 1258,40 \text{ cm}^2$$

$$b_1 = 20,8 \text{ cm}$$

##### Betondeckung

$$c_{\text{nom,y}} = 40,0 \text{ mm}$$

$$c_{\text{nom,z}} = 15,0 \text{ mm}$$

$$c_{\text{nom,Fuge}} = 48,4 \text{ mm}$$

##### Materialkennwerte

$$f_{\text{cm}} = 51,93 \text{ N/mm}^2 = 5,193 \text{ kN/cm}^2$$

$$\text{GK} = 16$$

##### Materialkennwerte B550 B

$$f_{\text{yk}} = 550,0 \text{ N/mm}^2 = 55,00 \text{ kN/cm}^2$$

##### Materialkennwerte SAS670/800

$$f_{\text{ym,SAS}} = 776,3 \text{ N/mm}^2 = 77,63 \text{ kN/cm}^2$$

$$\text{Ø} = 22 \text{ mm}$$

$$\text{Anzahl } n = 16$$

$$A_{\text{sD}} = 60,82 \text{ cm}^2$$

##### Bewehrungsführung Querrichtung - Tunnellängsrichtung

$$\text{Ø} = 16 \text{ mm}$$

$$\text{Anzahl } n = 9$$

$$A_{\text{sy}} = 18,10 \text{ cm}^2$$

##### Bewehrungsführung Längsrichtung - Tübbingdickenrichtung

$$\text{Ø} = 16 \text{ mm}$$

$$\text{Anzahl } n = 4$$

$$A_{\text{sz}} = 8,04 \text{ cm}^2$$

**Abbildung E.5:** Traglast nach Kapitel 2.3.5, Berechnung Teil 1/3

## Berechnung Traglast Tübbing MT

### Rechenwerte Bewehrungslage Querrichtung

$$\begin{array}{l}
 s_{cb,0} = 154,40 \text{ mm} \\
 s_{cb,1} = 89 \text{ mm} \\
 s_{cb,2} = 90 \text{ mm} \\
 2s'_{cb} = 210,70 \text{ mm} \\
 s'_{cb} = 105,35 \text{ mm} \\
 a_c = 615,75 \text{ mm}
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} s_{cb,0} \\ s_{cb,1} \\ s_{cb,2} \\ 2s'_{cb} \\ s'_{cb} \\ a_c \end{array}} \right\} \begin{array}{l} \text{Abstände können Abbildung} \\ \text{2.8 entnommen werden} \end{array}$$

### Rechenwerte Bewehrungslage Längsrichtung

$$\begin{array}{l}
 s_{ca,0} = 116,00 \text{ mm} \\
 s_{ca,1} = 89 \text{ mm} \\
 s_{ca,2} = 90 \text{ mm} \\
 2s'_{ca} = 191,50 \text{ mm} \\
 s'_{ca} = 95,75 \text{ mm} \\
 b_c = 267,75 \text{ mm}
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} s_{ca,0} \\ s_{ca,1} \\ s_{ca,2} \\ 2s'_{ca} \\ s'_{ca} \\ b_c \end{array}} \right\} \begin{array}{l} \text{Abstände können Abbildung} \\ \text{2.8 entnommen werden} \end{array}$$

### Fallunterscheidung wirksam umschnürte Fläche

$$v_y \text{ min} = \begin{cases} 1,0 \\ (b_c - s'_{cb}) / b_1 = 0,781 \end{cases}$$

$$v_z \text{ min} = \begin{cases} 1,0 \\ (a_c - s'_{ca}) / a_1 = 0,860 \end{cases}$$

### Erhöhungsfaktor Umschnürungswirkung

$$\omega_c = \min \begin{cases} \omega_y = (A_{sy} \times f_{yk}) / (a_c \times s'_{cb} \times f_{cm}) \\ \omega_z = (A_{sz} \times f_{yk}) / (b_c \times s'_{ca} \times f_{cm}) \end{cases}$$

$$\omega_c = \min \begin{cases} 0,2954 \\ 0,3323 \end{cases}$$

$$\omega_c = 0,2954$$

**Abbildung E.6:** Traglast nach Kapitel 2.3.5, Berechnung Teil 2/3

**Manteldruck nach SIA 262**

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= -\omega_c \times f_{cm} \\ \sigma_1 &= -15,34 \text{ N/mm}^2 \\ \sigma_2 &= 15,34 \text{ N/mm}^2 = \text{Querdruck}\end{aligned}$$

**Erhöhung Betondruckfestigkeit unter mehraxialer Druckbeanspruchung**

$$\begin{aligned}f_{cm,c} &= f_{cm} \times (1,125 + 2,5 \times (\sigma_2/f_{cm})) \\ \sigma_2 &> 0,05 \times f_{cm} = 2,60 \text{ cm}^2 \\ f_{cm,c} &= 96,78 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

$$f_{cm,c} = \min \begin{cases} 4,0 \times f_{cm} = 207,7 \text{ N/mm}^2 \\ f_{cm,c} \end{cases}$$

$$f_{cm,c} = 96,78 \text{ N/mm}^2$$

**Traganteil Beton mit Umschnürungsbewehrung (=Leiterbewehrung)**

$$\begin{aligned}F_{Rm,EC2,Kauf.,c} &= f_{cm} \times (a_1 \times b_1 - A_{c,3d}) + f_{cm,c} \times A_{c,3D} \\ A_{c,3D} &= A_{c0} \times v_y \times v_z = 844,48 \text{ cm}^2\end{aligned}$$

$$F_{Rm,EC2,Kauf.,c} = 10.322,2 \text{ kN}$$

**Traganteil Druckstäbe**

$$F_{Rm,s} = A_s \times f_{ym,SAS} = 60,82 \text{ cm}^2 \times 77,63 \text{ kN/cm}^2 = 4.721,6 \text{ kN}$$

**Traglast Beton mit Umschnürungsbewehrung und Druckstäbe**

$$F_{Rm,EC2,Kauf.} = F_{Rm,EC2,Kauf.,c} + F_{Rm,s}$$

$$F_{Rm,EC2,Kauf.} = \underline{\underline{15.043,7 \text{ kN}}}$$

**Ausnutzungsgrad Typ MT V02**

$$F_{Bruchlast,MT V02} = \underline{\underline{14.404,0 \text{ kN}}}$$

$$\eta = \frac{F_{Bruchlast}}{F_{Rm,EC2,Kauf.}} \quad \eta_{MT V02} = \underline{\underline{0,96}}$$

**Abbildung E.7:** Traglast nach Kapitel 2.3.5, Berechnung Teil 3/3



## E.4. Berechnung SIA 262 4.2.1.8 [12] mit Ergänzungen Kauf.-Kol. und Querdruck

### Eingabewerte Tübbing MT V02

#### Abmessungen Tübbing

$$b = 70,0 \text{ cm}$$

$$A_{c1} = b \times d = 2800,00 \text{ cm}^2$$

$$d = 40,0 \text{ cm}$$

$$a_1 = 60,5 \text{ cm}$$

$$A_{c0} = b_1 \times a_1 = 1258,40 \text{ cm}^2$$

$$b_1 = 20,8 \text{ cm}$$

#### Betondeckung

$$c_{\text{nom},y} = 40,0 \text{ mm}$$

$$c_{\text{nom},z} = 15,0 \text{ mm}$$

$$c_{\text{nom},\text{Fuge}} = 48,4 \text{ mm}$$

#### Materialkennwerte

$$f_{\text{cm}} = 51,93 \text{ N/mm}^2 = 5,193 \text{ kN/cm}^2$$

$$\text{GK} = 16$$

#### Materialkennwerte B550 B

$$f_{y_k} = 550,0 \text{ N/mm}^2 = 55,00 \text{ kN/cm}^2$$

#### Materialkennwerte SAS670/800

$$f_{y_m, \text{SAS}} = 776,3 \text{ N/mm}^2 = 77,63 \text{ kN/cm}^2$$

$$\varnothing = 22 \text{ mm}$$

$$\text{Anzahl } n = 16$$

$$A_{sD} = 60,82 \text{ cm}^2$$

#### Bewehrungsführung Querrichtung - Tunnellängsrichtung

$$\varnothing = 16 \text{ mm}$$

$$\text{Anzahl } n = 9$$

$$A_{sy} = 18,10 \text{ cm}^2$$

#### Bewehrungsführung Längsrichtung - Tübbingdickenrichtung

$$\varnothing = 16 \text{ mm}$$

$$\text{Anzahl } n = 4$$

$$A_{sz} = 8,04 \text{ cm}^2$$

Abbildung E.8: Traglast nach Kapitel 2.3.6, Berechnung Teil 1/3

## Berechnung Traglast Tübbing MT

### Rechenwerte Bewehrungslage Querrichtung

$$\left. \begin{array}{l} s_{cb,0} = 154,40 \text{ mm} \\ s_{cb,1} = 88,5 \text{ mm} \\ \underline{s'}_{cb} = 132,43 \text{ mm} \\ a_c = 615,75 \text{ mm} \end{array} \right\} \text{Abstände können Abbildung} \\ \text{2.10 entnommen werden}$$

### Rechenwerte Bewehrungslage Längsrichtung

$$\left. \begin{array}{l} s_{ca,0} = 116,00 \text{ mm} \\ s_{ca,1} = 88,5 \text{ mm} \\ \underline{s'}_{ca} = 106,83 \text{ mm} \\ b_c = 267,75 \text{ mm} \end{array} \right\} \text{Abstände können Abbildung} \\ \text{2.10 entnommen werden}$$

Fallunterscheidung wirksam umschnürte Fläche

$$v_y \text{ min} = \begin{cases} 1,0 \\ (b_c - \underline{s'}_{cb}) / b_1 = 0,651 \end{cases}$$

$$v_z \text{ min} = \begin{cases} 1,0 \\ (a_c - \underline{s'}_{ca}) / a_1 = 0,841 \end{cases}$$

### Erhöhungsfaktor Umschnürungswirkung

$$\omega_c = \min \begin{cases} \omega_y = (A_{sy} \times f_{yk}) / (a_c \times \underline{s'}_{cb} \times f_{cm}) \\ \omega_z = (A_{sz} \times f_{yk}) / (b_c \times \underline{s'}_{ca} \times f_{cm}) \end{cases}$$

$$\omega_c = \min \begin{cases} 0,2350 \\ 0,2978 \end{cases}$$

$$\omega_c = 0,2350$$

### Manteldruck nach SIA 262

$$\sigma_1 = -\omega_c \times f_{cm} \times v_y \times v_z$$

$$\sigma_1 = -6,68 \text{ N/mm}^2$$

Abbildung E.9: Traglast nach Kapitel 2.3.6, Berechnung Teil 2/3

**Traganteil Beton mit Umschnürungsbewehrung (=Leiterbewehrung)**

$$F_{Rm,SIA,Kauf.+Kol.,c} = (f_{cm} + 4 \times \omega_c \times f_{cm} \times v_z \times v_y) \times a_1 \times b_1$$

$$F_{Rm,SIA,Kauf.+Kol.,c} = 9.896,8 \text{ kN}$$

**Traganteil Druckstäbe**

$$F_{Rm,s} = A_s \times f_{ym,SAS} = 60,82 \text{ cm}^2 \times 77,63 \text{ kN/cm}^2 = 4.721,6 \text{ kN}$$

**Traglast Beton mit Umschnürungsbewehrung und Druckstäbe**

$$F_{Rm,SIA,Kauf.+Kol.} = F_{Rm,SIA,Kauf.+Kol.,c} + F_{Rm,s}$$

$$F_{Rm,SIA,Kauf.+Kol.} = \underline{\underline{14.618,4 \text{ kN}}}$$

**Ausnutzungsgrad Typ MT V02**

$$F_{\text{Bruchlast,MT V02}} = \underline{\underline{14.404,0 \text{ kN}}}$$

$$\eta = \frac{F_{\text{Bruchlast}}}{F_{Rm,SIA,Kauf.+Kol.}} \qquad \eta_{\text{MT V02}} = \underline{\underline{0,99}}$$

Abbildung E.10: Traglast nach Kapitel 2.3.6, Berechnung Teil 3/3

## E.5. Berechnung EC 2 [5, 6] mit Ergänzungen Kauf.-Kol. und Querdruck

### Eingabewerte Tübbing MT V01

#### Abmessungen Tübbing

$$b = 70,0 \text{ cm}$$

$$A_{c1} = b \times d = 2800,00 \text{ cm}^2$$

$$d = 40,0 \text{ cm}$$

$$a_1 = 60,5 \text{ cm}$$

$$A_{c0} = b_1 \times a_1 = 1258,40 \text{ cm}^2$$

$$b_1 = 20,8 \text{ cm}$$

#### Betondeckung

$$c_{\text{nom},y} = 40,0 \text{ mm}$$

$$c_{\text{nom},z} = 15,0 \text{ mm}$$

$$c_{\text{nom},\text{Fuge}} = 48,4 \text{ mm}$$

#### Materialkennwerte

$$f_{\text{cm}} = 51,93 \text{ N/mm}^2 = 5,193 \text{ kN/cm}^2$$

$$\text{GK} = 16$$

#### Materialkennwerte B550 B

$$f_{\text{yk}} = 550,0 \text{ N/mm}^2 = 55,00 \text{ kN/cm}^2$$

#### Materialkennwerte SAS670/800

$$f_{\text{ym},\text{SAS}} = 776,3 \text{ N/mm}^2 = 77,63 \text{ kN/cm}^2$$

$$\varnothing = 22 \text{ mm}$$

$$\text{Anzahl } n = 16$$

$$A_{\text{sD}} = 60,82 \text{ cm}^2$$

#### Bewehrungsführung Querrichtung - Tunnellängsrichtung

$$\varnothing = 16 \text{ mm}$$

$$\text{Anzahl } n = 9$$

$$A_{\text{sy}} = 18,10 \text{ cm}^2$$

#### Bewehrungsführung Längsrichtung - Tübbingdickenrichtung

$$\varnothing = 16 \text{ mm}$$

$$\text{Anzahl } n = 4$$

$$A_{\text{sz}} = 8,04 \text{ cm}^2$$

Abbildung E.11: Traglast nach Kapitel 2.3.7, Berechnung Teil 1/3

## Berechnung Traglast Tübbing MT

### Rechenwerte Bewehrungslage Querrichtung

$$\left. \begin{array}{l} s_{cb,0} = 154,40 \text{ mm} \\ s_{cb,1} = 89 \text{ mm} \\ \underline{s}'_{cb} = 132,43 \text{ mm} \\ a_c = 615,75 \text{ mm} \end{array} \right\} \text{Abstände können Abbildung} \\ \text{2.12 entnommen werden}$$

### Rechenwerte Bewehrungslage Längsrichtung

$$\left. \begin{array}{l} s_{ca,0} = 116,00 \text{ mm} \\ s_{ca,1} = 89 \text{ mm} \\ \underline{s}'_{ca} = 106,83 \text{ mm} \\ b_c = 267,75 \text{ mm} \end{array} \right\} \text{Abstände können Abbildung} \\ \text{2.12 entnommen werden}$$

Fallunterscheidung wirksam umschnürte Fläche

$$v_y \text{ min} = \begin{cases} 1,0 \\ (b_c - \underline{s}'_{cb}) / b_1 = 0,651 \end{cases}$$

$$v_z \text{ min} = \begin{cases} 1,0 \\ (a_c - \underline{s}'_{ca}) / a_1 = 0,841 \end{cases}$$

### Erhöhungsfaktor Umschnürungswirkung

$$\omega_c = \min \begin{cases} \omega_y = (A_{sy} \times f_{yk}) / (a_c \times \underline{s}'_{cb} \times f_{cm}) \\ \omega_z = (A_{sz} \times f_{yk}) / (b_c \times \underline{s}'_{ca} \times f_{cm}) \end{cases}$$

$$\omega_c = \min \begin{cases} 0,2350 \\ 0,2978 \end{cases}$$

$$\omega_c = 0,2350$$

### Manteldruck nach SIA 262

$$\sigma_1 = -\omega_c \times f_{cm}$$

$$\sigma_1 = -12,20 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_2 = 12,20 \text{ N/mm}^2 = \text{Querdruck}$$

**Abbildung E.12:** Traglast nach Kapitel 2.3.7, Berechnung Teil 2/3

**Erhöhung Betondruckfestigkeit unter mehraxialer Druckbeanspruchung**

$$f_{cm,c} = f_{cm} \times (1,125 + 2,5 \times (\sigma_2/f_{cm}))$$

$$\sigma_2 > 0,05 \times f_{cm} = 2,60 \text{ cm}^2$$

$$f_{cm,c} = 88,93 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{cm,c} = \min \begin{cases} 4,0 \times f_{cm} = 207,7 \text{ N/mm}^2 \\ f_{cm,c} \end{cases}$$

$$f_{cm,c} = 88,93 \text{ N/mm}^2$$

**Traganteil Beton mit Umschnürungsbewehrung (=Leiterbewehrung)**

$$F_{Rm,EC2,Kauf.+Kol.,c} = f_{cm} \times (a_1 \times b_1 - A_{c,3d}) + f_{cm,c} \times A_{c,3D}$$

$$A_{c,3D} = A_{c0} \times v_y \times v_z = 688,65 \text{ cm}^2$$

$$F_{Rm,EC2,Kauf.+Kol.,c} = 9.083,1 \text{ kN}$$

**Traganteil Druckstäbe**

$$F_{Rm,s} = A_s \times f_{ym,SAS} = 60,82 \text{ cm}^2 \times 77,63 \text{ kN/cm}^2 = 4.721,6 \text{ kN}$$

**Traglast Beton mit Umschnürungsbewehrung und Druckstäbe**

$$F_{Rm,EC2,Kauf.+Kol.} = F_{Rm,EC2,Kauf.+Kol.,c} + F_{Rm,s}$$

$$F_{Rm,EC2,Kauf.+Kol.} = \underline{\underline{13.804,7 \text{ kN}}}$$

**Ausnutzungsgrad Typ MT V02**

$$F_{Bruchlast,MT V02} = \underline{\underline{14.404,0 \text{ kN}}}$$

$$\eta = \frac{F_{Bruchlast}}{F_{Rm,EC2,Kauf.+Kol.}} \quad \eta_{MT V02} = \underline{\underline{1,04}}$$

Abbildung E.13: Traglast nach Kapitel 2.3.7, Berechnung Teil 3/3

## E.6. Berechnung laut Schmidt-Thrö et al. [20]

### Eingabewerte RT V01 und RT V02 (Alter: 11 Tage)

#### Abmessungen Tübbing

$$b = 70,0 \text{ cm}$$

$$d = 40,0 \text{ cm}$$

$$a_1 = 60,5 \text{ cm}$$

$$b_1 = 20,8 \text{ cm}$$

#### Materialkennwerte

$$f_{cm} = 51,43 \text{ N/mm}^2 = 5,143 \text{ kN/cm}^2$$

### Berechnung Traglast Tübbing RT

$$F_{Rm,[20]} = A_{c0} \times f_{cm} \times (1 + 0,65 \times \Delta_{quad})$$

$$A_{c0} = b_1 \times a_1 = 1258,40 \text{ cm}^2$$

$$A_{c1} = b \times d = 2800,00 \text{ cm}^2$$

$$\Delta_{quad} = (\sqrt{A_{c1} / A_{c0}} - 1) = 0,492$$

$$F_{Rm,[20]} = \underline{\underline{8.540,2 \text{ kN}}}$$

### Ausnutzungsgrad Typ RT

$$F_{Bruchlast,RT V01} = \underline{\underline{9.198,0 \text{ kN}}}$$

$$F_{Bruchlast,RT V02} = \underline{\underline{10.626,0 \text{ kN}}}$$

$$\eta = \frac{F_{Bruchlast}}{F_{Rm,[20]}}$$

$$\eta_{RT V01} = \underline{\underline{1,08}}$$

$$\eta_{RT V02} = \underline{\underline{1,24}}$$

Abbildung E.14: Traglast nach Kapitel 2.3.8