Dipl.-Ing. Robert Staudacher

Anschlüsse für Arbeitsfugen bei Spritzbetonauskleidungen

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Geotechnik und Wasserbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Wulf Schubert

Institut für Felsmechanik und Tunnelbau

Technische Universität Graz

Dipl.-Ing. Michael Henzinger

Institut für Felsmechanik und Tunnelbau

Technische Universität Graz

Graz, November 2016

Eidesstattliche Erklärung

Affidavit

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Gleichheitsgrundsatz

Aus Gründen der Lesbarkeit wurde in dieser Arbeit darauf verzichtet, geschlechtsspezifische Formulierungen zu verwenden. Jedoch möchte ich ausdrücklich festhalten, dass die bei Personen verwendeten maskulinen Formen für beide Geschlechter zu verstehen sind.

Danksagung

Ein großer Dank gilt Prof. Schubert, der in mir das Interesse am Tunnelbau geweckt hat und jederzeit für Fragen sowie mit guten Ratschlägen zur Verfügung stand.

Besonderer Dank gilt auch Hr. Sellner, der es mir ermöglichte eine derart praxisbezogene Arbeit zu schreiben und sich auch an stressigen Tagen viel Zeit für mich genommen hat.

Bei Michael Henzinger bedanke ich mich für die gute Betreuung und Korrektur meiner Arbeit. Für die Vorbereitung und Durchführung der Versuche, sowie die lustigen und abwechslungsreichen Stunden im Labor möchte ich mich bei Manfred Blümel und Anton Kaufmann bedanken. Bedanken möchte ich mich auch bei meinen „Kammerlkollegen“, allen voran bei Elli, die so einige Späße ertragen musste.

Ein großer Dank gilt all meinen Freunden und Kollegen aus dem Zeichensaal, mit denen ich unglaublich viel Spaß und so manchen Unsinn während meiner Studienzeit erleben durfte. Leider hat alles mal ein Ende, in diesem Sinne: „Den Letzten beißt der Hamster.“

Mein größter Dank gilt allerdings meiner Familie, vor allem euch, Mama und Papa. Es ist nicht selbstverständlich in so einem Umfeld und mit so unglaublich viel Unterstützung und Geborgenheit aufwachsen zu dürfen. DANKE! Gleiches gilt auch für meine Schwestern, die mich stets unterstützen, auch wenn häufig über längere Zeit kein Lebenszeichen meinerseits abgegeben wird. Zum Schluss möchte ich mich bei meiner Freundin Magdalena bedanken. Ich bin glücklich, dass ich einen Menschen wie dich kennen und lieben lernen durfte.

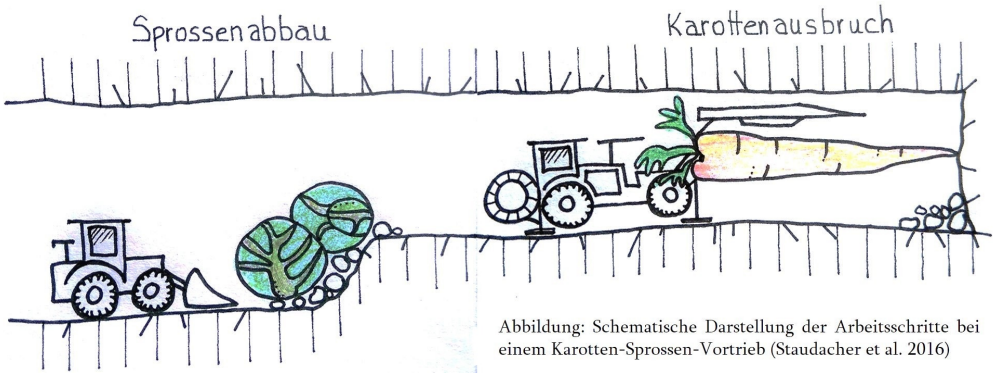


Abbildung: Schematische Darstellung der Arbeitsschritte bei einem Karotten-Sprossen-Vortrieb (Staudacher et al. 2016)

Abstract

This master thesis deals with connecting shotcrete linings in conventional tunnelling. It is necessary to provide a force-fitting connection between the shotcrete linings of different working steps, if a full-face excavation is not possible due to the actual rock mass conditions. Current designs are often inefficient as well as costly and time-consuming when it comes to design and handling. Therefore, an optimized connecting element should be developed to solve this problem.

Based on a variant study, an element has been developed, which satisfies the requirements of tunnelling regarding static-, constructional- and economic aspects. The element was particularly developed for a top heading excavation, whereby, with some minor adjustments, it is applicable to other types of sequential excavation.

By means of simple laboratory tests, the maximum transmittable shear force as well as the characteristics of detaching concrete from expanded metal has been investigated to confirm the elements feasibility.

The developed prototype has subsequently been installed at the „Tunnelkette St. Kanzian“ (part of the high-performance railway line Graz-Klagenfurt) and tested for its suitability in construction site operation. Further optimizations regarding installation and handling were carried out. Hence it can be noted that the connecting element is very suitable for top heading excavation, further adaptations are necessary by presence of a temporary invert. Beside the enhanced static effectiveness, the newly developed element offers time- and cost-advantages compared to currently used designs.

Kurzfassung

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit dem Thema der Verbindung von Spritzbetonschalen im Tunnelbau mit zyklischem Vortrieb. Ist aufgrund gegebener Gebirgsverhältnisse kein Vollausbruch möglich, wird es notwendig die Spritzbetonschalen der unterschiedlichen Arbeitsschritte kraftschlüssig miteinander zu verbinden. Da derzeit gängige Ausführungen oft ineffizient sowie kosten- und zeitintensiv in Einbau/Handhabung sind, sollte ein optimiertes Anschlusselement entwickelt werden, welches diese Problematik bestmöglich löst.

Basierend auf einer Variantenstudie wurde ein Element aus Streckmetall entwickelt, welches den Ansprüchen hinsichtlich statischer, baubetrieblicher und bauwirtschaftlicher Belange des Tunnelbaus Genüge tut. Im Speziellen wurde dabei auf ein Kalotten-Strossen-Anschlussdetail eingegangen, wobei dieses mit gewissen Adaptierungen auch auf andere Arten des Teilausbruchs anwendbar sein sollte.

Anhand von Laborversuchen sollte die maximal übertragbare Querkraft, sowie die Lösbarkeit zwischen Beton und Streckmetall untersucht werden, um damit die Eignung des Anschlusselements zu bestätigen.

Der entwickelte Prototyp wurde anschließend an der „Tunnelkette St. Kanzian“ (Teil der Hochleistungsstrecke Graz-Klagenfurt) eingebaut und auf die Baustellentauglichkeit getestet. Dabei wurden weitere Optimierungen hinsichtlich des Einbaus und der Handhabung durchgeführt. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich das einwickelte Element sehr gut für das Anschlussdetail eines Kalotten-Strossen Vortriebs eignet, beim Einbau einer Kalottensohle sind weitere Adaptierungen notwendig. Durch die Verwendung können, neben den Vorteilen in Bezug auf die statische Wirksamkeit, vor allem Zeit und Kosten gespart werden.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

1.1 Allgemein 1

1.2 Problemstellung 2

2 Stand der Technik **7**

2.1 Allgemein 7

2.2 Lösungen im „klassischen Hochbau“ 7

2.3 Lösungen im Tunnelbau 8

3 Ziel der Arbeit **11**

4 Entwicklung eines Anschlusselements **12**

4.1 Anforderungen 12

4.1.1 Statische Anforderungen 12

4.1.2 Baubetriebliche Anforderungen 13

4.1.3 Bauwirtschaftliche Anforderungen 14

4.2 Konzeptentwicklung 14

4.3 Detailausarbeitung 16

4.3.1 Anschlusselement Kalotte - Strosse 16

4.3.2 Material 17

4.3.3 Geometrie 18

4.3.4 Herstellung eines Prototyps 21

5 Laborversuche **22**

5.1 Scherversuch 22

5.1.1 Material und Methodik 23

5.1.1.1 Allgemein 23

5.1.1.2 Herstellung der Prüfkörper 23

5.1.1.3 Geometrie der Prüfkörper . . . 25
5.1.1.4 Prüfkonfiguration und Prüfablauf . . . 27
5.1.2 Ergebnisse und Diskussion . . . 29
5.1.2.1 Beschreibung des Versagensmechanismus . . . 30
5.1.2.2 Vergleich der Prüfserien . . . 31
5.2 Versuche zur Lösbarkeit . . . 37
5.2.1 Material und Methodik . . . 37
5.2.1.1 Allgemein . . . 37
5.2.1.2 Geometrie und Herstellung der Prüfkörper . . . 38
5.2.1.3 Prüfkonfiguration und Prüfablauf . . . 39
5.2.2 Ergebnisse und Diskussion . . . 39

6 Einsatz des Elements im Baustellenbetrieb 41
6.1 Allgemein . . . 41
6.1.1 Beschreibung des Elements . . . 42
6.1.2 Arbeitsschritte in der Theorie . . . 43
6.2 Zusammenbau auf der Baustelle . . . 51
6.3 Einbau auf der Baustelle . . . 52
6.4 Lösevorgang bei Strossenausbruch . . . 55

7 Schlussbetrachtung 57
7.1 Zusammenfassung . . . 57
7.2 Ausblick . . . 58

Abbildungsverzeichnis

1.1 Schematische Darstellung eines Vortriebs in Teilflächenausbrüchen; rot gekennzeichnet sind jene Bereiche, für die das Anschlusselement entwickelt werden sollte. 1

1.2 Varianten des Teilflächenausbruchs; rot: Kalotten - Strossen - Vortrieb (Wu (2002), adaptiert von Staudacher) 3

1.3 Darstellung der Arbeitsschritte bei einem Kalotten - Strossen - Vortrieb (a)-(e); die Stelle der zu verbindenden Spritzbetonschalen ist blau markiert 4

1.4 Problematik der Normalkraftübertragung bei Arbeitsfugen 5

1.5 Negativbeispiel eines Anschlussdetails zwischen Kalotte und Strosse 6

2.1 Anschlusselemente unterschiedlicher Hersteller 8

2.2 Teilflächenausbruch mit Anschluss der Spritzbetonschale zwischen Strosse und Sohle 9

2.3 Kalotten - Strossen Anschlusselement aus Holzbrettern 10

4.1 Maßgebende statische Anforderungen an den jeweiligen Zustand (Darstellung anhand eines Kalotten - Strossen - Vortriebs) 13

4.2 Schematische Darstellung der Funktionsweise des Anschlusselements anhand eines Querschnitts (oben) bzw. eines Längsschnitts (unten) durch die Spritzbetonschale am Übergang zwischen Kalotte und Strosse 15

4.3 Schematische Darstellung des entwickelten Anschlusselements und Bezeichnung der einzelnen Komponenten 16

4.4 Materialien des Anschlusselements 17

4.5 Links: ohne Kalottenfußverbreiterung, Rechts: mit Kalottenfußverbreiterung . 18

4.6 Geometrie Variante 1, Kalotte - Strosse ohne Fußverbreiterung [Maße in mm] 19

4.7 Geometrie Variante 2, Kalotte - Strosse mit Fußverbreiterung [Maße in mm] . 20

4.8 Herstellung eines Prototyps, Darstellung sämtlicher Schritte der Herstellung . 21

5.1 Prüfmaschine zur Durchführung des direkten Scherversuchs 23
5.2 Schematische Darstellung der Herstellungsschritte anhand der Serie S-V . . . 24
5.3 Herstellung der Prüfkörper dargestellt anhand der Serie S-V 24
5.4 Serie S-V: (a) Geometrie des Anschlusselements; (b) 3D - Darstellung des Scherversuchs 25
5.5 Serie S-B: (a) Geometrie des Anschlusselements; (b) 3D - Darstellung des Scherversuchs 26
5.6 Serie S: (a) Geometrie des Anschlusselements; (b) 3D - Darstellung des Scherversuchs 26
5.7 Prüfmaschine samt Bezeichnung (Pilgerstorfer, 2014) 27
5.8 Prüfkonfiguration Scherversuch, dargestellt anhand der Serie S-V 28
5.9 τ_H - ϵ_h - Diagramm, Vergleich der Serien S, S-B und S-V 29
5.10 w_v - w_h - Diagramm, Vergleich der Serien S, S-B und S-V 30
5.11 Versagen des Verbundes zwischen Streckmetall und Beton (rot) 30
5.12 Aufgleiten entlang der „Schubknagge“ mit anschließendem Versagen des Betons in diesem Bereich (rot) 31
5.13 Gleichmäßiges abscheren entlang der Scherfuge (rot) 31
5.14 Repräsentatives Bruchbild der Serie S-B 33
5.15 Repräsentatives Bruchbild der Serie S 34
5.16 τ_H - σ_N - Diagramm der Serie S-B 36
5.17 τ_H - σ_N - Diagramm der Serie S 36
5.18 Darstellung der Streckmetalle mit den verwendeten Maschenweiten [Maße in mm] 37
5.19 Herstellung der Prüfkörper 38
5.20 Prüfkonfiguration Lösbarkeit des Betons 39
5.21 Bruchflächen von drei ausgewählten Prüfkörpern [Maße in mm] 40

6.1 Kalotten - Strossen - Vortrieb des „Tunnel Stein“ 41
6.2 Geometrie des auf der Baustelle verwendeten Anschlusselements 42
6.3 Anschlussbewehrung für die temporäre Kalottensohle 43
6.4 Übersicht der einzelnen Arbeitsschritte, mit Fußverbreiterung 44
6.5 Übersicht der einzelnen Arbeitsschritte, ohne Fußverbreiterung 49
6.6 Zusammenbau des Anschlusselements vor dem Tunnelportal 51
6.6 Einbau des Anschlusselements im „Tunnel Stein“ 53

6.7 Strossenausbruch sowie Lösen des Betons vom Anschlusselement 55

Tabellenverzeichnis

5.1 Übersicht der einzelnen Prüfserien 22
5.2 Prüfkonfiguration der einzelnen Prüfkörper 27
5.3 Ergebnisse, Serie S-V und S-B 32
5.4 Ergebnisse, Serie S 34

Symbole

BSt	.....	Baustahl
F_N	.....	auf den Prüfkörper aufgebrachte Normalkraft
σ_N	.....	Normalspannung bezogen auf die Scherfläche (200 x 200 mm)
F_H	.....	auf den Prüfkörper aufgebrachte Horizontalkraft
τ_H	.....	horizontale Schubspannung bezogen auf die Scherfläche (200 x 200 mm)
$F_{H,res}$	.....	gleichbleibende Normalkraft am Ende der Prüfung
$\tau_{H,res}$	.....	horizontale Schubspannung bezogen auf die Scherfläche am Ende der Prüfung
GK8	.....	Größtkorn mit einem Durchmesser von 8 mm
t	.....	Prüfzeit
v	.....	horizontale Abschergeschwindigkeit
w_h	.....	Horizontalverschiebung
ϵ_H	.....	horizontale Dehnung bezogen auf die Länge der Scherfläche (200 mm)
$w_{h,\,Fmax}$	.....	Horizontalverschiebung bei maximaler Horizontalkraft
w_v	.....	Vertikalverschiebung

1 Einleitung

1.1 Allgemein

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Thema der Verbindung von Spritzbetonschalen im konventionellen Tunnelbau. Dabei wird häufig mit Teilflächenausbrüchen vorgetrieben. Von enormer Bedeutung ist die einfache und kosteneffiziente, jedoch kraftschlüssige Verbindung der Spritzbetonschalen der unterschiedlichen Arbeitsschritte. Für diesen in Abbildung 1.1 dargestellten Bereich sollte im Rahmen der Arbeit ein Anschlusselement entwickelt und anschließend in der Praxis getestet werden.

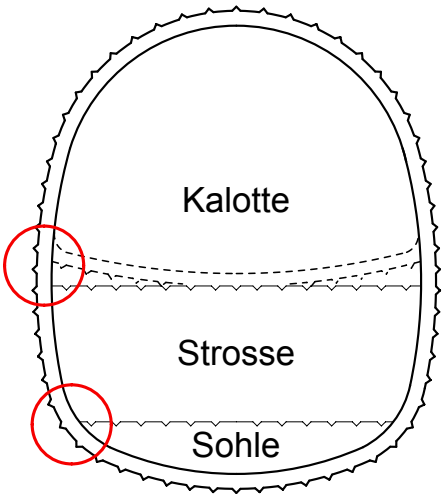


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung eines Vortriebs in Teilflächenausbrüchen; rot gekennzeichnet sind jene Bereiche, für die das Anschlusselement entwickelt werden sollte.

1.2 Problemstellung

Beim Tunnelbau muss ein Teilausbruch dem Vollausbruch vorgezogen werden, wenn schwierige Gebirgsverhältnisse vorliegen oder in Fällen mit großen Ausbruchsquerschnitten. Dadurch kann schneller und mit geringerem Aufwand auf unerwartet schlechter werdende Gebirgsverhältnisse reagiert werden bzw. der Ringschluss durch ein temporäres Kalottensohlgewölbe rascher erfolgen. Teilausbrüche können ausschließlich bei Sprengvortrieb und maschinellem Vortrieb mittels Teilschnittmaschinen oder Schrämbaggern realisiert werden. Die genaue Unterteilung des Tunnelquerschnitts richtet sich hauptsächlich nach dem wirtschaftlichsten Maschineneinsatz unter Berücksichtigung der ungestützten Stehzeit des Gebirges. Ein Nachteil dieser Methode ist die sich möglicherweise ergebende stärkere Auflockerung des Gebirges durch die sukzessive Umlagerung der Spannungen und der sich räumlich verändernden Tragwerksstruktur sowie ein unter Umständen erhöhter Zeit- und Materialaufwand. (Girmscheid, 2013)

Maidl et al. (2013) geben folgende drei Gründe an, welche zur Entscheidung führen mit Teilflächenausbruch vorzutreiben:

- zu geringe Standzeit des Gebirges, um die gesamte Ortsbrust zu öffnen
- zu geringe Standzeit des Gebirges, um die Ausbaumaßnahmen für den gesamten Querschnitt ausführen zu können
- Größe der vorhandenen Maschinen reicht für einen Vollausbruch nicht aus

Abbildung 1.2 zeigt unterschiedliche Varianten des Ausbruchs mittels Teilflächen. Im Rahmen dieser Arbeit wird vor allem auf den Kalotten - Strossen - Vortrieb (rot dargestellt) bzw. Kalotten - Strossen - Vortrieb mit Einbau einer temporären Kalottensohle eingegangen. Es ist anzumerken, dass das Anschlusselement mit gewissen Adaptierungen auch auf andere Arten des Teilausbruchs anwendbar sein sollte.

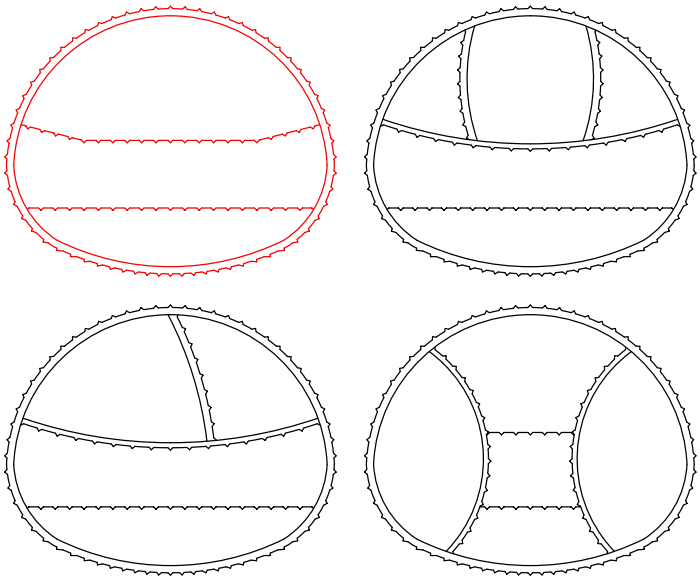
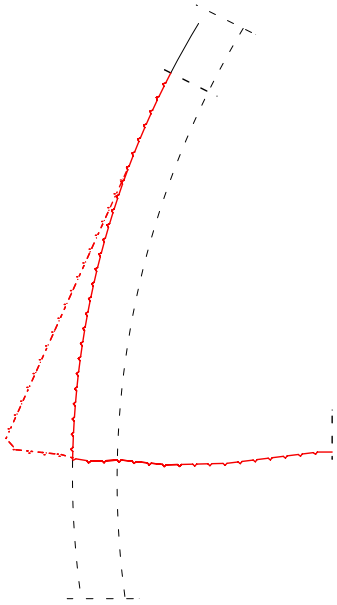
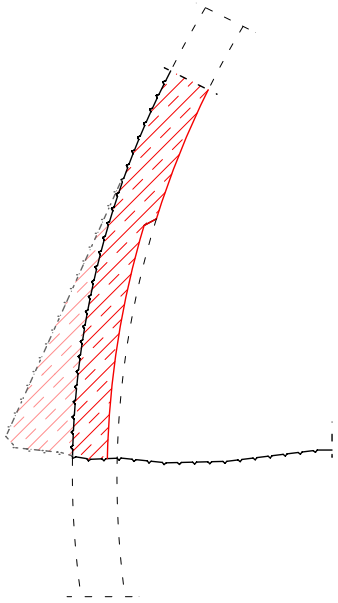


Abbildung 1.2: Varianten des Teilflächenausbruchs; rot: Kalotten - Strossen - Vortrieb (Wu (2002), adaptiert von Staudacher)

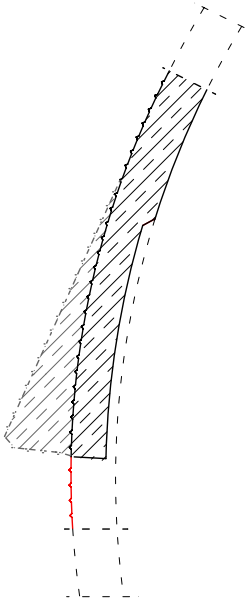
Nachfolgend wird anhand eines Kalotten - Strossen - Vortriebs die Problemstellung genauer erläutert und die Arbeitsschritte schematisch dargestellt. Abbildung 1.3 zeigt die einzelnen Arbeitsschritte (jeweils in roter Farbe) eines Kalotten - Strossen - Vortriebs (eine mögliche Fußverbreiterung ist in grau dargestellt).



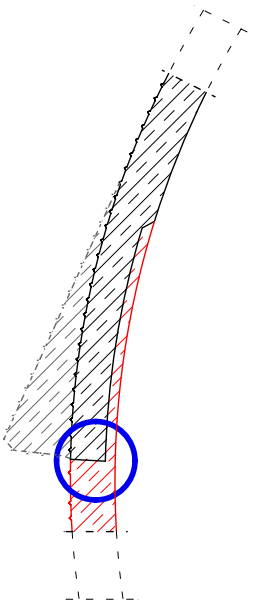
(a) Ausbruch der Kalotte



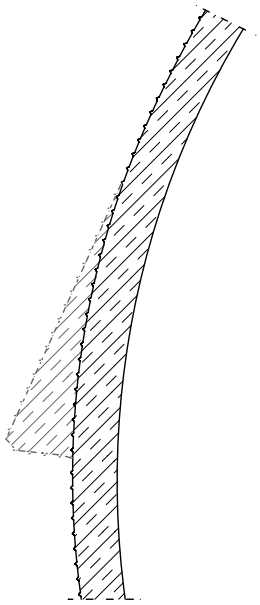
(b) Einbau der Spritzbetonschale der Kalotte



(c) Ausbruch der Strosse



(d) Einbau der Spritzbetonschale der Strosse



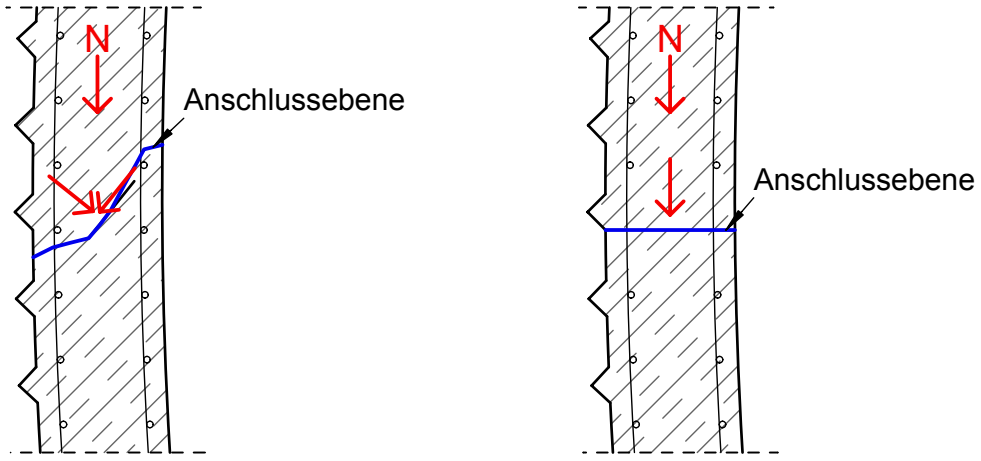
(e) Fertige Spritzbetonschale

Abbildung 1.3: Darstellung der Arbeitsschritte bei einem Kalotten - Strossen - Vortrieb (a)-(e); die Stelle der zu verbindenden Spritzbetonschalen ist blau markiert

Folgenden Anforderungen werden hierbei an das Anschlussdetail für den in Abbildung 1.3, d) gezeigten Bereich gestellt:

- durchgehende Bewehrungsführung,
- ebene Anschlussfuge zur Übertragung von Normalkräften,
- gute Verbundwirkung zwischen den Spritzbetonschalen und
- gute Lösbarkeit des Spritzbetons vom Anschlusselement bei Strossenausbruch.

Derzeit wird dieser Anschluss häufig dadurch realisiert, dass nach dem Freilegen der Strosse ein Teil der Spritzbetonschale mechanisch mittels Baggerarbeit entfernt wird (freilegen der Anschlussbewehrung), um eine durchgehende Bewehrungsführung gewährleisten zu können. Der daraus resultierende erhöhte Arbeits- und Zeitaufwand bietet durchaus Platz für Verbesserungen. Ein zusätzliches Problem stellt vor allem die Übertragung der, in der Tunnelschale überwiegend auftretenden, Normalkräfte dar. Durch das mechanische Entfernen des Betons entsteht häufig eine, wie in Abbildung 1.4, a) dargestellt, geneigte und unregelmäßige Fuge. Da der Verbund in der Arbeitsfuge aufgrund der zu unterschiedlichen Zeitpunkten hergestellten Spritzbetonschalen, sowie in der Fuge haftenden Spritzbeton-Rückprall oder Resten von Ausbruchsmaterial äußerst gering ist, führt die Neigung zu zusätzlichen Querkräften im Anschlussbereich. Idealerweise sollte die Fuge wie in Abbildung 1.4, b) dargestellt ausgeführt werden. Die Übertragung der Normalkräfte kann dabei durch Flächenpressung über die Arbeitsfuge erfolgen.



(a) Kraftübertragung bei schlechter Ausführung der Arbeitsfuge

(b) Kraftübertragung bei guter Ausführung der Arbeitsfuge

Abbildung 1.4: Problematik der Normalkraftübertragung bei Arbeitsfugen

Abbildung 1.5 zeigt ein Beispiel einer unsachgemäßen Ausführung des Anschlussdetails zwischen Kalotte und Strosse. Die Übertragung von Normalkräften ist dabei nur bedingt möglich.

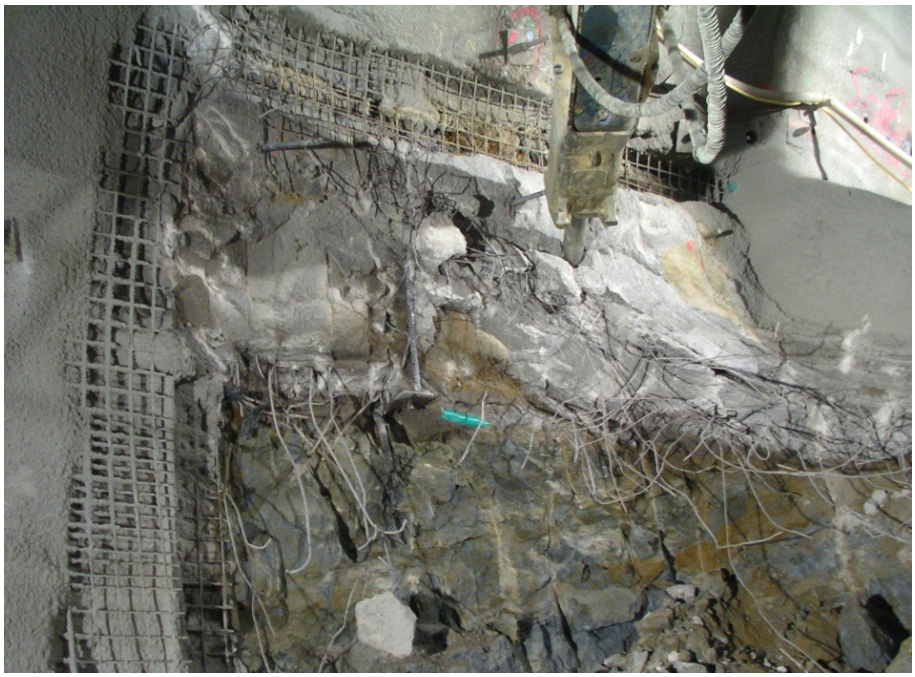


Abbildung 1.5: Negativbeispiel eines Anschlussdetails zwischen Kalotte und Strosse

2 Stand der Technik

2.1 Allgemein

Fugen treten bei jedem Beton- bzw. Stahlbetonbauwerk auf. Aufgrund unterschiedlicher zu erfüllender Aufgaben unterscheiden Baar et al. (2013) zwischen:

- Arbeitsfugen,
- Scheinfugen und
- Bewegungsfugen.

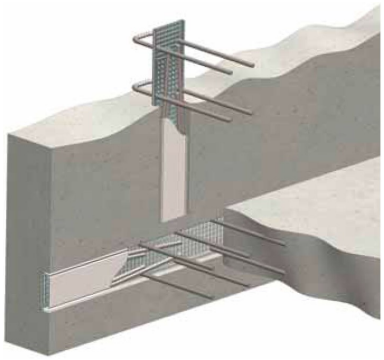
Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich ausschließlich mit Arbeitsfugen. Diese werden rein aus betrieblichen oder arbeitstechnischen Gründen ausgeführt und sollten daher weitestgehend vermieden bzw. in der Planung berücksichtigt werden. Meist ergeben sich diese durch notwendige Unterbrechungen im Arbeitsvorgang. Arbeitsfugen zur Verbindung von Beton unterschiedlichen Alters werden auch Verbundfugen genannt. Dabei muss die Bewehrung ungeschwächt durch diese hindurchgeführt werden bzw. bei Einhaltung der minimalen Verankerungslänge gestoßen werden, um alle auftretenden Kräfte übertragen zu können. Häufig ist hierbei die zu übertragende Querkraft der entscheidende Faktor bei der Bemessung der Fuge.

2.2 Lösungen im „klassischen Hochbau“

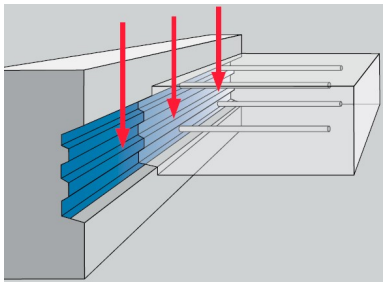
Arbeitsfugen im Stahlbetonbau zur Verbindung von Bauteilen, welche zu verschiedenen Zeitpunkten hergestellt wurden, treten im Hochbau häufig auf. Beispiele hierfür sind in unterschiedlichen Bauphasen hergestellte Decken, Wände oder Treppen, welche nachträglich kraftschlüssig miteinander verbunden werden müssen. Primär aus baubetrieblichen und bauwirtschaftlichen Gründen sind diese Lösungen für den Tunnelbau meist nicht zweckmäßig. In Abbildung 2.1 sind beispielhaft Produktlösungen aus dem „klassischen Hochbau“ dargestellt.

Beispiele von Herstellern zur Ausführung von Arbeitsfugen im Stahlbetonbau:

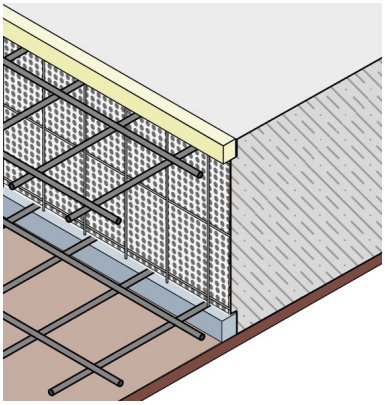
- Anschusselement der Firma HALFEN GmbH, Wien, Österreich (Abbildung 2.1, a))
- Anschlusselement der Firma DYWIDAG - Systems International GmbH, Porta Westfalica, Deutschland (Abbildung 2.1, b))
- Anschlusselement der Firma EGCO AG, Bösingen, Schweiz (Abbildung 2.1, c))



(a) Anschlusselement der Firma Halfen (Halfen GmbH, 2015)



(b) Anschlusselement der Firma Dywidag (Dywidag-System International GmbH, 2016)



(c) Anschlusselement der Firma EGCO (Egco AG, 2015)

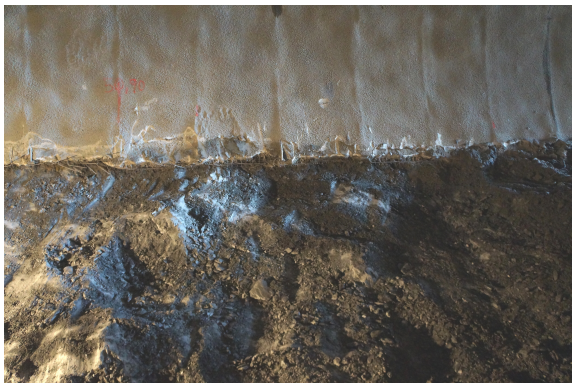
Abbildung 2.1: Anschlusselemente unterschiedlicher Hersteller

2.3 Lösungen im Tunnelbau

Über Lösungen im Tunnelbau zu dieser Problemstellung gibt es nahezu keine Veröffentlichungen, da die Ausführung meist individuell und in Abhängigkeit von den Randbedingungen baustellenspezifisch erfolgt. Wie bereits erwähnt, wird die Spritz-betonschale der Kalotte nach dem Ausbruch der Strosse meist nochmals freigelegt, um eine durchgehende Bewehrungsführung gewährleisten zu können. Neben dem Kosten- und Zeitaufwand ist dies auch keine technisch „saubere“ Lösung. Abbildung 2.2 zeigt einen Tunnel, welcher mit konventionellem Sprengvortrieb mit Teilflächenausbruch im Lockergestein aufgefahren wird. Das Anschlussdetail der Spritzbetonschale der Strosse zu jenem der Sohle wird dadurch gelöst, dass die Anschlussbewehrung während der Herstellung der Strosse im Lockergestein im Fußbereich verbleibt (Abbildung 2.2, c) und beim Nachziehen der Sohle nach unten gebogen wird (Abbildung 2.2, d). Die Bilder zeigen, dass es hierbei Verbesserungspotential gibt. Wie in Kapitel 1.2 beschrieben, ist bei dieser Ausführung vor allem die Übertragung der Normalkräfte

aufgrund der geneigten und unregelmäßigen Anschlussfuge problematisch. Zusätzlich ist die Fuge mit Lockermaterial und Spritzbeton - Rückprall verunreinigt, wodurch die Verbundfestigkeit zwischen den Spritzbetonschalen negativ beeinflusst wird.

(a) Tunnel im Teilflächenausbruch, Ausbruch der Sohle



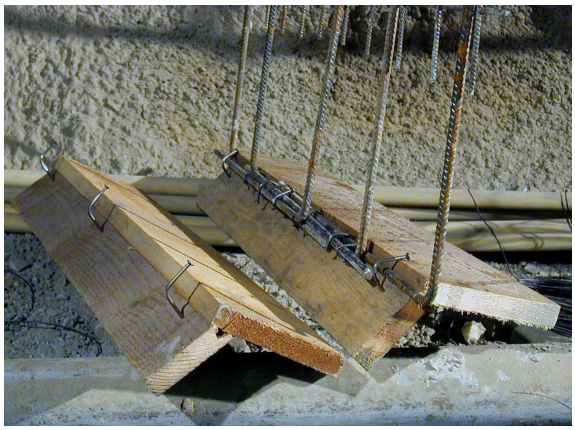
(b) freigelegte Anschlussfuge zwischen Strosse und Sohle

(c) Anschlussbewehrung zur Verbindung von Strosse und Sohle

(d) Anschlussbewehrung bereits nach unten gebogen

Abbildung 2.2: Teilflächenausbruch mit Anschluss der Spritzbetonschale zwischen Strosse und Sohle

Abbildung 2.3 zeigt eine weitere Variante, welche zur Verbindung von Kalotte und Strosse eingesetzt wird. Hierbei wird die Anschlussbewehrung im Stoß zweier Holzbretter „versteckt“. Beim Nachziehen der Strosse werden die beiden Holzbretter entfernt und die Anschlussbewehrung nach unten gebogen. Diese Variante bringt bezüglich der Übertragung von Normalkräften sowie der Lösbarkeit bei Strossenausbruch Vorteile mit sich und ist eine durchaus praktikable und gute Lösung. Mögliche Nachteile bzw. Probleme kann jedoch die schwer zugängliche Anschlussbewehrung nach dem Entfernen der Bretter, der Zusammenbau und die durch die Holzbretter verursachte glatte Oberfläche der Verbundfuge darstellen.



(a) Anschlusselement bestehend aus Brettern, die Anschlussbewehrung ist im Stoß dieser beiden eingebunden (Quelle: ÖBA Tunnel Unterwald)

(b) Anschlusselement im eingebauten Zustand (Quelle: ÖBA Tunnel Unterwald)

Abbildung 2.3: Kalotten - Strossen Anschlusselement aus Holzbrettern

3 Ziel der Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die **Entwicklung eines Anschlusselements**, welches eine einfache und kostengünstige Verbindung der Spritzbetonschale der Kalotte mit jener der Strosse sicherstellt. Die Anforderungen, welche an das Anschlusselement in Bezug auf statische, bauwirtschaftliche und baubetriebliche Belange gestellt werden sind in Kapitel 4.1 genauer beschrieben. Weiters werden **Laborversuche** bezüglich der Querkrafttragfähigkeit des Elements, sowie der Lösbarkeit zwischen Anschlusselement und Spritzbeton durchgeführt. Schließlich wird das entwickelte Element **im Baustellenbetrieb getestet** und sich dadurch ergebende Adaptierungen in die Entwicklung mit einbezogen.

4 Entwicklung eines Anschlusselements

Nachfolgend wird die Entwicklung des Anschlusselements beschrieben. Neben den Anforderungen, der Funktionsweise und den verwendeten Materialien wird auch die Herstellung eines Prototyps gezeigt.

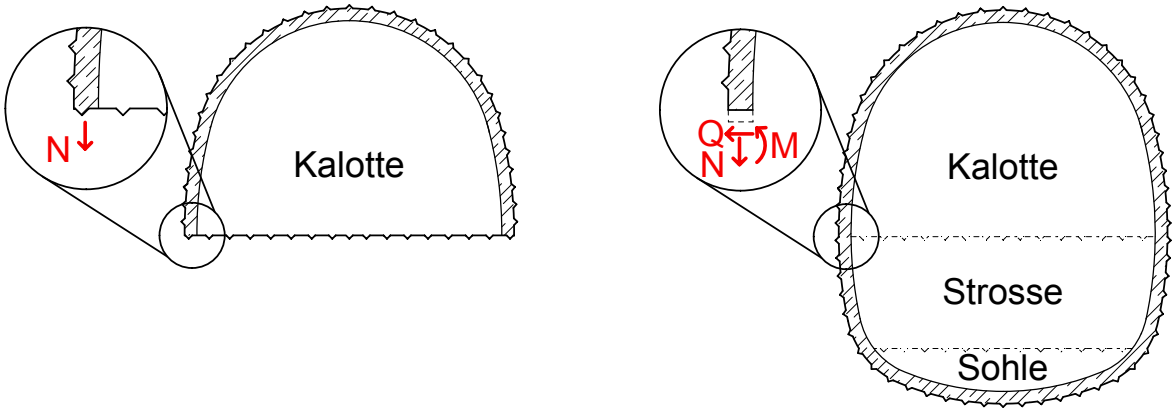
4.1 Anforderungen

Die Anforderungen, welche an das zu entwickelnde Element gestellt werden, können in folgende drei Bereiche unterteilt werden:

- Statische Belange
- Baubetriebliche Belange
- Bauwirtschaftliche Belange

4.1.1 Statische Anforderungen

Hierbei müssen prinzipiell jene zwei in Abbildung 4.1 dargestellten, Zustände unterschieden werden. Der in Abbildung 4.1, a) dargestellten Zustand zeigt den sogenannten „Bauzustand“. Dieser besteht solange, bis die Strosse nachgezogen wird und somit die beiden Spritzbetonschalen miteinander verbunden sind. Da dieser Zustand nur temporär ist, müssen hier hauptsächlich die auftretenden Normalkräfte übertragen werden. Die Übertragung von Momenten und Querkräften spielt eine untergeordnete Rolle. Abbildung 4.1, b) zeigt den „Endzustand“. Hierbei muss das Anschlusselement die kraftschlüssige Verbindung der beiden Spritzbetonschalen sicherstellen und daher sämtliche auftretenden Kräfte (Normalkraft, Querkraft und Moment) übertragen. Im Allgemeinen gilt, dass Arbeitsfugen keine Schwächung der Spritzbetonschale zur Folge haben dürfen.



(a) „Bauzustand“ (b) „Endzustand“

Abbildung 4.1: Maßgebende statische Anforderungen an den jeweiligen Zustand (Darstellung anhand eines Kalotten - Strossen - Vortriebs)

4.1.2 Baubetriebliche Anforderungen

Folgende Aufzählung fasst die baubetrieblichen Aspekte in Bezug auf die Herstellung sowie den Einbau des Anschlusselements zusammen, welche bei der Entwicklung des Elements berücksichtigt werden müssen.

Anforderungen an das Anschlusselement

- *Lagerung:* Aufgrund der meist begrenzten Lagerfläche auf Tunnelbaustellen ist es notwendig, die Elemente möglichst platzsparend und nahe dem Verwendungsort lagern zu können. Vorteilhaft sind daher stapelbare Ausführungen, welche erst vor Ort endgültig zusammengebaut werden.
- *Zusammenbau:* Der Zusammenbau auf der Baustelle sollte von einer Person und möglichst ohne zusätzlich benötigtes Werkzeug realisierbar sein.
- *Gewicht:* Es sollte möglich sein, dass das Anschlusselement von einer Person getragen werden kann.
- *Elementlänge:* Aufgrund unterschiedlicher Abschlagslängen sollte es möglich sein, das Element mit auf der Baustelle vorhandenen Werkzeugen auf die benötigte Länge zu kürzen.
- *Robustheit:* Das Anschlusselement sollte die nötige Robustheit besitzen, um die Baustellentauglichkeit gewährleisten zu können.

Anforderungen an den Einbauprozess

- *Handhabung:* Der Einbau sollte möglichst einfach und ohne spezielle Einschulung durchführbar sein.
- *Einbauvorgang:* Der Einbau sollte von einer Person und in kurzer Zeit durchführbar sein. Wenn möglich, sollten parallel dazu andere Arbeitsschritte des zyklischen Vortriebs ausführbar sein.

4.1.3 Bauwirtschaftliche Anforderungen

Aus bauwirtschaftlicher Sicht spielen die Herstellung und der Einbau des Elements eine große Rolle. Ein weiterer Punkt ist der Zeitaufwand zum Freilegen und Herausbiegen der Anschlussbewehrung, welche im Vergleich zu anderen Ausführungsvarianten beim Nachziehen der Strosse eingespart werden kann.

Herstellung des Anschlusselements

- *Materialkosten:* Einsatz von günstigen und auf den Verwendungszweck optimierte Materialien.
- *Herstellungskosten:* Der Herstellungsprozess sollte einfach sein, um Kosten sparen zu können.

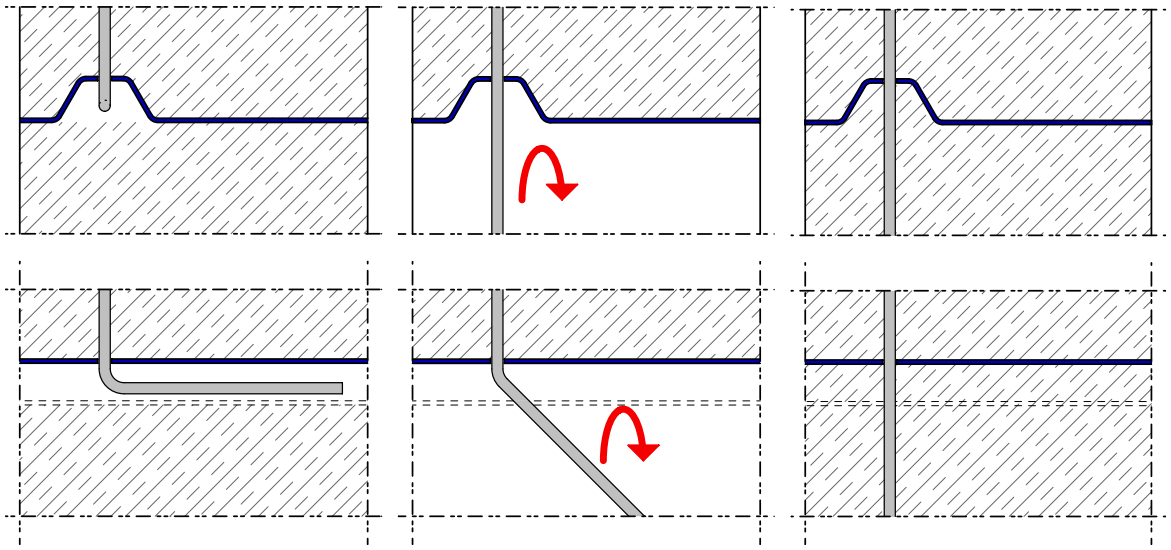
Einbau des Anschlusselements

Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und Kosteneffizienz spielt vor allem die Zeit des Einbaus sowie jene zum Freilegen und Herausbiegen der Anschlussbewehrung eine entscheidende Rolle.

4.2 Konzeptentwicklung

Die Konzeptentwicklung erfolgte für einen Kalotten - Strossen - Vortrieb. Die in Kapitel 4.1 erwähnten Anforderungen bildeten die Grundlage für die Entwicklung des Anschlusselements. Das System baut darauf auf, eine ebene und raue Betonoberfläche nach Abbruch der Strosse zu erhalten, um dadurch auftretende Normalkräfte bestmöglich übertragen zu können. Zur Übertragung von Querkräften und Momenten wird eine Anschlussbewehrung mit der vorgeschriebenen Verankerungslänge benötigt. Diese ist derart in der „Trennschicht“ integriert, dass die Zugänglichkeit nach Ausbruch der Strosse trotz des Einspritzvorgangs gewährleistet

werden kann. Eine schematische Darstellung der Funktionsweise ist in Abbildung 4.2 gegeben. Abbildung 4.2, a) zeigt das Anschlusselement im „Bauzustand“. Hierbei ist die Anschlussbewehrung in Tunnellängsrichtung in die trapezförmige Ausnehmung nach hinten gebogen. Um auftretende Normalkräfte übertragen zu können, ist es von großer Bedeutung, dass das Element vollflächig unterspritzt und möglichst eben eingebaut ist. Bedingt durch die trapezförmige Ausnehmung können die Normalkräfte nicht über die gesamte Breite der Spritzbetonschale übertragen werden. Dies stellt aber aufgrund der Ausnutzungsgrade der maximal zulässigen Druckfestigkeit des Betons im „Bauzustand“ im Allgemeinen kein Problem dar. In Abbildung 4.2, b) ist das Element an der Unterseite freigelegt und die Anschlussbewehrung wird nach unten gebogen. Der „Endzustand“ mit den bereits verbundenen Spritzbetonschalen von Kalotte und Strosse ist in Abbildung 4.2, c) schematisch dargestellt. Die Übertragung der Normalkräfte erfolgt somit über die gesamte Breite der Spritzbetonschale. Auftretende Querkräfte werden über die Anschlussbewehrung, die hohlraumseitige Bewehrung sowie die, durch die trapezförmige Ausnehmung entstehende, „Schubknagge“ übertragen.



(a) „Bauzustand“, das Anschlusselement ist im Fußbereich der Kalotte eingespritzt

(b) Abbruch der Strosse, Anschlussbewehrung wird nach unten gebogen

(c) „Endzustand“, kraftschlüssige Verbindung der Spritzbetonschalen

Abbildung 4.2: Schematische Darstellung der Funktionsweise des Anschlusselements anhand eines Querschnitts (oben) bzw. eines Längsschnitts (unten) durch die Spritzbetonschale am Übergang zwischen Kalotte und Strosse

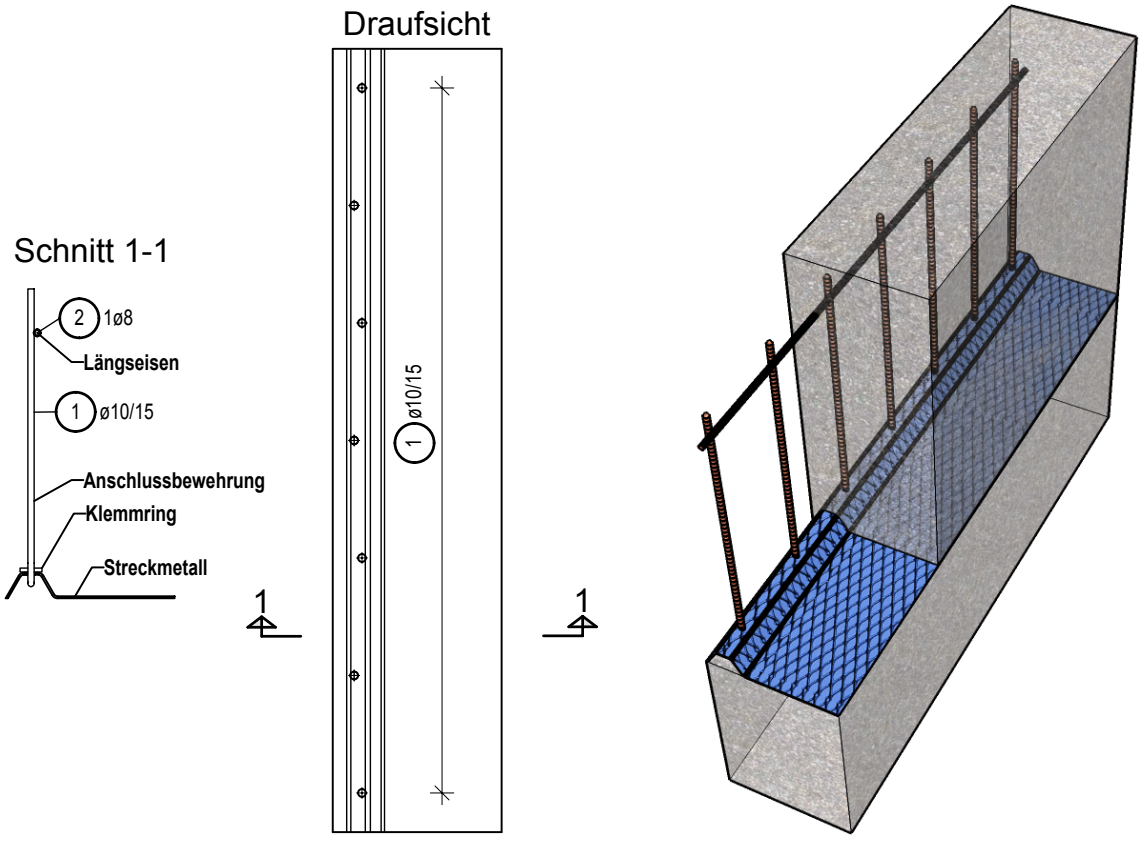
4.3 Detailausarbeitung

Folgend wird auf das entwickelte Anschlussdetail näher eingegangen. Neben den verwendeten Materialien wird die Geometrie und die Funktionsweise beschrieben sowie auf die Vorteile des Anschlusselements hingewiesen.

4.3.1 Anschlusselement Kalotte - Strosse

Das Anschlusselement besteht im Wesentlichen aus drei Komponenten:

- *Hauptelement („Trennschicht"):* Streckmetall, welches bereits mit der in Abbildung 4.3 dargestellten Form auf die Baustelle geliefert wird.
- *Anschlussbewehrung, Längseisen zur Aussteifung*
- *Klemmring:* Dient zur Befestigung der Anschlussbewehrung.



(a) Schnitt und Draufsicht des Anschlusselements (b) 3D - Darstellung des Anschlusselements

Abbildung 4.3: Schematische Darstellung des entwickelten Anschlusselements und Bezeichnung der einzelnen Komponenten

4.3.2 Material

Streckmetall

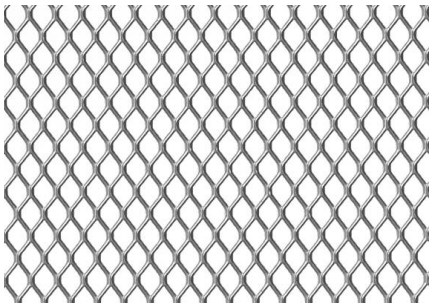
Als „Trennschicht“ erwies sich Streckmetall als das am besten geeignete Material (siehe Abbildung 4.4, a)). Die Vorteile von Streckmetall sind das geringe Gewicht sowie die leichte Bearbeitbarkeit hinsichtlich der Herstellung und dem Einsatz im Baustellenbetrieb (variabel ablängbar). Weiters ist es im Vergleich zu Materialien mit ähnlichen Eigenschaften kostengünstig. Im Hinblick auf die Funktion als trennendes Element bringt die Lösbarkeit des Betons vom Element (näheres siehe Kapitel 5.2), sowie die dadurch entstehende raue Oberfläche zur Verbesserung der Verbundwirkung in der Arbeitsfuge Vorteile mit sich.

Klemmring

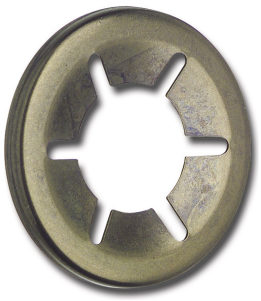
Zur Befestigung der Anschlussbewehrung am Streckmetall dient ein Klemmring (siehe Abbildung 4.4, b)) aus Federstahl. Dieser wird einseitig über den Stab geschoben und verkeilt sich, sodass ein Lösen in Stülprichtung nicht mehr möglich ist. Durch diese Befestigungsvariante soll beim Zusammenbau auf der Baustelle Zeit gespart werden. Eine Alternative dazu wäre die Befestigung mit einem Bewehrungsdraht.

Bewehrungsstahl

Als Anschlussbewehrung dient handelsüblicher Bewehrungsstahl BSt 550, Ø 10 (siehe Abbildung 4.4, c)).



(a) Streckmetall (Mevaco GmbH, 2016)



(b) Klemmring (Schachermayer Deutschland GmbH, 2016)

(c) Bewehrungsstahl

Abbildung 4.4: Materialien des Anschlusselements

4.3.3 Geometrie

Die Geometrie des Anschlusselements ist abhängig:

- von der Dicke der Spritzbetonschale
- von der Abschlagslänge
- vom Gebirge, respektive der Notwendigkeit einer Kalottenfußverbreiterung

Eine Anpassung des Elements an die baustellenspezifischen Gegebenheiten ist einfach möglich. Nachfolgend sind zwei unterschiedliche Geometrien des Anschlusselements für eine Spritzbetonstärke von $d_S = 20\,cm$ und eine Abschlagslänge von 1,30 m dargestellt. Wobei Variante 1 für einen Anschluss ohne Kalottenfußverbreiterung (siehe Abbildung 4.6) und Variante 2 für einen Anschluss bei Vorhandensein einer Kalottenfußverbreiterung (siehe Abbildung 4.7) ausgelegt ist. Diese unterscheiden sich dadurch, dass bei der Kalottenfußverbreiterung der Schenkel etwas weiter nach unten gezogen wird, um das Lösen des Betons bei Strossenausbruch zu erleichtern. Es wurde ein Streckmetall aus Stahl mit einer rautenförmigen Maschenweite von 20 x 10 x 2 mm verwendet. So ist es möglich, die Anschlussbewehrung beim Zusammenbau durchzustecken, ohne das Streckmetall vorbohren zu müssen. Als Anschlussbewehrung dient BSt 550, Ø 10 mm mit einer Verankerungslänge von 40 cm. Diese wird, wie oben beschrieben, mit einem Klemmring am Streckmetall befestigt. Als Aussteifung bzw. um das Anschlusselement transportabler zu machen, dient ein Eisen Ø 8 mm, welches mit einem Draht an der Anschlussbewehrung befestigt wird. Um ausreichend Platz für die Anschlussbewehrung in der trapezförmigen Ausnehmung zu haben, wird diese versetzt angeordnet.

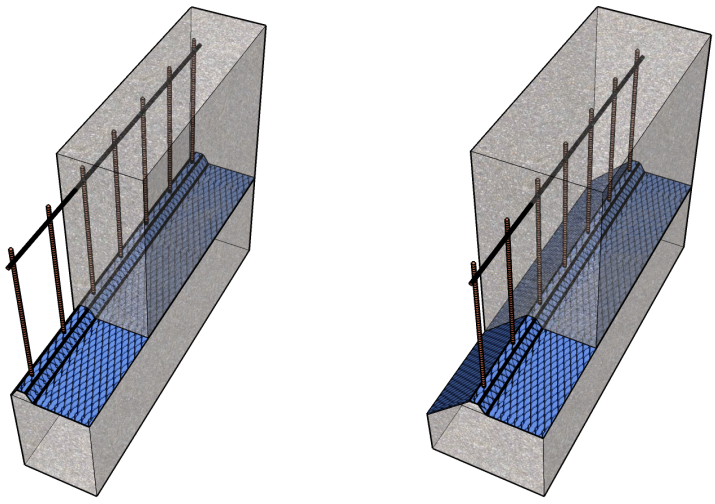


Abbildung 4.5: Links: ohne Kalottenfußverbreiterung, Rechts: mit Kalottenfußverbreiterung

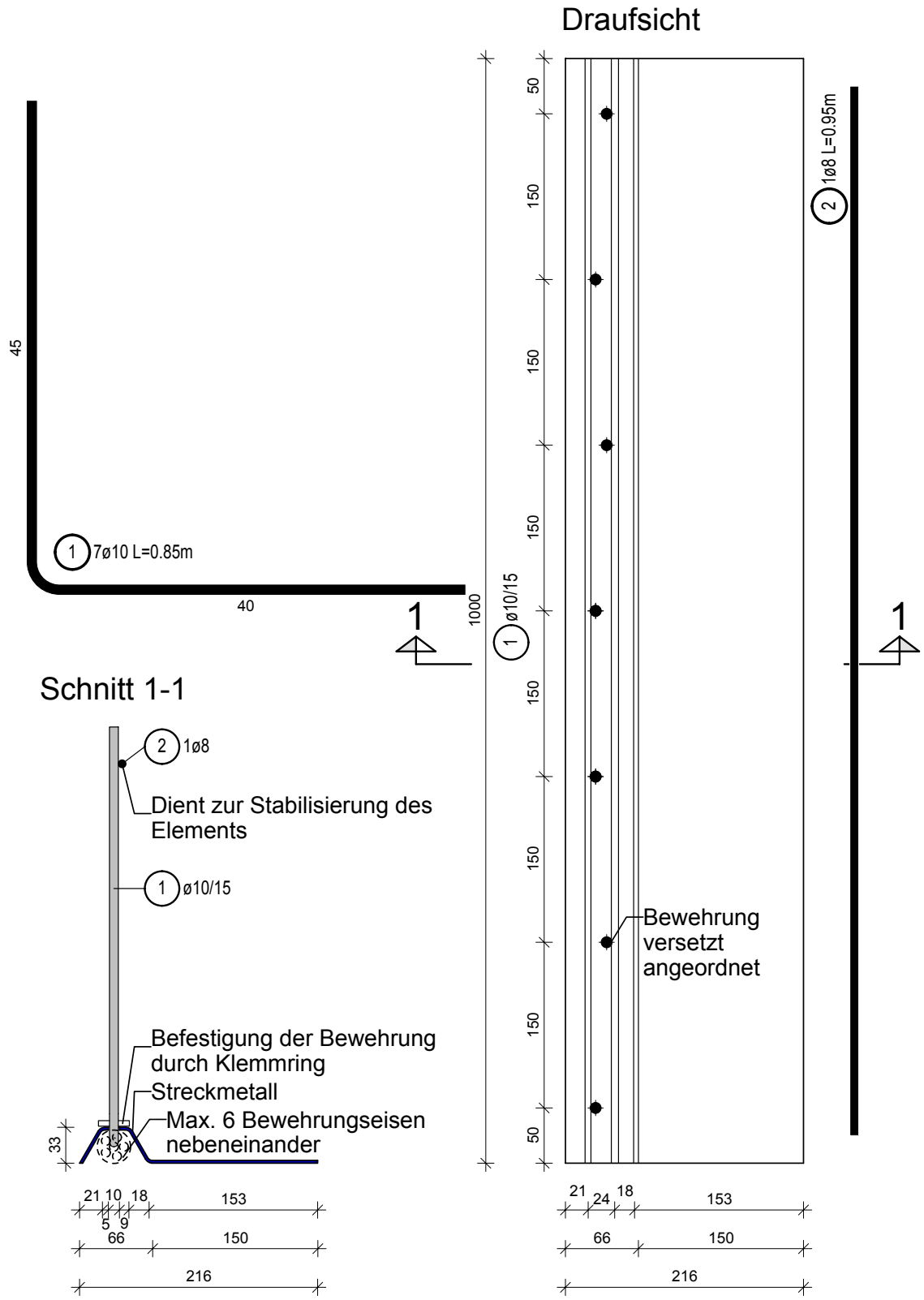


Abbildung 4.6: Geometrie Variante 1, Kalotte - Strosse ohne Fußverbreiterung [Maße in mm]

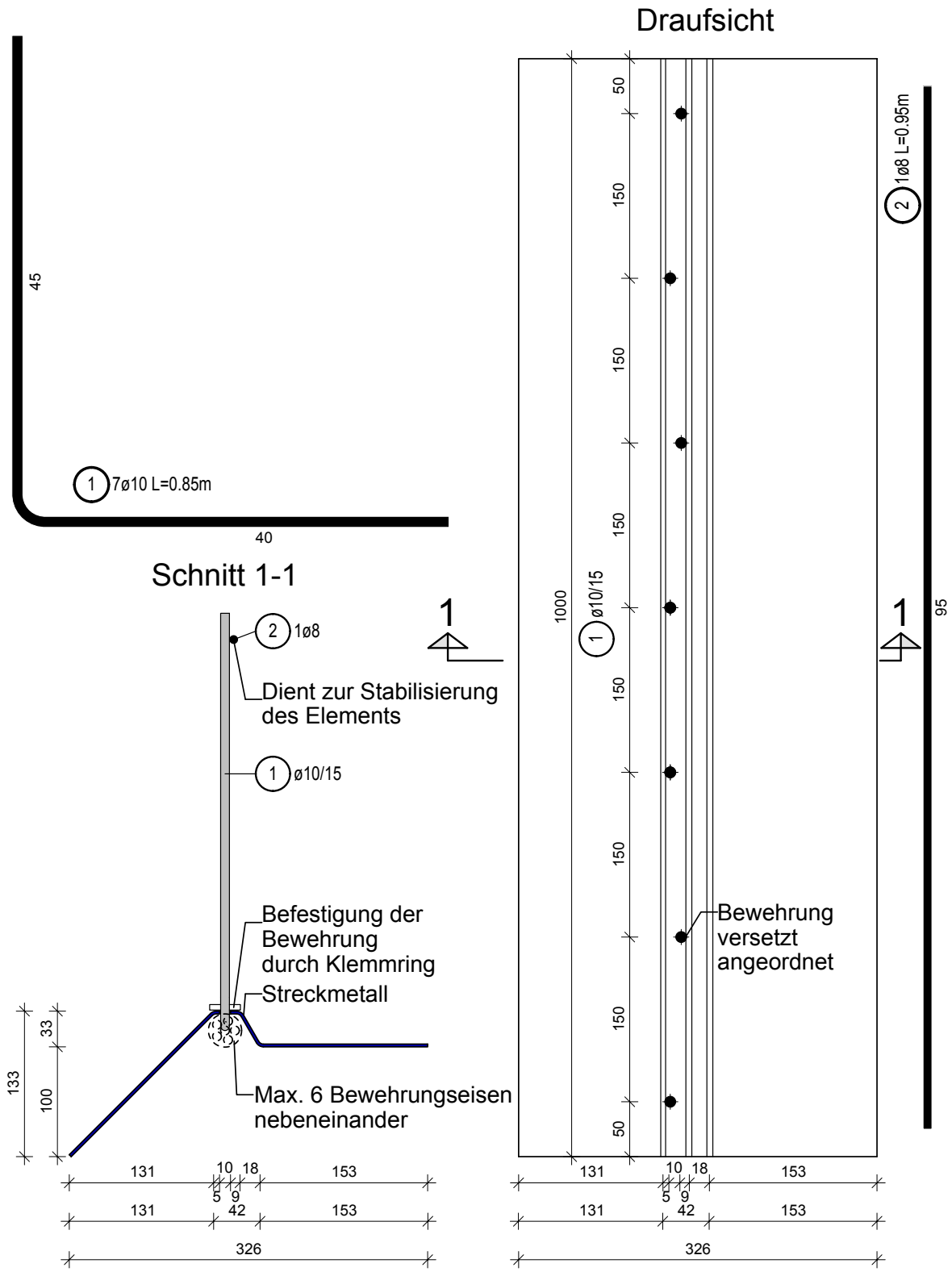
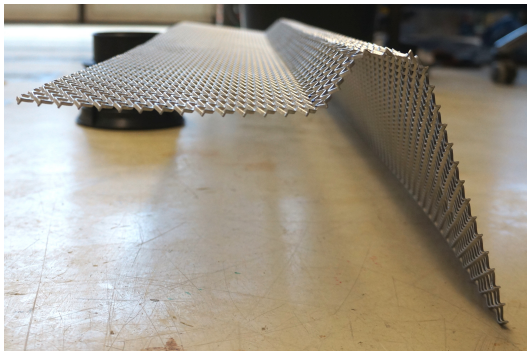


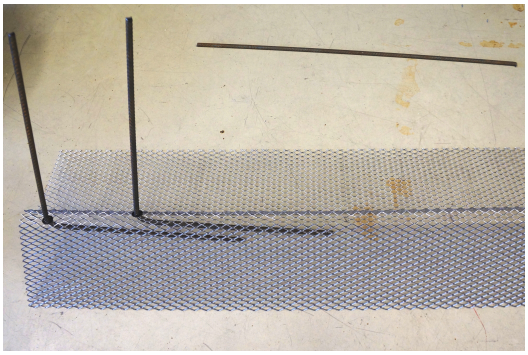
Abbildung 4.7: Geometrie Variante 2, Kalotte - Strosse mit Fußverbreiterung [Maße in mm]

4.3.4 Herstellung eines Prototyps

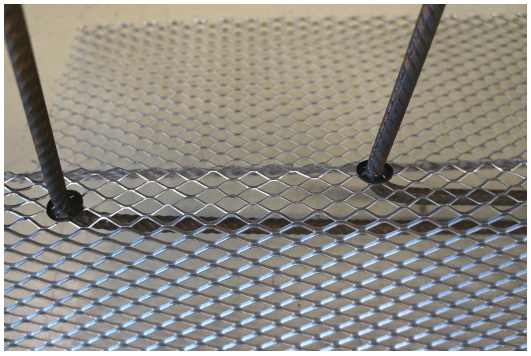
Die Herstellung eines Prototyps erfolgte für die in Abbildung 4.7 dargestellte Geometrie eines Anschlusselements mit Fußverbreiterung. Abbildung 4.8 zeigt die Herstellungsschritte des Prototyps.



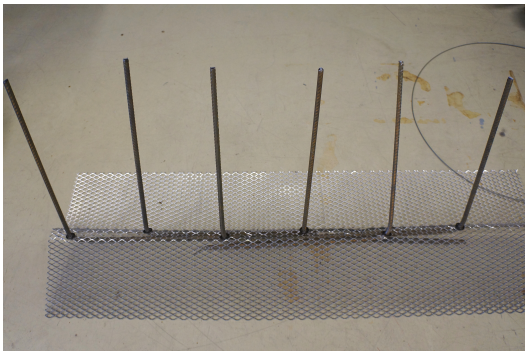
(a) Mit der gewünschten Geometrie gebogenes Streckmetall (Raute 20 x 10 x 2 mm)



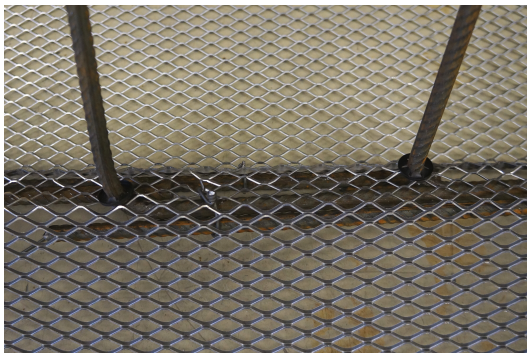
(b) Anschlussbewehrung mit bereits angebrachtem Klemmring wird durch das Streckmetall gesteckt



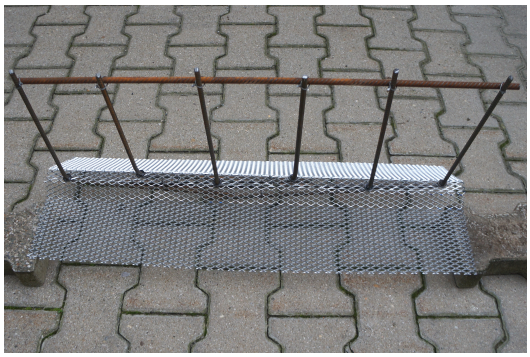
(c) Die Anschlussbewehrung ist versetzt angeordnet und durch den Klemmring befestigt



(d) Anschlusselement ohne aussteifendes Längseisen



(e) Die Anschlussbewehrung wird zusätzlich mittig mit einem Draht befestigt



(f) Fertiges Anschlusselement mit aussteifendem Längseisen

Abbildung 4.8: Herstellung eines Prototyps, Darstellung sämtlicher Schritte der Herstellung

5 Laborversuche

Anhand von Laborversuchen sollte die maximal übertragbare Querkraft sowie die Lösbarkeit zwischen Beton und Streckmetall untersucht werden.

5.1 Scherversuch

Der Scherversuch sollte jene Querkraft bestimmen, welche beim Aufbringen einer konstanten Normalkraft über die vorgegeben Scherfuge übertragen werden kann. Insgesamt wurden drei Prüfserien durchgeführt (siehe Tabelle 5.1):

- **Serie S-V:** Vorversuche während der Entwicklungsphase zur Bestätigung der Machbarkeit. Hier wurde jeweils ein Versuch des „Bauzustandes“ (ohne Bewehrung) und einer des „Endzustandes“ durchgeführt. Wobei auf jenen des „Bauzustandes“ im folgenden nicht näher eingegangen wird, da er nicht von Relevanz ist.
- **Serie S-B:** Geometrie und Material entsprechend dem Einsatz im Baustellenbetrieb.
- **Serie S:** Unterscheidet sich zur Serie S-B dadurch, dass hier keine Bewehrung eingebaut wurde und somit sämtliche Querkräfte über Reibung bzw. die „Schubknagge“ übertragen werden.

Tabelle 5.1: Übersicht der einzelnen Prüfserien

Bezeichnung	Anzahl	Anmerkungen
Serie S-V	1	Vorversuch
Serie S-B	3	mit eingelegter Bewehrung
Serie S	3	ohne eingelegter Bewehrung

5.1.1 Material und Methodik

5.1.1.1 Allgemein

Es wurde ein direkter Scherversuch auf der institutsinternen Prüfmaschine durchgeführt (siehe Abbildung 5.1). Die zur Verfügung stehenden Scherboxen hatten jeweils Abmessungen von $a = 20\,cm$, $b = 20\,cm$ und eine Höhe von $h = 15\,cm$.

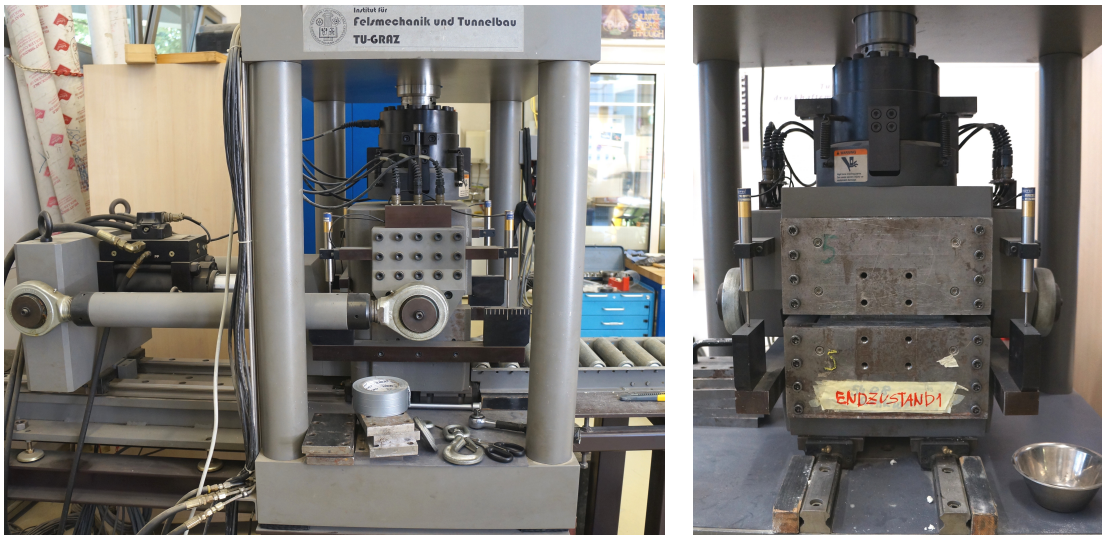
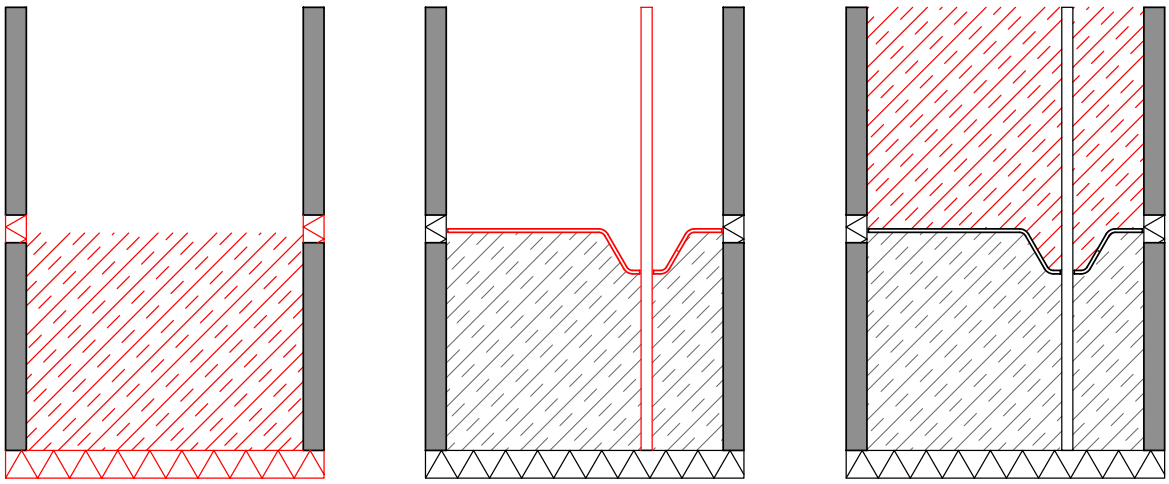


Abbildung 5.1: Prüfmaschine zur Durchführung des direkten Scherversuchs

5.1.1.2 Herstellung der Prüfkörper

Die Herstellung der Prüfkörper erfolgte für alle Prüfserien ident und wurde ebenfalls im institutsinternen Labor durchgeführt. Zum Einsatz kam ein Trockenbeton der Festigkeitsklasse C 16/20, GK 8 mit Stahlfaserbewehrung. Die einzelnen Herstellungsschritte werden schematisch in Abbildung 5.2 und in Abbildung 5.3 gezeigt.



(a) Einbringen des Betons in die untenliegende Scherbox

(b) Einlegen des Anschlusselements auf Höhe der Scherfuge

(c) Einbringen des Betons in die obenliegende Scherbox

Abbildung 5.2: Schematische Darstellung der Herstellungsschritte anhand der Serie S-V

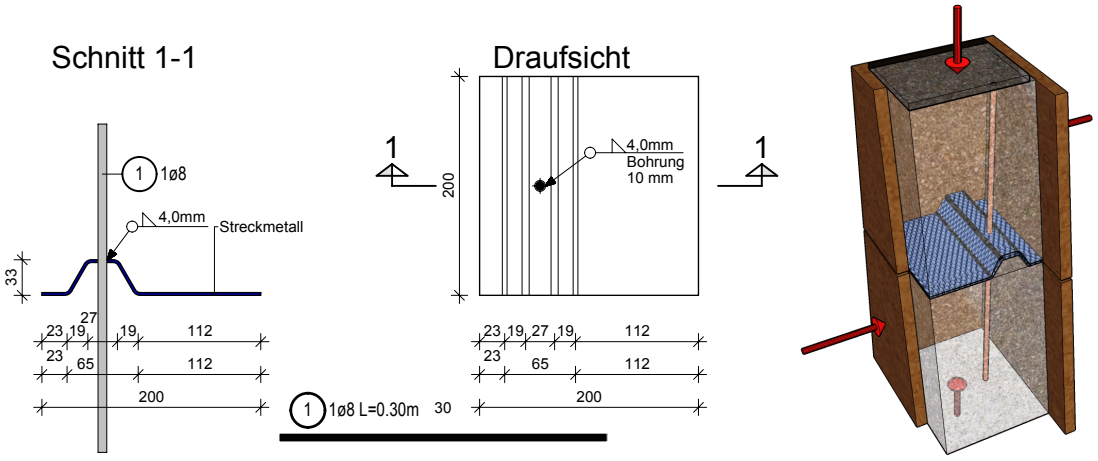
Abbildung 5.3: Herstellung der Prüfkörper dargestellt anhand der Serie S-V

5.1.1.3 Geometrie der Prüfkörper

Folgend werden die Geometrie sowie die verwendeten Materialien der Prüfkörper der unterschiedlichen Serien dargestellt.

Serie S-V

Für die Serie S-V wurde ein Streckmetall aus Stahl mit rautenförmigen Maschen 16 x 8 x 1,5 mm und einer Materialdicke von 1 mm sowie BSt 550, Ø 8 mm als Bewehrungsstahl verwendet. Dieser besaß keinen Endhaken wodurch die notwendige Verankerungslänge nicht eingehalten wurde. Die Geometrie sowie eine 3D - Darstellung des Scherversuchs wird in Abbildung 5.4 gezeigt.

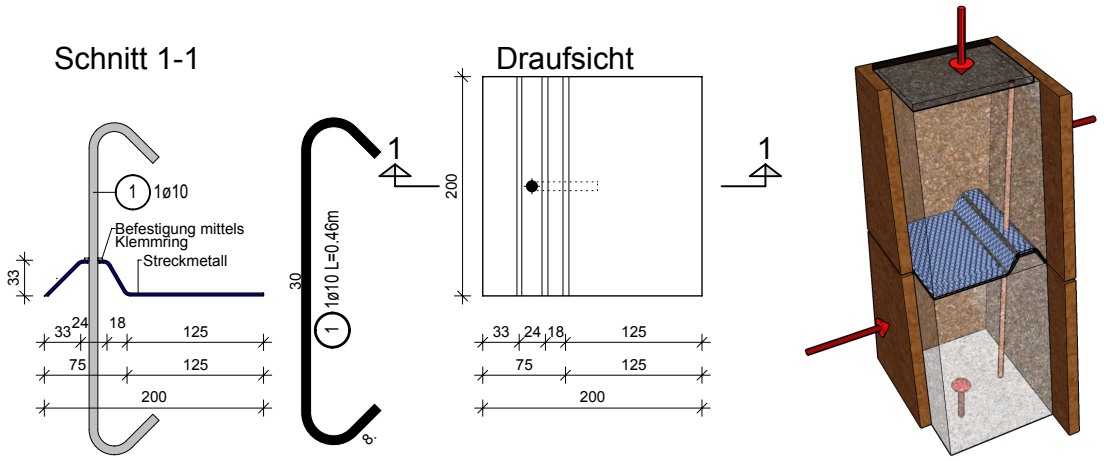


(a) (b)

Abbildung 5.4: Serie S-V: (a) Geometrie des Anschlusselements; (b) 3D - Darstellung des Scherversuchs

Serie S-B

Hierbei kam jenes Streckmetall sowie jene Geometrie zur Verwendung, welche im Zuge des Einsatzes auf der Baustelle (siehe Kapitel 6) ebenfalls eingesetzt wurde. Dabei handelt es sich um ein gewalztes Streckmetall aus Stahl mit rautenförmigen Maschen 10 x 6 mm und einer Materialdicke von 1 mm. Als Bewehrung diente ein Bewehrungsstahl BSt 550, Ø 10 mm mit Endhaken. Die Geometrie sowie eine 3D - Darstellung des Scherversuchs sind in Abbildung 5.5 gezeigt.

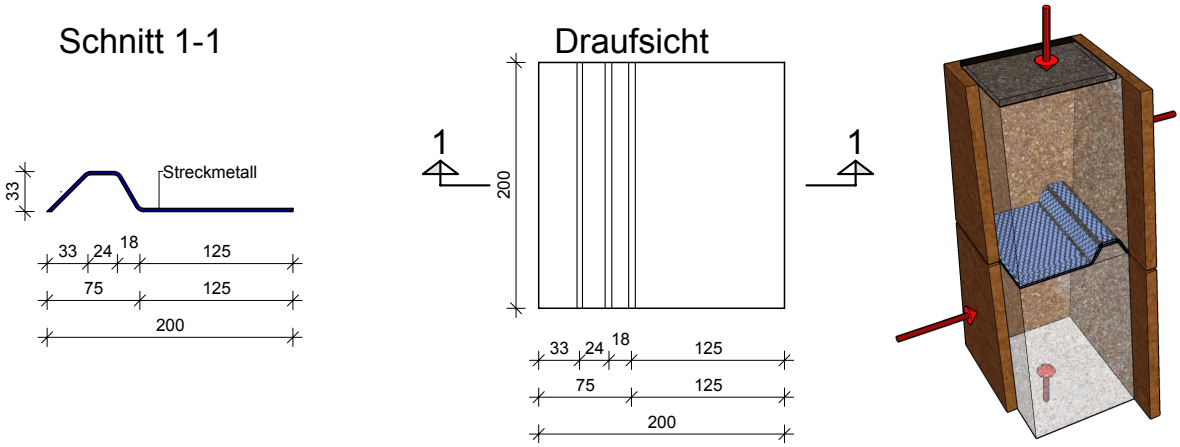


(a) (b)

Abbildung 5.5: Serie S-B: (a) Geometrie des Anschlusselements; (b) 3D - Darstellung des Scherversuchs

Serie S

Der Unterschied dieser Serie zur Serie S-B bestand einzig im Fehlen der Bewehrung, Geometrie und verwendete Materialien waren ident wie in den vorherigen Versuchen. Die Geometrie sowie eine 3D - Darstellung des Scherversuchs wird in Abbildung 5.15 gezeigt.



(a) (b)

Abbildung 5.6: Serie S: (a) Geometrie des Anschlusselements; (b) 3D - Darstellung des Scherversuchs

5.1.1.4 Prüfkonfiguration und Prüfablauf

Die in Abbildung 5.7 schematisch dargestellte Maschine diente zur Durchführung der Scherversuche.

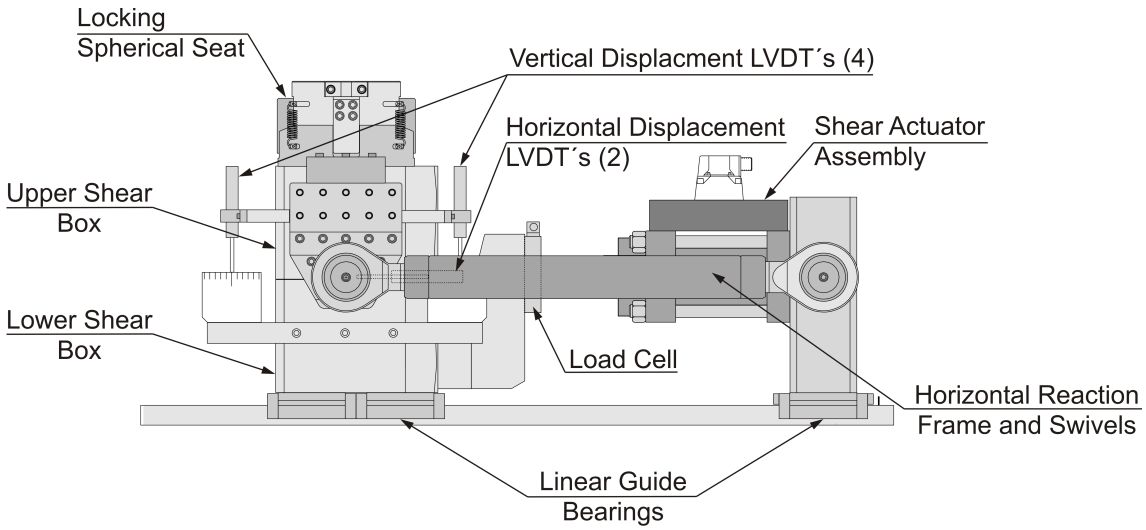


Abbildung 5.7: Prüfmaschine samt Bezeichnung (Pilgerstorfer, 2014)

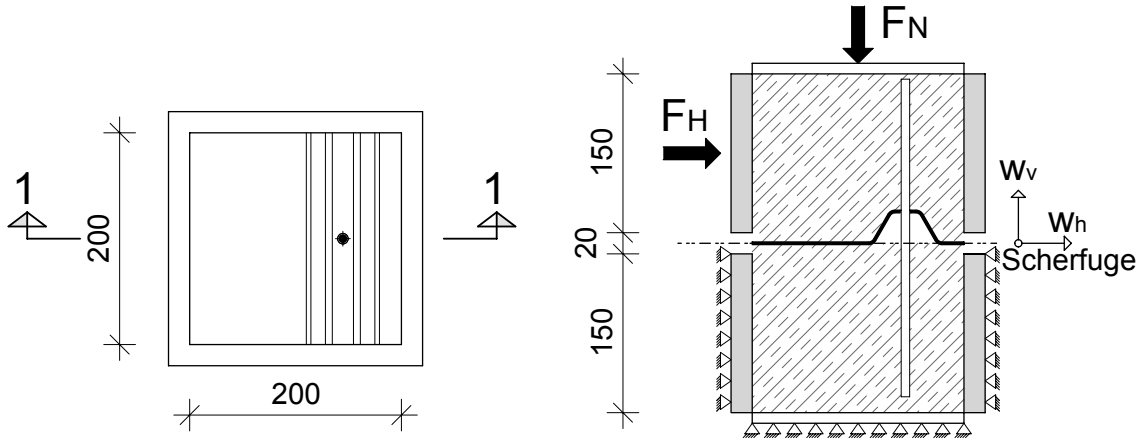
Tabelle 5.2 und Abbildung 5.8 zeigen die Prüfkonfiguration für sämtliche durchgeführten Scherversuche. Nach dem Positionieren des Prüfkörpers in der Maschine wurde eine Normalkraft F_N aufgebracht und anschließend mit einer konstanten Geschwindigkeit v horizontal bis zum Erreichen einer vordefinierten Horizontalverschiebung $w_{h,max}$ abgeschert.

Tabelle 5.2: Prüfkonfiguration der einzelnen Prüfkörper

Bezeichnung	PK - Bezeichnung	F_N [kN]	v [mm/min]	$w_{h,max}$ [mm]
Serie S-V	S-V	50	0,5	23
Serie S-B	S-B-01	80	0,5	23
	S-B-02	50		
	S-B-03			
Serie S	S-01	80	0,5	10
	S-02	50		
	S-03			

Folgende Werte wurden bei jeder Prüfung aufgezeichnet:

- Zeit t [sec]
- Horizontalkraft F_H [kN]
- Horizontalverschiebung w_h [mm]
- Vertikalverschiebung w_v [mm]



(a) Draufsicht (b) Schnitt 1-1

Abbildung 5.8: Prüfkonfiguration Scherversuch, dargestellt anhand der Serie S-V

5.1.2 Ergebnisse und Diskussion

Zumal die Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit des Anschlusselements das primäre Ziel dieser Scherversuche war, wird vorwiegend auf die anhand der Versuche ermittelte Horizontalkraft F_H eingegangen. Wobei die Kräfte vereinfacht jeweils auf die ideale Scherfläche von $a = b = 200\,mm$ bezogen werden, die Verschiebungen auf die Probenlänge von $a = 200\,mm$. Abbildung 5.9 (Schubspannungs - Dehnungs - Diagramm) und Abbildung 5.10 (Vertikalverschiebungs - Horizontalverschiebungs - Diagramm) zeigen die Prüfergebnisse der unterschiedlichen Serien. Prüfkörper mit eingebauter Bewehrung sind mit durchgezogenen Linien dargestellt (Serie S-V und Serie S-B), jene ohne eingebauter Bewehrung strichliert (Serie S). Auf die Diagramme folgend wird der Versagensmechanismus anhand des Kurvenverlaufs des Prüfkörpers S-B-01 (stellvertretend für alle weiteren) beschrieben. Anschließend werden die einzelnen Prüfserien genauer diskutiert und miteinander verglichen.

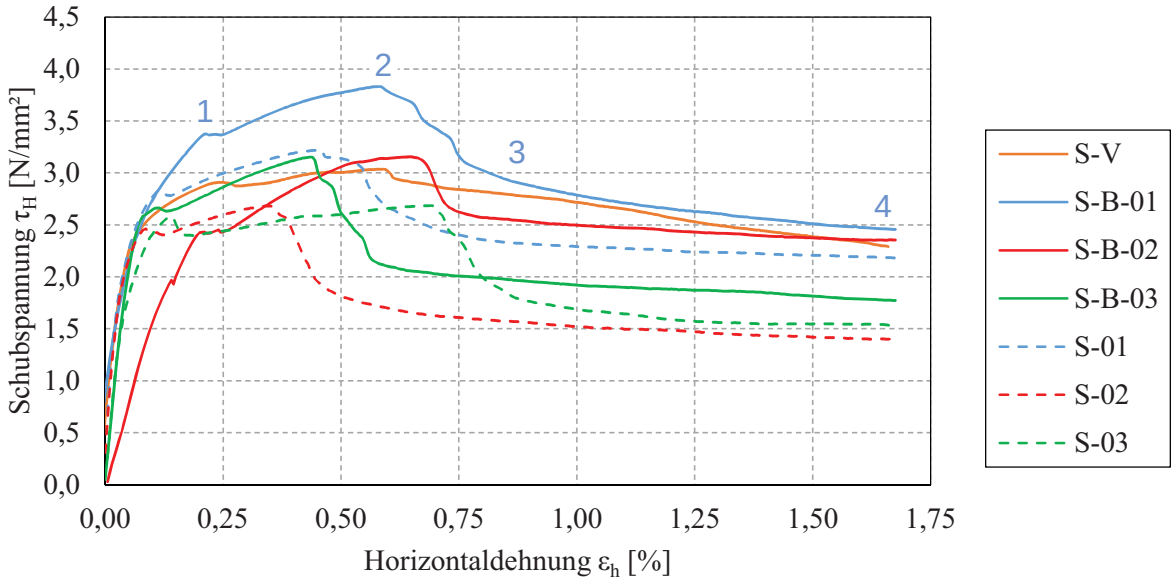


Abbildung 5.9: τ_H - ϵ_h - Diagramm, Vergleich der Serien S, S-B und S-V

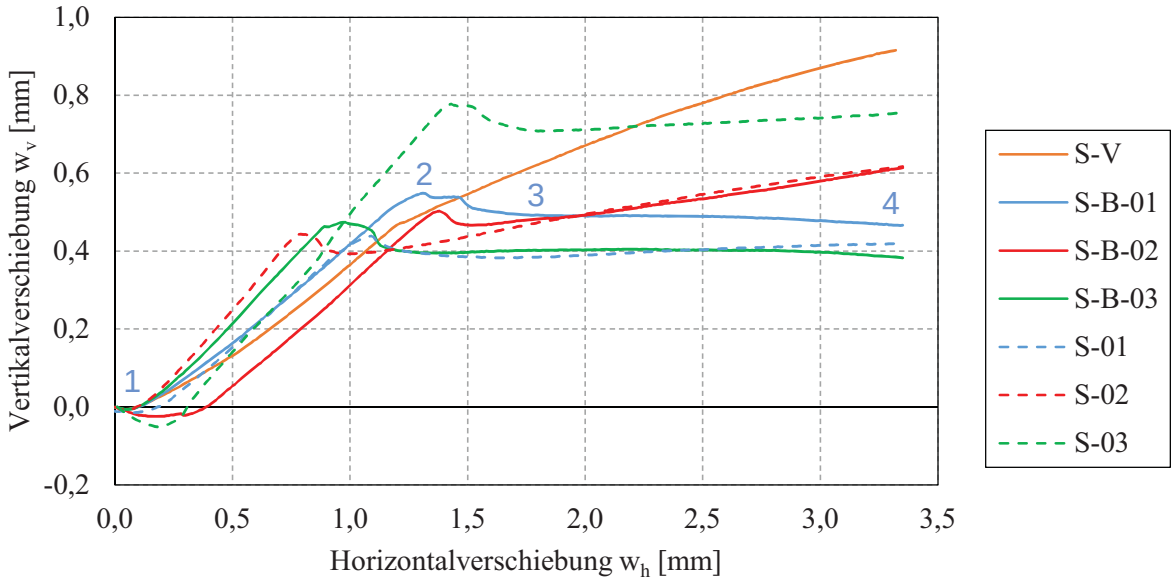


Abbildung 5.10: w_v - w_h - Diagramm, Vergleich der Serien S, S-B und S-V

5.1.2.1 Beschreibung des Versagensmechanismus

Am Beispiel des Prüfkörpers S-B-01 wird anhand von vier markanten Punkten im Kurvenverlauf (dargestellt in Abbildung 5.9 und Abbildung 5.10) der Versagensmechanismus stellvertretend für alle Prüfkörper genauer erläutert.

- **Punkt 1:** Bis zum Erreichen dieses Punktes nimmt die aufgebrachte Horizontalkraft stetig zu (Abbildung 5.9). Es folgt ein Versagen des Verbundes zwischen Streckmetall und Beton.

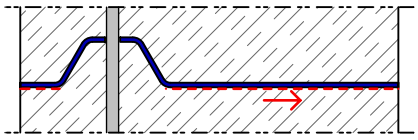


Abbildung 5.11: Versagen des Verbundes zwischen Streckmetall und Beton (rot)

- **Punkt 2:** Nach Überschreiten von Punkt 1, kann wie in Abbildung 5.10 zu erkennen ist, ein dilatantes Verhalten aufgrund des Aufgleitens entlang der „Schubknagge“ beobachtet werden. Die aufnehmbare Horizontalkraft nimmt dabei weiter zu, da neben der Reibung zwischen Streckmetall und Beton die „Schubknagge“ zusätzliche Kräfte aufnimmt. Weiters erhöht sich mit steigender Relativverschiebung der Einfluss der Bewehrung (Serie S-B). Bei Erreichen von Punkt 2 kommt es zum Versagen des Betons

der „Schubknagge“ und daher zu einem deutlichen Kraftabfall.

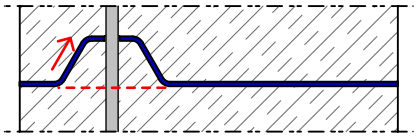


Abbildung 5.12: Aufgleiten entlang der „Schubknagge“ mit anschließendem Versagen des Betons in diesem Bereich (rot)

- **Punkt 3:** Ab diesem Zeitpunkt schert der Prüfkörper entlang einer sich einstellenden Scherfuge ab. Die Horizontalkräfte werden über Reibung, sowie im Fall der Serie S-B von der Bewehrung aufgenommen. Aufgrund des nicht exakt horizontal eingebauten Streckmetalls kann an manchen Prüfkörpern weiterhin Dilatanz bzw. Kontraktanz beobachtet werden.

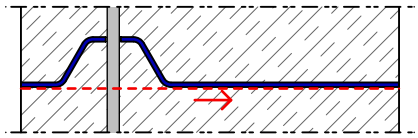


Abbildung 5.13: Gleichmäßiges abscheren entlang der Scherfuge (rot)

- **Punkt 4:** Es gibt nur mehr geringe Änderungen im Verhalten und es stellt sich eine Restscherkraft $F_{H,res}$ ein.

5.1.2.2 Vergleich der Prüfserien

Serie: S-V und S-B

Serie S-V und Serie S-B sind jeweils mit einer Bewehrung versehen und werden daher zusammengefasst dargestellt. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass es Unterschiede in der Geometrie und der verwendeten Bewehrung gibt. In Tabelle 5.3 sind die Ergebnisse der einzelnen Prüfkörper aufgelistet. Dabei sind neben der maximalen Schubspannung $\tau_{H,max}$, weitere, während des Prüfvorgangs aufgezeichnete Messgrößen dargestellt.

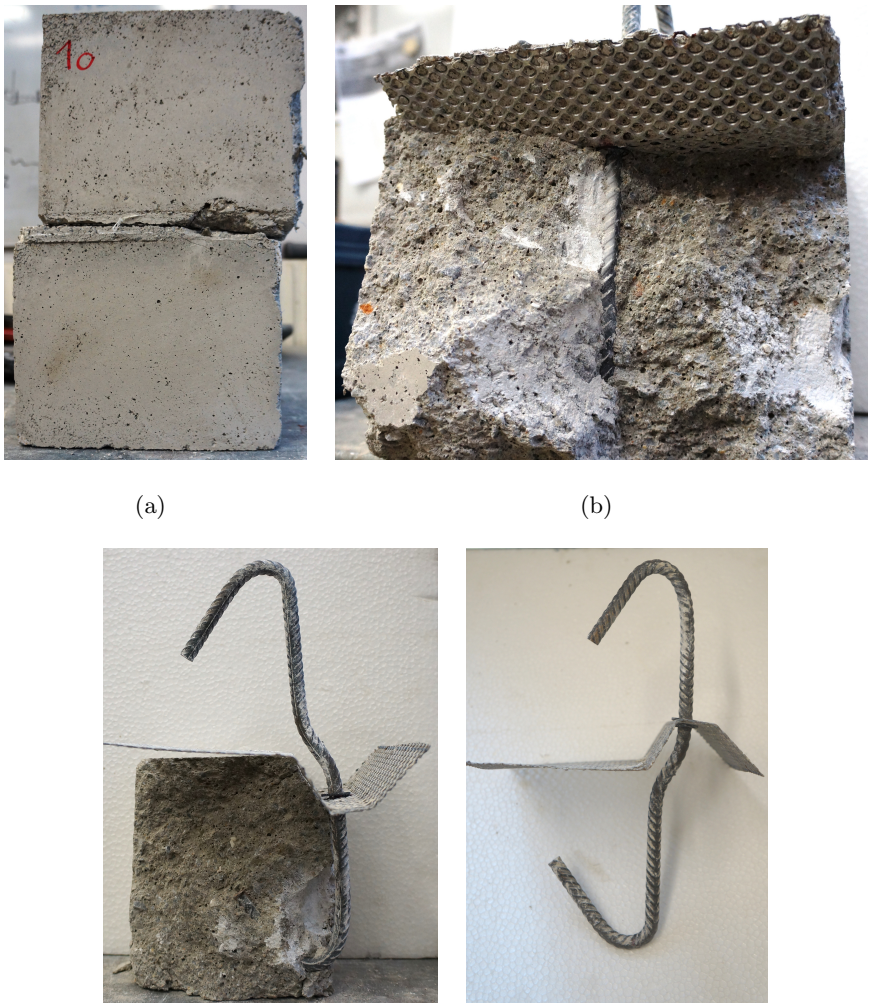
Tabelle 5.3: Ergebnisse, Serie S-V und S-B

PK-Bez.	$F_{N,max}$ [kN]	$\sigma_{N,max}$ [1)] [N/mm²]	$F_{H,max}$ [kN]	$\tau_{H,max}$ [1)] **[N/mm²]**	$w_{h,Fmax}$ [mm]	$F_{H,res}$ [kN]	$\tau_{H,res}$ [1)] [N/mm²]
S-V	50	1,25	121	**3,04**	1,18	44	1,10
S-B-01	80	2,00	153	**3,83**	1,16	95	2,39
S-B-02	50	1,25	126	**3,15**	1,29	87	2,17
S-B-03	50	1,25	126	**3,15**	0,87	75	1,86

[1)] ... aus Kräften errechnete Spannungen, bezogen auf die Scherfläche 200 x 200 mm

Vergleicht man die Spannungs - Dehnungs - Kurven der einzelnen Prüfkörper (Abbildung 5.9) ist ein durchaus ähnliches Verhalten bei allen Prüfkörpern festzustellen. Der Unterschied zwischen der Serie S-V und S-B ist auf eine unzureichende Verankerung der Bewehrung der Serie S-V zurückzuführen. Es kam zum Versagen des Verbundes zwischen Beton und eingelegter Bewehrung, wodurch ein Vergleich nach Erreichen der maximalen Schubspannung nicht zweckmäßig ist. Mit Erhöhung der Normalspannung (S-B-01, $\sigma_N = 2{,}0\,N/mm^2$) nimmt sowohl $\tau_{H,max}$ wie auch $\tau_{H,res}$ aufgrund eines Anstiegs der Reibungskomponente zu. Bei sämtlichen Prüfkörpern wird die maximal aufnehmbare Schubspannung bei einer Horizontalverschiebung im Bereich $\epsilon_h = 0{,}35$ - $0{,}7\,\%$ ($w_h = 0{,}5$ - $1{,}5\,mm$) erreicht. Der markante Unterschied der Restscherfestigkeit der beiden ident geprüften Proben S-B-02 und S-B-03 ist auf ein geneigt eingebautes Streckmetall (siehe Abbildung 5.10, stark dilatantes Verhalten) im Prüfkörper S-B-02 zurückzuführen.

Abbildung 5.14 zeigt ein repräsentatives Bruchbild der Serie S-B. Durch die vorgegebene Scherfuge tritt das Versagen stets im Bereich des eingelegten Streckmetalls 5.14, a) ein. Die Bewehrung wurde nach der Versuchsdurchführung freigelegt, um mögliche Einflüsse auf die Ergebnisse festzustellen. In Abbildung 5.14, b) - c) ist weiters die gute Lösbarkeit zwischen Beton und Streckmetall ersichtlich, d) zeigt das freigelegte Anschlusselement mit verformter Bewehrung.



(a) (b)

(c) (d)

Abbildung 5.14: Repräsentatives Bruchbild der Serie S-B

Serie: S

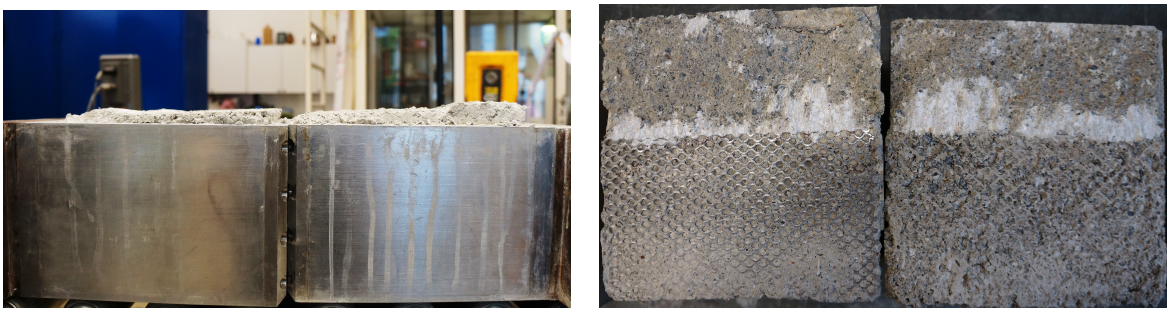
In Tabelle 5.4 sind die Ergebnisse der einzelnen Prüfkörper ohne Bewehrung aufgelistet. Dabei sind neben der maximalen Schubspannung $\tau_{H,max}$, weitere während des Prüfvorgangs aufgezeichnete Messgrößen dargestellt.

Tabelle 5.4: Ergebnisse, Serie S

PK-Bez.	$F_{N,max}$ [kN]	$\sigma_{N,max}$ [1)] [N/mm²]	$F_{H,max}$ [kN]	$\tau_{H,max}$ [1)] **[N/mm²]**	$w_{h,Fmax}$ [mm]	$F_{H,res}$ [kN]	$\tau_{H,res}$ [1)] [N/mm²]
S-01	80	2,00	129	**3,22**	0,91	71	1,78
S-02	50	1,25	107	**2,68**	0,69	49	1,22
S-03	50	1,25	107	**2,68**	1,38	46	1,16

[1)] ... aus Kräften errechnete Spannungen, bezogen auf die Scherfläche 200 x 200 mm

Für diese Serie (strichliert dargestellt in Abbildung 5.9 und Abbildung 5.10) gilt ähnliches wie für die zuvor beschriebene, allerdings auf einem geringeren Spannungsniveau. Im Allgemeinen kann aufgrund des Fehlens der Bewehrung ein etwas spröderes Verhalten beobachtet werden. Abbildung 5.14 zeigt ein repräsentatives Bruchbild der Serie S. Auch hier tritt durch die vorgegebene Scherfuge das Versagen immer im Bereich des eingelegten Streckmetalls ein.



(a) Seitenansicht des Prüfkörpers in der Scherbox

(b) Draufsicht auf die Bruchfläche, abgescherte „Schubknagge“

Abbildung 5.15: Repräsentatives Bruchbild der Serie S

Diskussion der σ_N - τ_H - Diagramme

Anhand der folgenden Diagramme (Abbildung 5.16 und Abbildung 5.17) soll der Einfluss der Normalspannung auf die aufnehmbare Schubspannung und damit auf die Querkrafttragfähigkeit des Anschlusselements gezeigt werden. Wobei anzumerken ist, dass die Ergebnisse ausschließlich für die hier verwendete Geometrie und somit für Spritzbetonstärken von $d_s = 20\,cm$ gelten. Die Auswertung liegt einem Mohr - Coulomb - Versagenskriterium zugrunde, erfolgte anhand von nur jeweils drei Prüfkörpern (S-B-02 und S-B-03 bzw. S-02 S-03 wurden gemittelt) und sollte daher eher als qualitative Beschreibung gesehen werden. Vergleicht man die Prüfkörper S-B-01 und S-01, welche jeweils mit einer Normalspannung $\sigma_N = 2{,}0\,N/mm^2$ beaufschlagt wurden, ergibt sich eine Erhöhung von $\tau_{H,max} = 3{,}22\,N/mm^2$ auf $\tau_{H,max} = 3{,}83\,N/mm^2$ bei Prüfkörpern mit eingelegter Bewehrung. Dies entspricht einem Anstieg von $\approx 20\,\%$. Bezieht man den Wert des Prüfkörpers S-B-01 auf die Länge von 1 m Spritzbetonschale, so entspricht dies einer maximal aufnehmbaren Querkraft von 766 kN/m. Vorausgesetzt der Einbau des Anschlusselements wird sachgerecht und ähnlich den im Labor hergestellten Prüfkörpern ausgeführt. Der Ausnutzungsgrad der Druckfestigkeit des Betons liegt bei den durchgeführten Prüfungen bei $\approx 10 - 15\,\%$. Bei den in der Praxis üblichen Ausnutzungsgraden von bis zu 70 % würde sich die aufnehmbare Querkraft aufgrund einer Zunahme der Reibungskomponente weiter erhöhen.

Abbildung 5.16 zeigt die Beziehung zwischen aufgebrachter Normalspannung σ_N und aufnehmbarer Schubspannung τ_H der Serie S-B, Abbildung 5.17 jene der Serie S. Die beiden rote Linien zeigen jeweils die Werte der maximal aufnehmbaren Schubspannung $\tau_{H,max}$, die blauen jene der Resttragfähigkeit $\tau_{H,res}$. Vergleicht man die beiden Geraden des Maximalwertes (rot) der beiden Prüfserien, so ist zu erkennen, dass die „scheinbare Kohäsion“ c_1 in etwa auf gleichem Niveau zu liegen kommt. Ein Grund dafür könnte sein, dass wegen der geringen Relativverschiebungen die Bewehrung noch nicht so ausgeprägt wirkt und daher die Unterschiede klein sind. Verglichen dazu unterscheiden sich die Werte der „scheinbaren Kohäsion“ c_2 im Falle der Restscherfestigkeit deutlich, zumal bei der Serie S ausschließlich die Reibung Einfluss hat. Verglichen dazu, wirkt bei der Serie S-B die Bewehrung mit steigender Verschiebungen stark mit. Aufgrund der geringen Probenanzahl ist es allerdings schwierig, genauere Aussagen bezüglich der sich einstellenden Reibungswinkel (Φ_{peak} und Φ_{res}) zu tätigen.
Zusammenfassend kann gesagt werden, dass durch den Einbau einer Bewehrung die Querkrafttragfähigkeit deutlich zunimmt. Weiters kann nicht davon ausgegangen werden, dass die „Schubknagge“ im Baustellenbetrieb entsprechend den Laborbedingung wirkt und daher der

Bewehrung eine zusätzliche Bedeutung beigemessen werden muss.

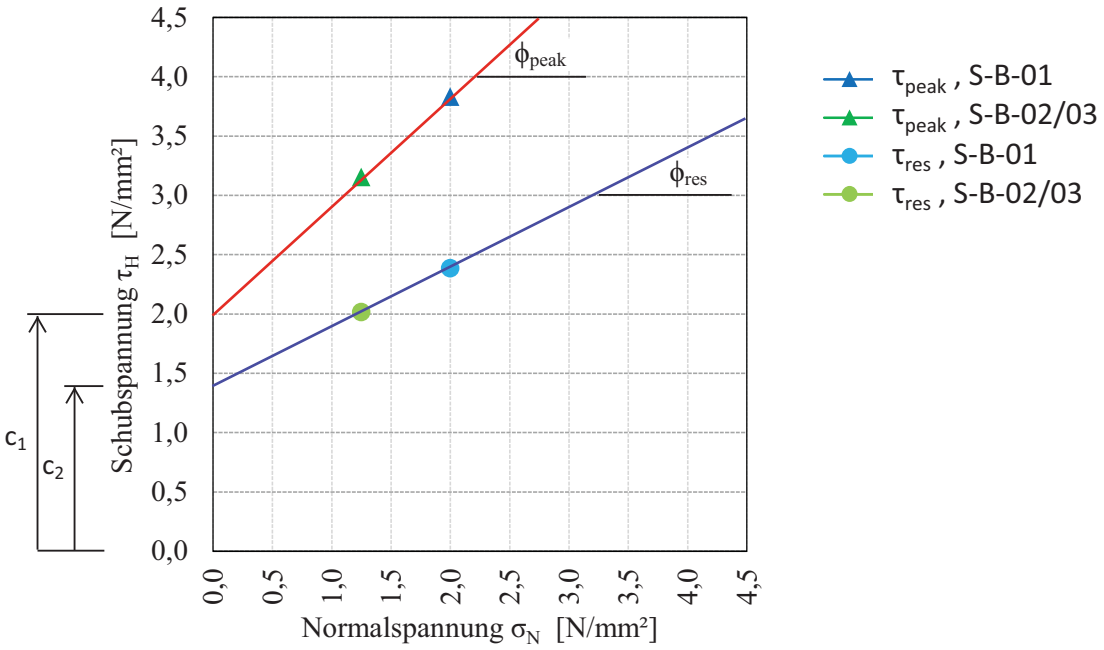


Abbildung 5.16: τ_H - σ_N - Diagramm der Serie S-B

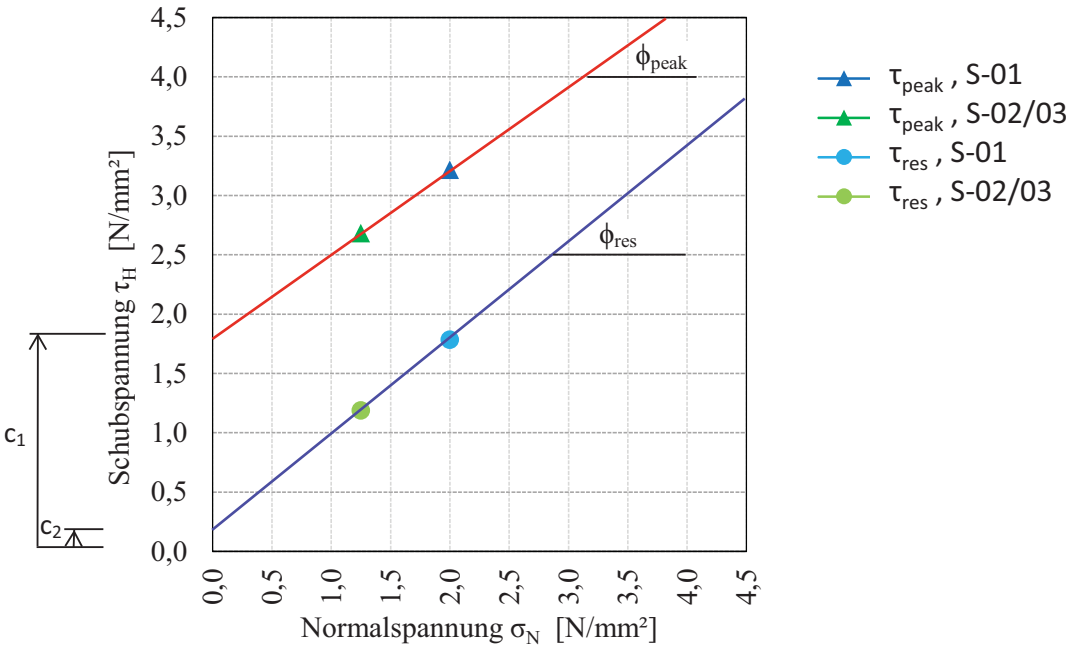


Abbildung 5.17: τ_H - σ_N - Diagramm der Serie S

5.2 Versuche zur Lösbarkeit

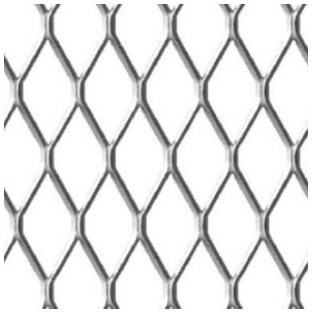
Mit den Versuchen zur Lösbarkeit des Betons mit eingelegtem Streckmetall sollten qualitativ die Unterschiede bei der Verwendung verschiedener Maschenweiten untersucht werden.

5.2.1 Material und Methodik

5.2.1.1 Allgemein

Ziel der Versuche war es, die Lösbarkeit des Betons beim Einbau von Streckmetall mit fünf unterschiedlichen Maschenweiten festzustellen. Abbildung 5.18 zeigt jene Streckmetalle, welche in die Prüfkörper eingebaut wurden. Dabei ging es primär nicht um die quantitativen Ergebnisse, sondern vielmehr um die qualitativen Unterschiede, sowie die sich ergebenden Bruchflächen.

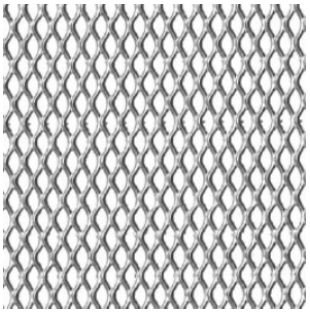
(a) PK1: Raute 30 x 17 x 2,5



(b) PK2: Raute 28 x 13 x 1,5

(c) PK3: Raute 20 x 10 x 2

(d) PK4: Raute 16 x 8 x 1,5



(e) PK5: Raute 4 x 4 x 1

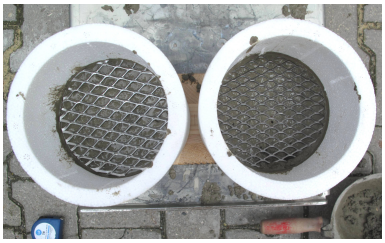
Abbildung 5.18: Darstellung der Streckmetalle mit den verwendeten Maschenweiten [Maße in mm]

5.2.1.2 Geometrie und Herstellung der Prüfkörper

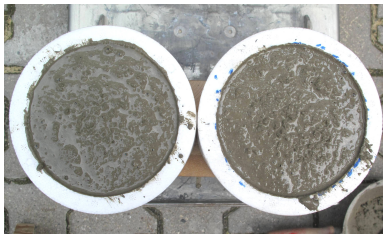
Die Herstellung der Prüfkörper erfolgte im institutsinternen Labor. Als Beton diente ein Trockenbeton der Firma Baumit Baustoffe GmbH, Bad Ischl (Österreich) der Festigkeitsklasse C 16/20. Der Einbau des Streckmetalls erfolgte vollflächig und auf halber Höhe des Prüfkörpers. Die einzelnen Herstellungsschritte werden in Abbildung 5.19 beschrieben. Zur Durchführung des Versuchs war es notwendig, beidseitig Gewindestangen M10 mit zusätzlichen Beilagscheiben (zur Erhöhung des Ausziehwiderstandes) mit einzubetonieren (siehe Abbildung 5.19, f)).

(a) Schalung samt Gewindestange

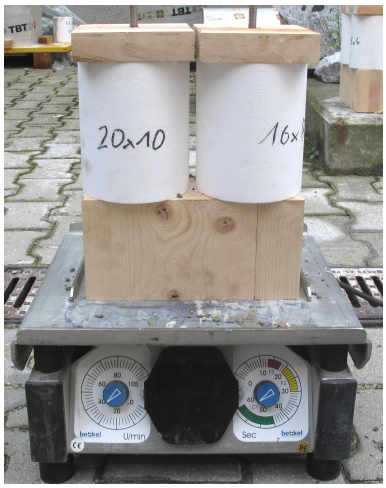
(b) Befüllen der Schalung mit Beton bis auf halbe Höhe



(c) Einlegen des Streckmetalls



(d) Befüllen der Schalung bis Oberkante



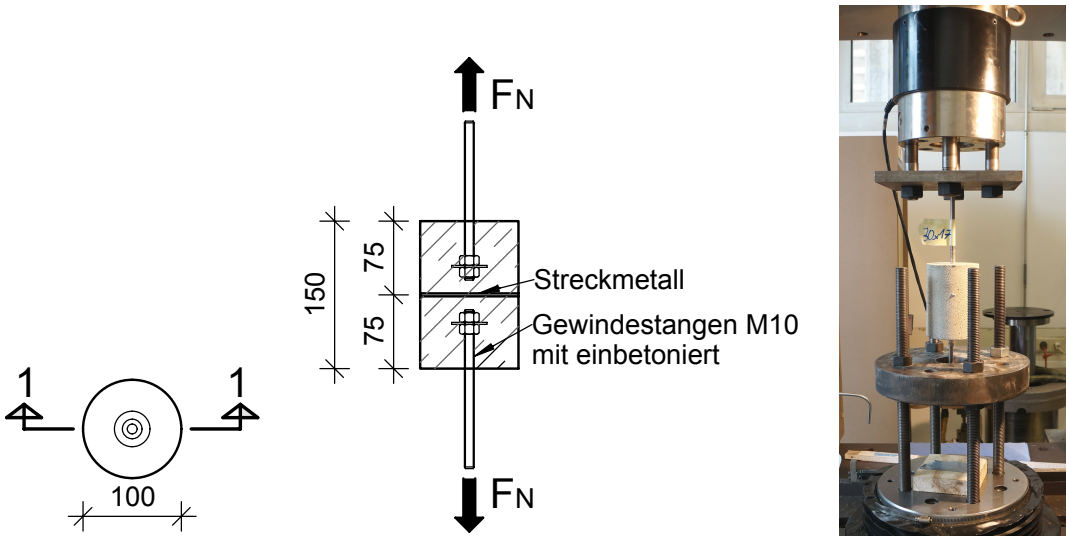
(e) Prüfkörper zur Verdichtung am Rütteltisch

(f) Fertiger Prüfkörper

Abbildung 5.19: Herstellung der Prüfkörper

5.2.1.3 Prüfkonfiguration und Prüfablauf

Die Lösbarkeit des Betons wurde anhand eines Zugversuchs ermittelt. Die Kraftaufbringung erfolgte über einbetonierte Gewindestangen. Abbildung 5.20 zeigt die Prüfkonfiguration und Abmessungen der Prüfkörper sowie einen in der Prüfmaschine eingebauten Prüfkörper. Nach dem Einbau des Prüfkörpers wurde die Kraft mit konstanter Geschwindigkeit bis zum Versagen des Prüfkörpers gesteigert. Dabei wurden sowohl Kraft F_N und Weg in vertikaler Richtung aufgezeichnet.

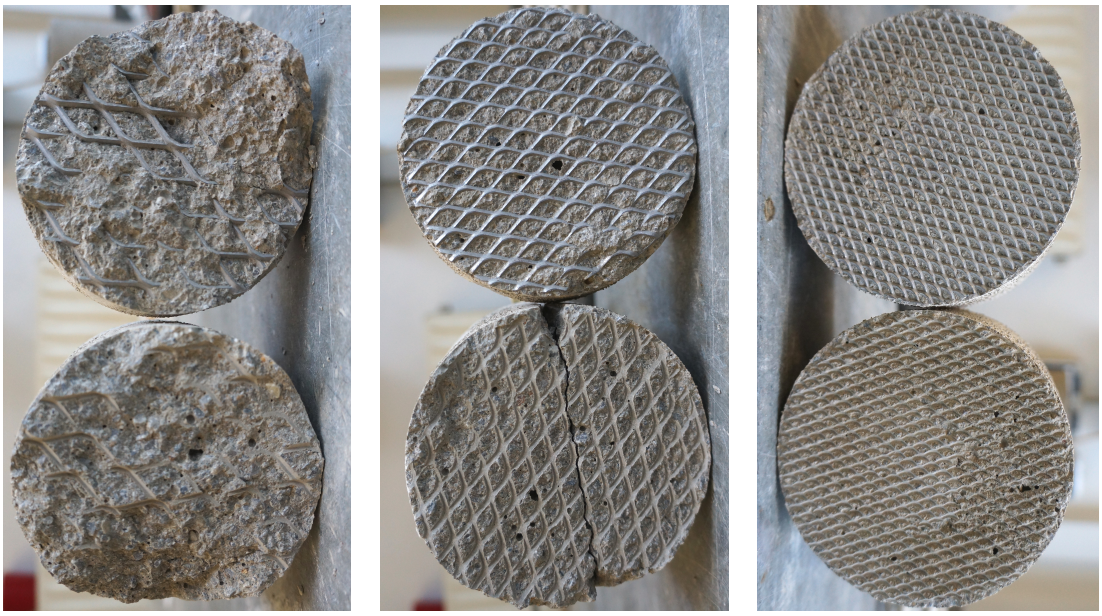


(a) Draufsicht (b) Schnitt 1-1 (c) Eingespannter Prüfkörper

Abbildung 5.20: Prüfkonfiguration Lösbarkeit des Betons

5.2.2 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der Prüfungen sind anhand der Bruchflächen der Prüfkörper in Abbildung 5.21 dargestellt. Im Allgemeinen ist zu erkennen: je geringer die Maschenweite des Streckmetalls, desto exakter die Bruchfläche. Weiters sinkt mit geringer werdender Maschenweite die zum Erreichen des Versagens benötigte Zugkraft in der „Trennschicht“. Als grobe Abschätzung gilt, dass keine exakte Bruchfläche erzielt werden kann, sobald die Maschenweite den Durchmesser des Größtkorns übersteigt (bzw. ab Maschenweiten von $\approx 20 \times 10$ mm). Der Bruch tritt nicht mehr ausschließlich in der „Trennschicht“ auf, wodurch keine gleichmäßige Bruchfläche erreicht wird. Daher sind Streckmetalle mit zu großen Maschenweiten nicht für den Einsatz als „Trennschicht“ für das Anschlusselement geeignet.



(a) PK1: Raute 30 x 17 x 2,5 (b) PK4: Raute 16 x 8 x 1,5 (c) PK5: Raute 4 x 4 x 1

Abbildung 5.21: Bruchflächen von drei ausgewählten Prüfkörpern [Maße in mm]

6 Einsatz des Elements im Baustellenbetrieb

In diesem Kapitel wird die Verwendung, des im Zuge der vorliegenden Arbeit entwickelten, Anschlusselements im Baustellenbetrieb näher erläutert. Auf eine Beschreibung des Anschlusselements folgen eine schematische Darstellung des Einbauvorgangs mit den einzelnen Arbeitsschritten sowie die Dokumentation der Verwendung auf der Tunnelbaustelle anhand von Bildern. Weiters werden die Erkenntnisse, welche sich beim Gebrauch in der Praxis herausstellten, diskutiert.

6.1 Allgemein

Das Anschlusselement wurde im „Tunnel Stein“, einem Teil der „Tunnelkette St. Kanzian“ (Teilabschnitt der Hochleistungsstrecke Graz-Klagenfurt), eingebaut und auf die Baustellentauglichkeit getestet. Der 2,1 km lange Tunnel befindet sich im Lockergestein mit geringer Überlagerung und wird konventionell aufgefahren. Großteils wird maschinell mit Bagger vorgetrieben, kurze Abschnitte mittels Sprengvortrieb bzw. Fräsen. Zumal ein Vollausbruch aufgrund der geologischen Verhältnisse nicht möglich ist, kommt ein Kalotten - Strossen - Vortrieb (in Teilabschnitten mit Kalottensohle und Fußverbreiterung) zum Einsatz (Abbildung 6.1).

Abbildung 6.1: Kalotten - Strossen - Vortrieb des „Tunnel Stein“

6.1.1 Beschreibung des Elements

Infolge baustellenspezifischer Gegebenheiten (Spritzbetonstärke, Abschlagslänge, etc.) unterscheidet sich das verwendete Anschlusselement in der Geometrie, den verwendeten Materialien sowie der Herstellung etwas von jenem in Kapitel 4.3 beschriebenen und wird daher nochmals gesondert angeführt (Abbildung 6.2). Als „Trennschicht“ dient ein gewalztes Streckmetall aus Stahl mit rautenförmigen Maschen 10 x 6 mm und einer Materialdicke von 1 mm. Als Bewehrung wurde BSt 550, Ø 10 mm mit einem Abstand von 15 cm versetzt angeordnet. Anstatt der Klemmringe erfolgte hierbei die Befestigung der Anschlussbewehrung in den bereits vorgebohrten Löchern des Streckmetalls sowie der Längsbewehrung zur Aussteifung mit einem Draht.

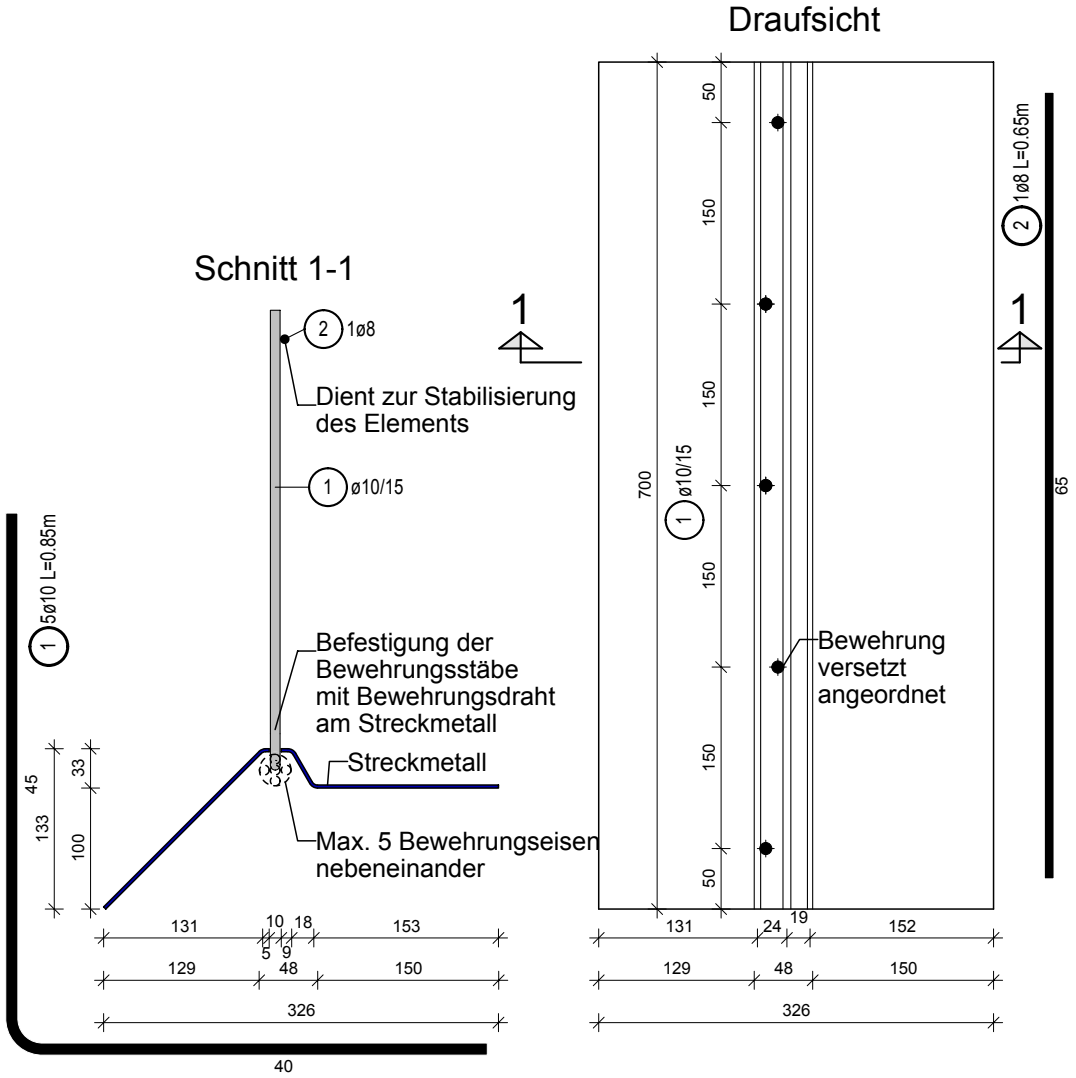


Abbildung 6.2: Geometrie des auf der Baustelle verwendeten Anschlusselements

Zumal in Teilabschnitten der Einbau einer temporären Kalottensohle notwendig ist, wird hier zusätzlich dass in Abbildung 6.3 dargestellte Element benötigt. Dieses dient als Anschlussbewehrung zur Verbindung der Spritzbetonschale der Kalotte und jener der temporären Kalottensohle und wurde gleichzeitig mit dem Anschlusselement eingebaut.

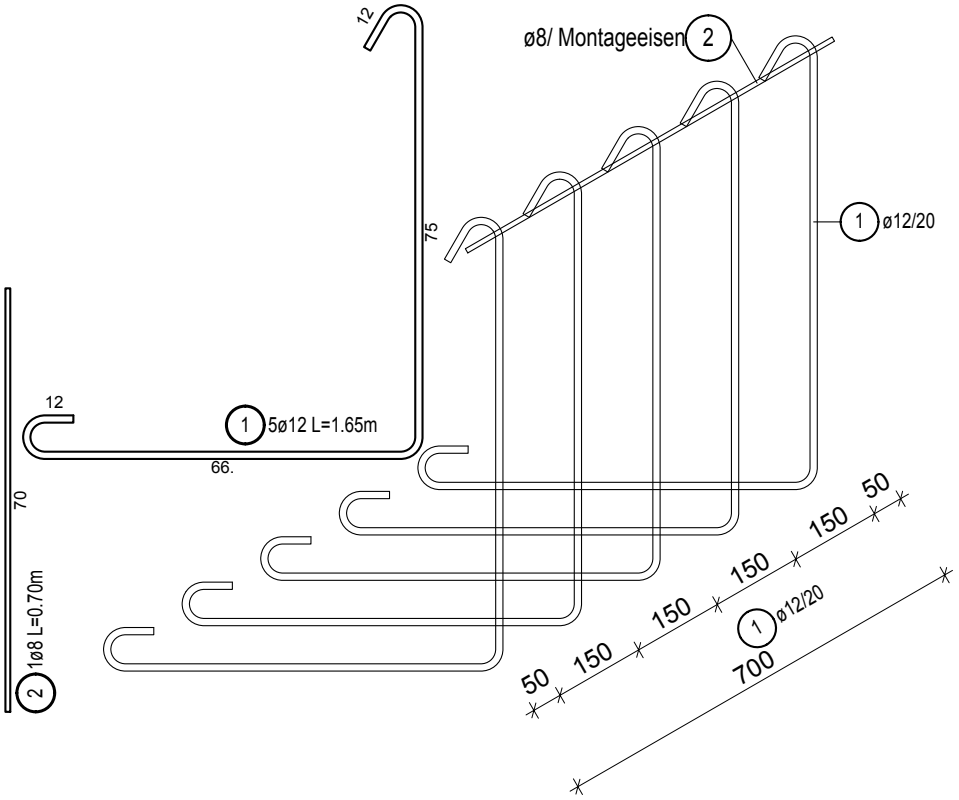
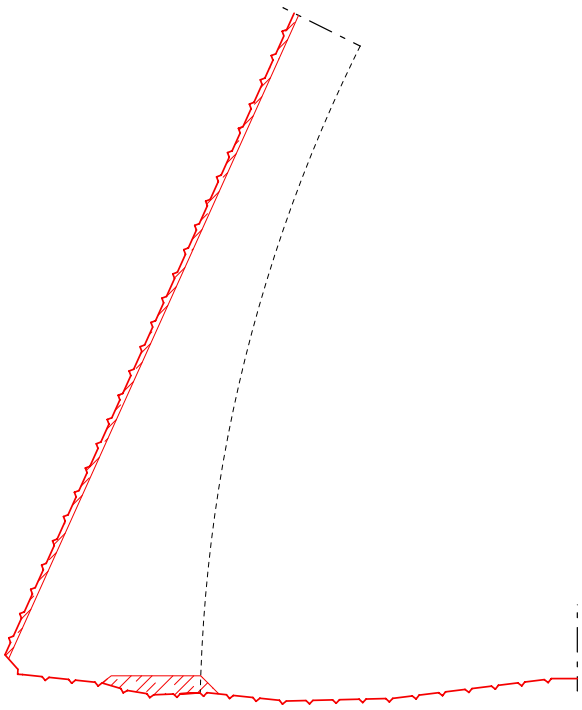


Abbildung 6.3: Anschlussbewehrung für die temporäre Kalottensohle

6.1.2 Arbeitsschritte in der Theorie

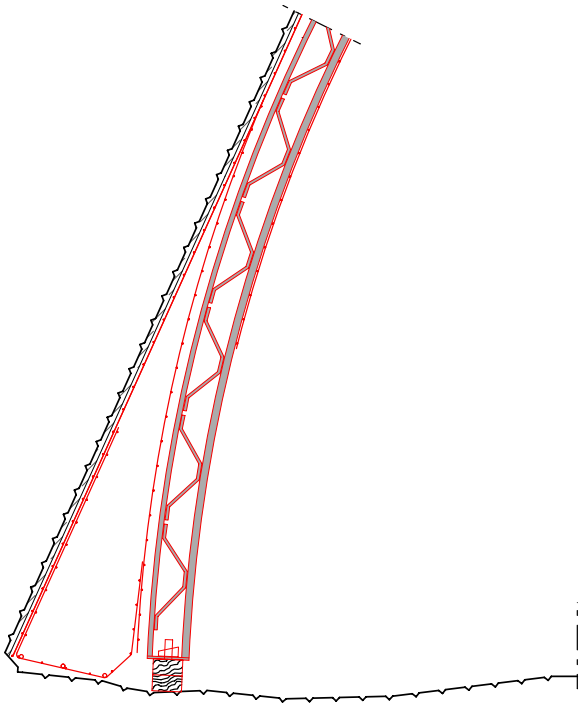
Die folgenden Darstellungen (Abbildung 6.4) zeigen die Arbeitsvorgänge eines Kalotte-Strossen-Vortriebs mit temporärer Kalottensohle und eine Beschreibung der einzelnen Arbeitsschritte (jeweils in rot dargestellt). Eine Beschreibung des Einbaus im Baustellenbetrieb folgt in Kapitel 6.3.

Abbildung 6.4: Übersicht der einzelnen Arbeitsschritte, mit Fußverbreiterung



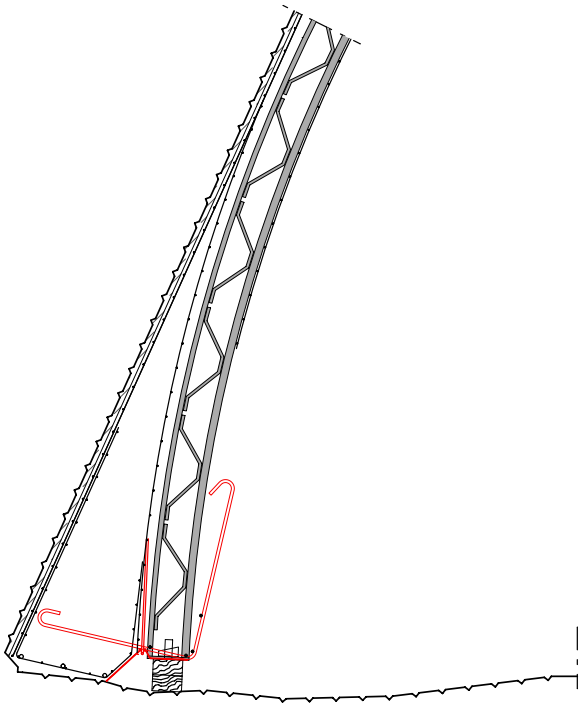
Ausbruch, Kalotte:

- Ausbruch der Kalotte mit Fußverbreiterung
- Vorspritzen der Laibung sowie eines Spritzbeton - Auflagers bei besonders schlechten Untergrundverhältnissen



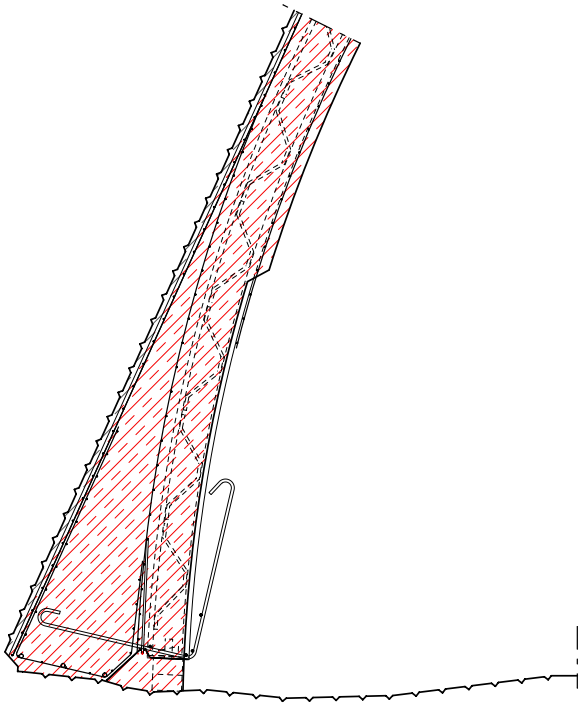
Einbau Ausbaubogen + Bewehrung:

- Einbau der Bewehrung des Kalottenfußes
- Einbau der Bewehrung bergseitig
- Einbau der Stahlgitterbögen; diese werden auf max. 2 NF-Ziegeln gelagert
- Einbau der Bewehrung hohlraumseitig (im oberen Bereich)



Einbau Anschlusselemente:

- Einbau „Anschlusselement Strosse“; wird auf Höhe des Ausbaubogenfußes in die bergseitige Bewehrungsmatte eingebunden
- Einbau „Anschlusselement Kalottensohle“; wird von vorne durch die bergseitige Bewehrungsmatte geschoben und im vorderen Bereich auf das „Anschlusselement Strosse“ gestellt. Anschließend wird die Bewehrungsmatte mit Draht an das Anschlusselement gebunden. Damit wird die nötige Steifigkeit beim Einspritzvorgang gewährleistet.

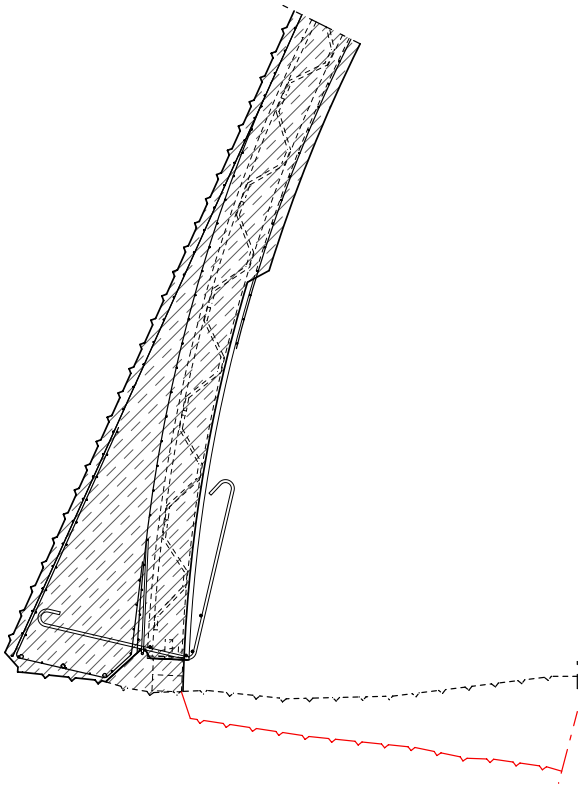


Herstellen der Spritzbetonschale, Kalotte:

- Herstellen der Spritzbetonschale
- Anschlusselement satt mit Spritzbeton hinterfüllen

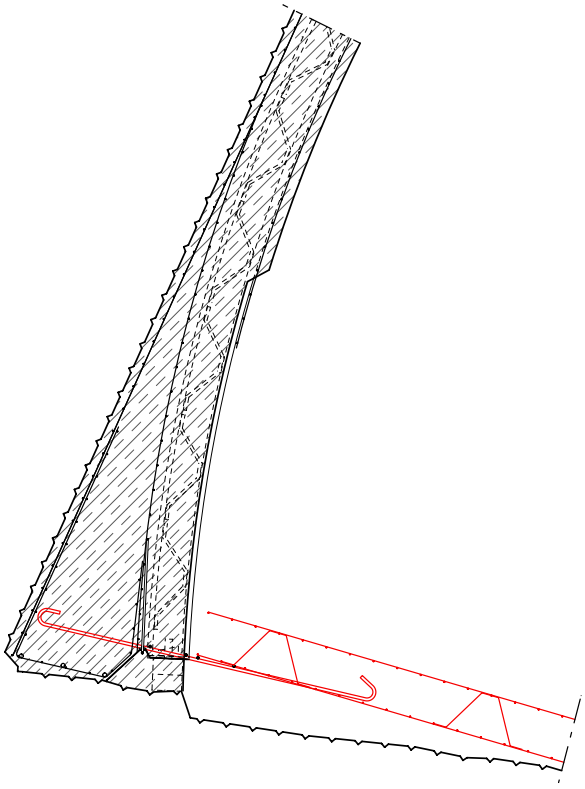
  Schritt 1: „Anschlusselement“ tief und satt „unterspritzen“

  Schritt 2: „Anschlusselement“ von möglichst hoch und satt „hinterspritzen“



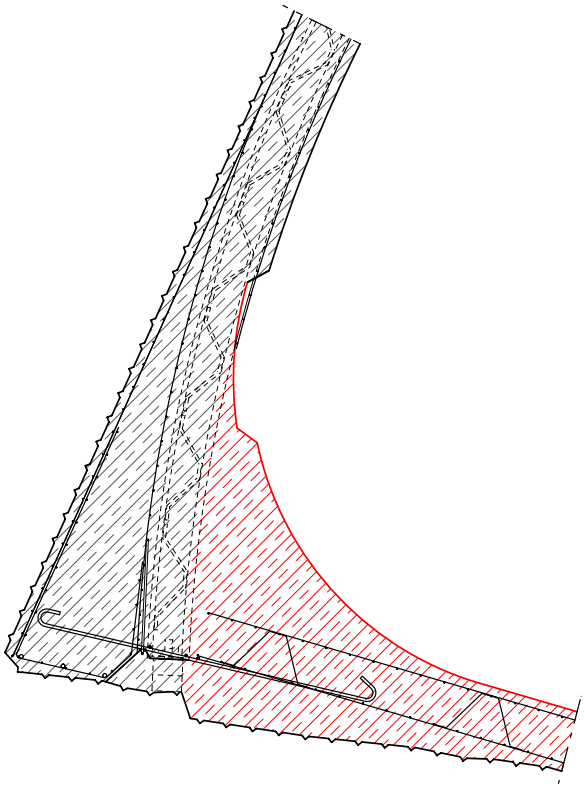
Ausbruch, Kalottensohle:

- Ausbruch Kalottensohle; Bereich unter dem Anschlusselement wird nicht mit ausgebrochen



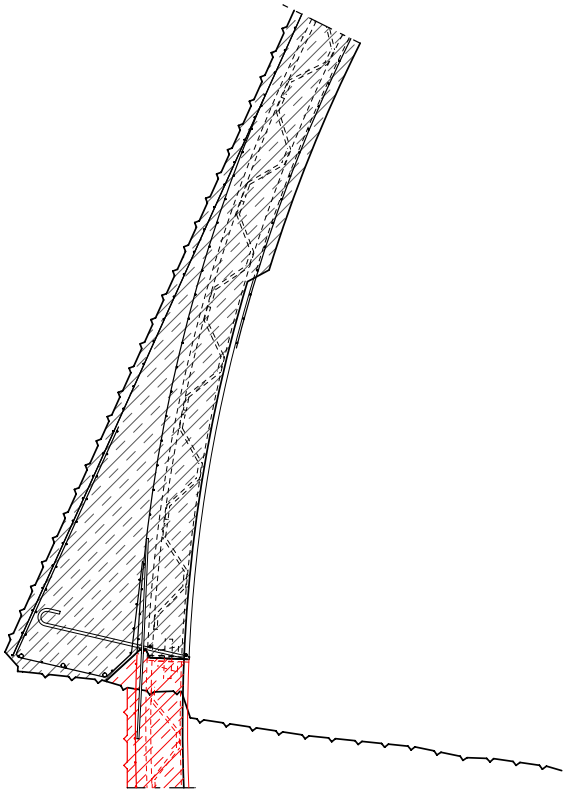
Einbau Bewehrung, Kalottensohle:

- Anschlussbewehrung für Kalottensohle nach unten biegen
- Einlegen der Bewehrung in der Kalottensohle bergseitig und hohlraumseitig



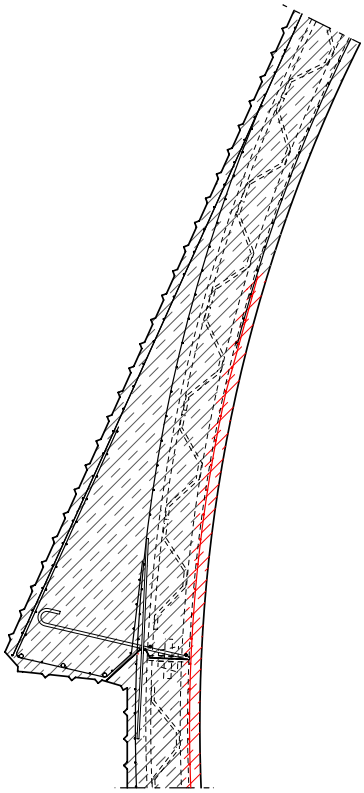
Herstellen der Spritzbetonschale, Kalottensohle:

- Herstellen der Spritzbetonschale der Kalottensohle



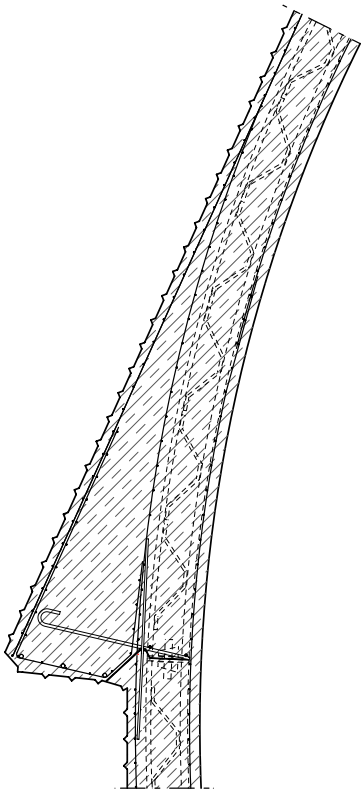
Ausbruch, Kalottensohle + Bewehrung, Strosse:

- Abbruch des Kalottensohlgewölbes
- Einlegen der Bewehrung, bergseitig Strosse
- Anschlussbewehrung des „Anschlusselements Strosse“ nach unten biegen
- Einbau der Ausbaubögen in der Strosse
- Einspritzen der Bewehrung und Ausbaubögen, bergseitig Strosse



Spritzbetonschale 2. Lage, Strosse + Kalotte:

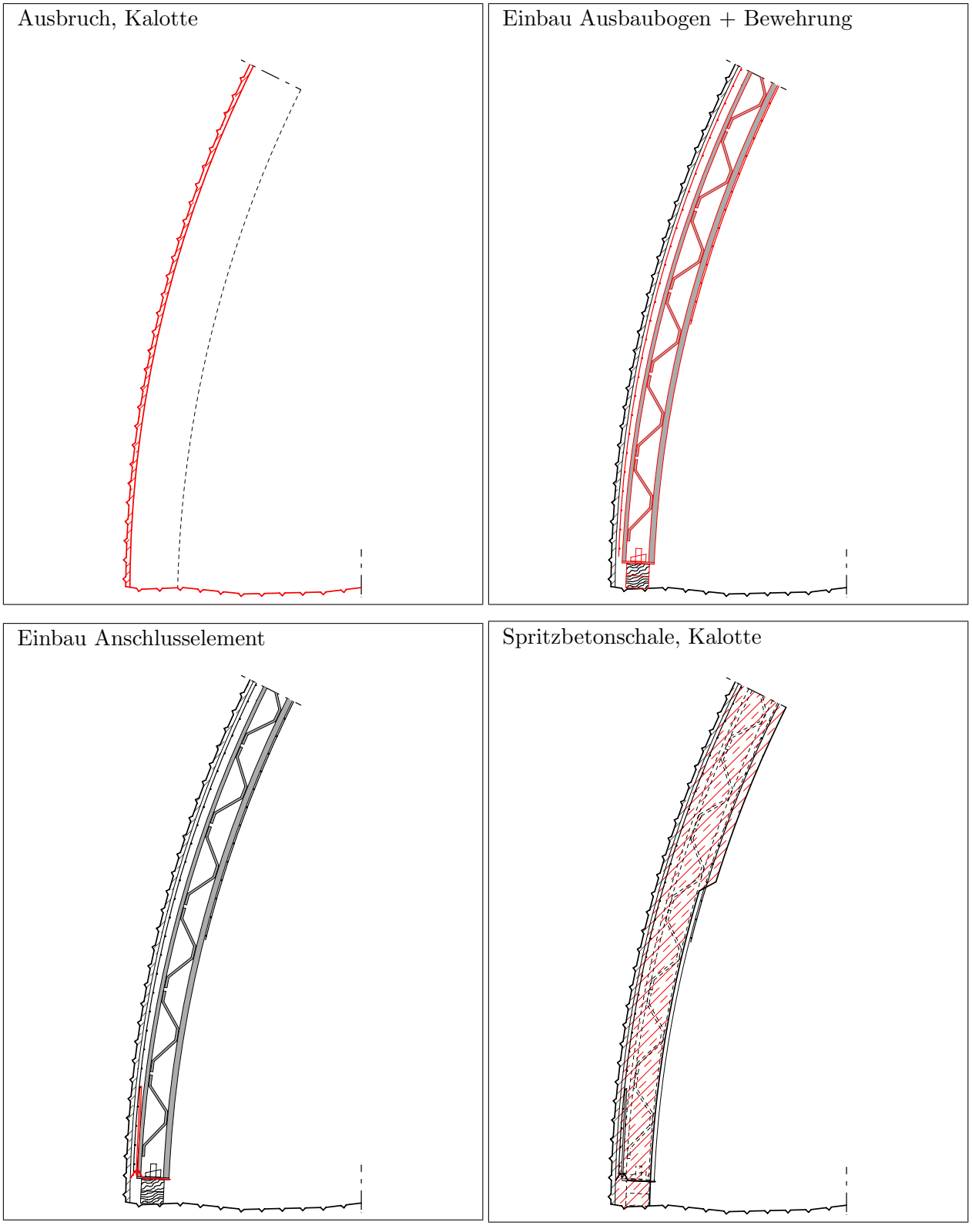
- Einlegen der Spritzbetonbewehrung, hohlraumseitig Strosse und Kalotte
- Herstellen der Spritzbetonschale, Strosse und Kalotte 2. Lage



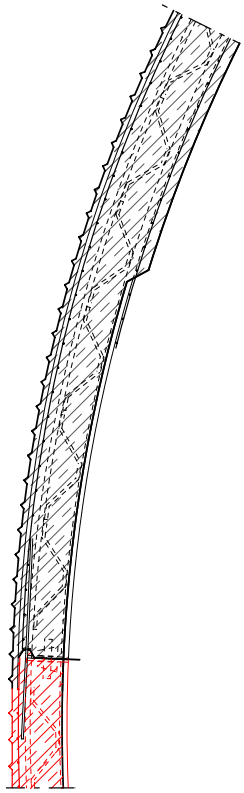
Endzustand

Abbildung 6.5 zeigt die Arbeitsschritte eines Kalotten - Strossen - Vortriebs ohne Fußverbreiterung. Die Beschreibung der einzelnen Einbauschritte gilt sinngemäß von Abbildung 6.4.

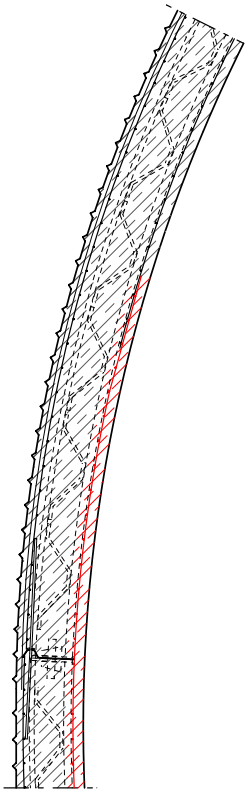
Abbildung 6.5: Übersicht der einzelnen Arbeitsschritte, ohne Fußverbreiterung



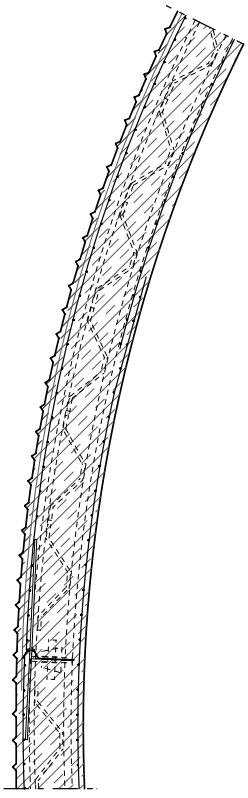
Ausbruch, Spritzbetonschale, Strosse



Spritzbeton 2. Lage, Strosse + Kalotte



Endzustand



6.2 Zusammenbau auf der Baustelle

Abbildung 6.6 zeigt den Zusammenbau des Anschlusselements auf der Baustelle. Die einzelnen Komponenten (geformtes Streckmetall, Anschlussbewehrung, Längseisen) werden auf die Baustelle geliefert und vor dem Tunnelportal gelagert. Eine einfache Vorrichtung dient als Montagehilfe für einen raschen Zusammenbau. Das fertige Anschlusselement wird je nach Bedarf in den Tunnel transportiert und eingebaut.

(a) Lagerplatz für die einzelnen Komponenten vor dem Tunnelportal

(b) Einfache Vorrichtung aus Holzbrettern dient als Montagehilfe.

(c) Streckmetall eingespannt in der Montagehilfe; befestigen der Bewehrung mit einem Draht

(d) Fertiges Anschlusselement; wird in dieser Form in den Tunnel zum Einbau transportiert

Abbildung 6.6: Zusammenbau des Anschlusselements vor dem Tunnelportal

Erkenntnisse

Durch den Umstand, dass die Komponenten einzeln angeliefert und vor Ort zusammengebaut werden, ist der Platzbedarf gering. Der Zusammenbau kann von einer Person, ohne zusätzliches Werkzeug und mit Hilfe einer einfachen Montagehilfe in kurzer Zeit erfolgen.

6.3 Einbau auf der Baustelle

Der Einbau des Anschlusselements (siehe Abbildung 6.2) sowie der Anschlussbewehrung für eine temporäre Kalottensohle (siehe Abbildung 6.3) wird anhand der Abbildung 6.6 genauer erläutert.
Dabei sind folgende drei Arbeitsschritte durchzuführen:

- Einbinden des Anschlusselements in die bergseitige Bewehrung
- Einlegen und Befestigen der Anschlussbewehrung für die Kalottensohle an der Oberseite des Streckmetalls
- Einspritzen des Elements

(a) Element wird auf Höhe des Gitterbogens in die bergseitige Bewehrung eingebunden.

(b) Im eingebauten Zustand sollte es möglichst horizontal positioniert sein.

(c) An der Unterseite sollte ausreichend Platz vorhanden sein, um diesen Bereich satt mit Spritzbeton unterspritzen zu können.

(d) In der trapezförmigen Ausnehmung „versteckte“ Anschlussbewehrung

(e) Einbau der Anschlussbewehrung für die temporäre Kalottensohle. Diese wird auf das Streckmetall gelegt und mit einem Draht an diesem befestigt, um das Element beim Einspritzvorgang zu stabilisieren.

(f) Fertig eingebautes Element inklusive Anschlussbewehrung für die Kalottensohle

(g) Element möglichst tief und satt „Unterspritzen“ um auftretende Normalkräfte im „Bauzustand“ übertragen zu können.

(h) Einspritzen des Anschlusselements von der Oberseite

(i) Fertige Spritzbetonschale der Kalotte

Abbildung 6.6: Einbau des Anschlusselements im „Tunnel Stein“

Erkenntnisse

Einbinden des Anschlusselements

Der Einbau des Anschlusselements funktioniert nach kurzer Eingewöhnungsphase der Arbeitskräfte relativ problemlos und kann von einer Person ohne zusätzliches Werkzeug in ungefähr 3 - 5 Minuten durchgeführt werden.
Auf folgende Punkte ist beim Einbau besonders zu achten:

- Orientierung des Elements (nicht um 180° verdreht einbauen)
- Anschlusselemente jedes Abschlags müssen in etwa auf gleicher Höhe eingebaut werden (Höhe des Ausbaubogenfußes). Dadurch ist es im Zuge des Strossenvortriebs einfacher, sich an das Anschlusselement „heranzutasten“, dieses freizulegen und die Anschlussbewehrung herauszubiegen.
- Element muss horizontal eingebaut werden
- Abstand zum Boden soll 15 - 20 cm betragen (Höhe des Schenkels des Streckmetalls bei Ausführung mit Kalottenfußverbreiterung)
- Länge des Anschlusselements sollte an die Abschlagslänge angepasst sein. Bei variierenden Abschlagslängen können zwei Elemente überlappend eingebaut werden.

Einbau der Anschlussbewehrung für die Kalottensohle
Der Einbau funktioniert sehr gut, allerdings kann es aufgrund der dichten Bewehrungsführung in diesem Bereich mitunter etwas schwierig sein, die Bewehrung genau zu positionieren. Dennoch dauert der Arbeitsvorgang inklusive der Befestigung am Steckmetall nur ungefähr 3 - 5 Minuten und kann ebenfalls von einer Person durchgeführt werden. Das obere Ende der Anschlussbewehrung muss genügend Abstand zur herzustellenden Spritzbetonschale haben, um nicht anschließend im Beton zu verschwinden. Eine Abhilfe kann hierbei der Einbau einer Stange als Abstandhalter (eingeklemmt zwischen die Ausbaubögen, siehe Abbildung 6.6, b)) bringen. Auf die Problematik, welche sich durch die Anschlussbewehrung beim Lösen des Betons bei Strossenausbruch ergibt, wird im Kapitel 6.4 eingegangen.

Einspritzvorgang
Das Einspritzen des Elements funktioniert ohne Probleme. Dabei ist es wesentlich, dass an der Unterseite genügend Platz vorhanden ist, um einen möglichen Spritzschatten zu verhindern. Das hier verwendete Streckmetall ist für die hohen Drücke des Spritzbetons allerdings zu instabil und liefert erst durch die Befestigung an der Anschlussbewehrung für die Kalot-

tensohle zufriedenstellende Ergebnisse. Eine Möglichkeit wäre, die Vorderkante des Streckmetalls auf einer Breite von 2 cm nach oben zu biegen. Dadurch würde sich zum einen die Steifigkeit erhöhen und zum anderen das Streckmetall beim Lösen des Betons bei Strossenausbruch besser an der Spritzbetonschale haften. Die Verwendung eines steiferen und robusteren Streckmetalls wäre eine Alternative dazu.

6.4 Lösevorgang bei Strossenausbruch

Der Ausbruch der Strosse erfolgt im hier angeführten Fall mit einem Bagger. Dabei tastet man sich von unten an das Element heran. Dabei muss der Ausbruch bis ca. 30 cm unter das Anschlusselement erfolgen, anschließend kann mit einem Stoß der Baggerzähne auf das verbleibende Material (Spritzbeton vom „Unterspritzen“) das Anschlusselement freigelegt werden. Danach kann die Anschlussbewehrung nach unten gebogen werden.

(a) Freilegen des Anschlusselements mit den Baggerzähnen

(b) Freigelegtes Anschlusselement

(c) Freigelegte Anschlussbewehrung bevor diese nach unten gebogen wird

(d) Freigelegtes Anschlusselement des darauffolgenden Abschlags

Abbildung 6.7: Strossenausbruch sowie Lösen des Betons vom Anschlusselement

Erkenntnisse

Das Lösen des Betons bei Strossenausbruch an sich funktioniert gut und bestätigt die in Kapitel 5.2 durchgeführten Versuche zur Lösbarkeit. Die auftretende Problematik dabei ist vor allem die Lokalisierung des Elements für den Baggerfahrer, um nicht den Beton über dem Element auszubrechen. Darum ist es wesentlich, alle Elemente auf gleicher Höhe zu positionieren und nicht zu tief einzuspritzen. Der Fuß des Ausbaubogens ist meist nach dem Einspritzen noch erkenntlich, und daher gut als Anhaltspunkt für die Position des Anschlusselements im Spritzbeton geeignet. Gelingt dies, so löst sich der Beton ohne Probleme und man erhält das gewünschte Ergebnis. Haftet das Streckmetall nicht vollflächig am Spritzbeton der Kalotte, so kann dieses nach dem Umbiegen der Bewehrung entfernt werden. Dadurch können möglichenfalls entstehende „Spritzbetonnester“ vermieden werden. Problematischer ist der Lösevorgang bei Vorhandensein einer Kalottensohle. Da die Anschlussbewehrung der Kalottensohle über dem Element liegt, wird diese beim Ausbruch der Kalottensohle mit nach unten gerissen. Das Streckmetall löst sich dadurch vom Spritzbeton und muss entfernt werden. Weiters wird die Anschlussfuge an der Vorderseite beschädigt und erfüllt die gewünschten Anforderungen nicht mehr gänzlich.

7 Schlussbetrachtung

7.1 Zusammenfassung

Die durchgeführte Literaturrecherche ergab, dass es zur Detailausbildung der Verbindungen von Spritzbetonschalen im Tunnelbau bei Teilflächenausbruch keine zufriedenstellenden Lösungen gibt. Die Anforderungen hinsichtlich baubetrieblicher und bauwirtschaftlicher Belange können außerdem von Detailausbildungen des „Klassischen Hochbaus“ nicht ausreichend erfüllt werden. Im Zuge der vorliegenden Arbeit wurde ein optimiertes Anschlusselement unter Verwendung eines Streckmetalls als „Trennschicht“ entwickelt. Die notwendige Bewehrung zur Verbindung der Spritzbetonschalen ist dabei in einer trapezförmigen Ausnehmung „versteckt“ und wird nach dem Ausbruch der folgenden Teilfläche nach unten gebogen. Die Vorteile dieser Variante liegen neben der Funktion und einfachen Handhabung vor allem in der günstigen Herstellung sowie den kostengünstigen Materialien aus denen das Anschlusselement besteht.
Vergleicht man gegenwärtig ausgeführte Anschlussdetails mit der hier vorgestellten Lösung, so ergeben sich folgende Vorteile:

- **Zeit- und Kostenersparnis:** Durch das Lösen des Betons vom Streckmetall erhält man eine saubere Trennfläche womit die Zugänglichkeit zur Anschlussbewehrung gegeben ist und ein nachträgliches mechanisches Entfernen des Betons entfällt. Der Arbeitsaufwand des Einbaus des Anschlusselements wird dadurch um ein vielfaches kompensiert und es können somit Kosten gespart werden.
- **Statisch zufriedenstellende Lösung:** Durch die ebene und von Verunreinigungen freie (Spritzbeton - Rückprall bzw. Ausbruchsmaterial) Anschlussfuge sowie eine durchgehende Bewehrungsführung sind die statischen Anforderungen erfüllt.
- **Ingenieurmäßig ansprechende Lösung**

Zur Bestätigung der Funktion des Anschlusselements in Bezug auf die Querkrafttragfähigkeit und die Lösbarkeit des Betons vom Streckmetall wurden umfangreiche Laborversuche durchgeführt. Dabei wurde gezeigt, dass durch die Kombination aus Bewehrung und „Schubknagge“ ausreichend Querkraft übertragen werden kann. Betrachtet man eine Spritzbetonschale $d_s = 20\,\text{cm}$, mit einer Bewehrung BSt 550, Ø 10 mm, $s = 20\,\text{cm}$, so ergibt sich die übertragbare Querkraft mit 760 kN/m ($\tau_{H,max} = 3{,}83\,\text{N/mm}^2$) bei Vorhandensein einer Normalkraft von 400 kN/m ($\sigma_N = 2{,}0\,\text{N/mm}^2$). Die Ergebnisse der Versuche zur Lösbarkeit zeigen die ausgezeichnete Wirkung des Streckmetalls als „Trennschicht“, wobei die Maschenweite nicht zu groß werden sollte.

Durch den Einsatz des Anschlusselements im Baustellenbetrieb wurden anschließend wichtige Erkenntnisse zur Weiterentwicklung sowie zur Verbesserung der Handhabung des Anschlusselements gewonnen. Der Einbau des Elements dauert ungefähr fünf Minuten (inklusive Anschlussbewehrung für den Kalottenfuß ca. zehn Minuten) und funktioniert nach kurzer Eingewöhnungsphase des Personals problemlos. Jene Zeit, die der Einbau in Anspruch nimmt, wird über den gesamten Vorgang gesehen durch die Zeitersparnis beim Lösen und Verbinden zur folgenden Spritzbetonschale um ein Vielfaches kompensiert. Es ist anzumerken, dass das entwickelte Element das gewünschte Ergebnis bei einem Kalotten-Strossen Vortrieb bringt, wobei beim Einbau einer Kalottensohle weitere Adaptierungen notwendig wären.

7.2 Ausblick

Folgend werden zusammenfassend nochmals jene Punkte aufgezählt, welche bei der Weiterentwicklung des Anschlusselements in Zukunft zu lösen sind:

- Temporäres Kalottensohlgewölbe: Der Anschluss muss derart ausgeführt werden, dass durch den Abbruch des Kalottensohlgewölbes die Anschlussfuge nicht beeinflusst wird. Hierbei ist vor allem die Lage der Anschlussbewehrung zu überdenken, welche sich nicht über der „Trennschicht“ befinden sollte. Weiters sollte ein zufriedenstellender Kraftfluss zwischen Kalotte und Kalottensohlgewölbe gewährleistet sein.
- Einspritzvorgang: Das Element muss stabiler ausgeführt werden. Denkbar wäre die Verwendung eines steiferen Materials oder eine Profilierung des Streckmetalls zur Erhöhung der Steifigkeit. Eine weitere Möglichkeit für eine Ausführung ohne Kalottenfußverbreiterung wäre, das Anschlusselement auf ein „Spritzbetonbankerl“ aufzulegen. Dadurch

müsste das Element ausschließlich von der Oberseite eingespritzt werden, wodurch sich die Problematik der Instabilität löst. Weiters sollte das Anschlusselement luftseitig nicht übermäßig mit Spritzbeton überdeckt werden, um beim Lösen des Betons bei Strossenausbruch eine möglichst ebene Fuge zu erhalten.

- Lokalisierung bei Strossenausbruch: Eine Möglichkeit wäre, das Element während des Einspritzvorgangs an der Vorderkante mit einer „Leiste“ (oder ähnlichem) zu fixieren, welche unmittelbar danach entfernt wird (noch bevor der Spritzbeton ausgehärtet ist). Die sich dabei ergebende Fuge, würde zum einen die Lokalisierung bei Strossenausbruch ermöglichen und zum anderen eine durchgehende Spritzbetonschale luftseitig des Elements verhindern, welche sich durch einen übermäßigen Spritzbetonauftrag ergeben kann. Ein weiterer Vorteil ist die zusätzliche Fixierung während dem Einspritzvorgang.

Literaturverzeichnis

Baar, S., Ebeling, K., & Lohmeyer, G. C. O. (2013). *Lohmeyer Stahlbetonbau: Bemessung - Konstruktion - Ausführung* (9., [vollst. überarb.] Aufl. ed.). Wiesbaden: Springer Vieweg.

Dywidag-System International GmbH (2016). Recostal-Bewehrungsanschlüsse mit Schubverzahnung.

Egco AG (2015). Produktdatenblatt: Halfen HBT Rückbiegeanschluss.

Girmscheid, G. (2013). *Bauprozesse und Bauverfahren des Tunnelbaus* (3. Aufl. ed.). Berlin, Germany: Wiley.

Halfen GmbH (2015). Produktdatenblatt: Halfen HBT Rückbiegeanschluss.

Maidl, B., Thewes, M., & Maidl, U. (2013). *Handbook of tunnel engineering: Volume I: Structures and methods*. Berlin: Ernst & Sohn.

Mevaco GmbH (2016). Raute 10x6x1.

Pilgerstorfer, T. (2014). *Mechanical Characterization of Fault Zones*. Dissertation, Technische Universität Graz, Graz.

Schachermayer Deutschland GmbH (2016). Achsenklemmring ohne Kappe 6 mm Federstahl brüniert.

Wu, W. (2002). The role of numerical analysis in tunnel design. *Tunnel Mechanics*, *2002*, 87–168.