



Alexander Meier, BSc

Einfluss von Harnischen und Trennflächen auf das Verhalten von Tunneln – biaxiale Modellversuche

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Geotechnical and Hydraulic Engineering

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

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

Zweitbetreuer

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Manfred Blümel

Institut für Felsmechanik und Tunnelbau

Technische Universität Graz

Graz, November 2017

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

Abstract

This diploma thesis examines small scaled model tests on tunnels. The tests were carried out on a frame with biaxial loading. The main focus of this work is to present the influence of slickensides and joints on the failure mechanism in cavity structures. Twelve different model experiments were carried out. Possibilities for the production of slickensides and joints were developed. Two model tests were produced with a cavity structure geometry deviating from the circular profile. The experiments were compared using video recordings and snapshots, and evaluated qualitatively. Theoretical basics of the illustrated failure mechanisms, the associated dangers and possible mitigation measures were described.

Kurzfassung

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Durchführung und Auswertung von Modellversuchen an Tunneln. Die Versuche wurden an einem Versuchsrahmen mit biaxialer Belastung ausgeführt. Theoretische Grundlagen der dargestellten Versagensmechanismen und den damit verbundenen Gefahren und möglichen Maßnahmen wurden beschrieben. Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Darstellung des Einflusses von Trenn- und Harnischflächen auf den Versagensmechanismus in Hohlraumbauten. Es wurden zwölf unterschiedliche Modellversuche durchgeführt. Möglichkeiten zur Herstellung von Trennflächen und Harnischflächen wurden entwickelt. Zwei Modellversuche wurden mit einer vom Kreisprofil abweichenden Ausbruchsgometrie hergestellt. Die Versuche wurden anhand von Videoaufzeichnungen und Momentaufnahme verglichen und qualitativ ausgewertet.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Gebirgsverhalten und Versagensmechanismen	2
2.1	Gefügebedingtes Versagen.....	2
2.2	Sprödbbruch	2
2.3	Scherversagen und Scherbruch	3
3	Vorbereitung der Modellversuche	5
3.1	Biaxialmaschine	5
3.2	Geometrie der Modelle.....	6
3.3	Messtechnische Aufzeichnung	7
3.4	Visuelle Aufzeichnung	7
3.5	Modellmaterial.....	7
3.6	Schalung, Bearbeitung und Einbau des Modells	8
3.7	Verschiebungsauswertung	10
3.8	Spannungs- und Verformungszustand	11
4	Erster Modellversuch	12
4.1	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung.....	12
4.2	Versuchsauswertung MV1	12
5	Erste Versuchsreihe	14
5.1	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung.....	14
5.2	Versuchsauswertung MV2	15
5.3	Versuchsauswertung MV3	16
5.4	Versuchsauswertung MV4	17
5.5	Gegenüberstellung von MV2, MV3 und MV4.....	18
6	Zweite Versuchsreihe	20
6.1	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung.....	20
6.2	Versuchsauswertung MV5	21
6.3	Versuchsauswertung MV6	22
6.4	Gegenüberstellung von MV5 und MV6.....	23
7	Dritte Versuchsreihe	24
7.1	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung.....	24

7.2	Versuchsauswertung MV7	24
7.3	Versuchsauswertung MV8	26
7.4	Versuchsauswertung MV9	27
7.5	Gegenüberstellung MV7, MV8 und MV9	29
8	Vierte Versuchsreihe	30
8.1	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung.....	30
8.2	Versuchsauswertung MV10.....	30
8.3	Versuchsauswertung MV11.....	33
8.4	Versuchsauswertung MV12.....	35
8.5	Gegenüberstellung von MV10, MV11 und MV12.....	36
9	Verschiebungsdatenauswertung	38
9.1	Auswertung mit Particle Image Velocimetry	38
9.2	Analyse	38
10	Zusammenfassung und Ausblick	41
	Literatur	1
	Anhang	2

Abkürzungen

MVModellversuch

BMBindemittel

FMFließmittel

AAkadur (Bindemittel)

WWasser

SMSteinmehl

1 Einleitung

Mit dem biaxialen Versuchsrahmen (in weiterer Folge als Biaxialmaschine bezeichnet) ist es möglich, Unstetigkeiten wie Trennflächen, Harnischflächen oder Störungszonen zu modellieren und somit den Einfluss auf das Gebirgsverhalten und den Versagensmechanismus darzustellen. Bereits Lisec (2002b), Aichinger (2015) und Stadlbauer (2016) entwickelten Modellmaterialien und führten Versuche mit der Biaxialmaschine an der Technischen Universität Graz durch. Rückblickend auf die verfassten Arbeiten war eine geeignete Materialfindung die herausforderndste Aufgabe. Erst Stadlbauer (2016) gelang es, ein Modellmaterial zu finden, welches den hohen Anforderungen hinsichtlich geeigneter Festigkeit, Schwindmaß, Rissentwicklung, Einbaufähigkeit und dem Bruchverhalten bei Versuchsdurchführung entspricht. Durch die geschaffenen Grundlagen und den gesammelten Erfahrungen dieser Arbeiten ist es möglich, im Rahmen dieser Diplomarbeit weiterentwickelte Versuche durchzuführen.

Um die Auswirkung von Harnischen und Trennflächen mit unterschiedlicher Anzahl und Anordnung auf das Versagen eines Hohlraumes zu untersuchen, wurden Modelle hergestellt und in der Biaxialmaschine belastet. Es wurden zwölf Modellversuche, aufgeteilt auf vier Versuchsreihen durchgeführt. In der ersten Versuchsreihe wurden anhand von drei Modellen mit unterschiedlicher Anordnung und Anzahl von vertikal verlaufenden Harnisch- und Trennflächen der Einfluss auf den Versagensmechanismus untersucht. Bei einem Modellversuch wurde die Ausbruchsform auf ein rechteckiges Profil mit gewölbter Firste geändert, um den Unterschied zu einem Kreisprofil aufzuzeigen. In der zweiten Versuchsreihe wurden zwei Versuche mit horizontal verlaufenden Harnischflächen hergestellt. Diese Versuchsreihe zeigt den Unterschied zwischen einem Seitendruckbeiwert von $K_0 = 0,5$ und $K_0 = 2,0$. Zusätzlich wurde die Hohlraumgeometrie des Versuches mit $K_0 = 2,0$ in Kavernenform ausgeführt. Bei der dritten Versuchsreihe wurden drei Versuche mit sich kreuzenden Harnischflächen hergestellt. Knapp neben dem Ausbruchsrand verlaufende Harnische zeigen die Gefahr von sich ausformenden Blöcken. In der vierten Versuchsreihe wurden drei Modelle hergestellt. Diese Versuche zeigen, wie sich zusätzlich angeordnete Trennflächen auf die Verschiebungen und das Bruchverhalten auswirken.

Die hochauflösenden Videoaufzeichnungen der Versuche wurden für die Lehre aufbereitet, um die Versagensmechanismen von Hohlraumbauten aufzeigen zu können und dadurch besser verständlich zu machen.

2 Gebirgsverhalten und Versagensmechanismen

Das Verhalten des Gebirges in der Hohlraumumgebung hängt von einigen Faktoren wie der Gebirgsstruktur, Qualität, Beanspruchung, Bergwasserverhältnissen und Größe und Geometrie des Ausbruchprofils ab. Ein Verständnis über potenziell auftretende Versagensmechanismen und deren Auswirkungen ist notwendig zur Auswahl eines geeigneten Bauverfahrens und der Dimensionierung von Ausbau und Stützmitteln. In den folgenden Unterpunkten sind die Versagensmechanismen die mit den Modellversuchen nachgebildet werden, deren Gefahren und mögliche Baumaßnahmen beschrieben.

2.1 Gefügebedingtes Versagen

Durch den Verschnitt von Trennflächen oder sich ausbildenden Bruchflächen kann es zu einem Herabfallen oder Gleiten von Blöcken in den Hohlraum kommen. Diese gefügebedingten Versagen stellen neben einer potentiellen Gefahr für Arbeiter und Gerät auch Mehrkosten durch den entstandenen Überbruch dar. Um ein gefügebedingtes Versagen zu beschreiben, ist die Kenntnis der Spannungssituation, Trennflächenorientierungen, Trennflächenabstände und Trennflächeneigenschaften notwendig. Gefährdete Blöcke können mittels Ankerung, Ausbau mit Stahlbögen, Spritzbeton oder gegebenenfalls auch mittels Voraussicherung (Spiesse, Rohrschirm) vor dem Herabfallen in den Hohlraum gehindert werden. Bei größeren Hohlraumbauten bietet sich eine Unterteilung der Ausbruchsfläche und Reduzierung der Abschlagslänge in Kombination mit unmittelbarer Installation von Sicherungsmitteln an, um gefügebedingtes Versagen zu verhindern.

2.2 Sprödbruch

Kommt es am Hohlraumrand zu Spannungskonzentrationen und einer Überbeanspruchung von massigem oder gering geklüftetem Gebirge, führt dies zu Sprödbrüchen. In der Natur treten Sprödbrüche in Richtung der größten Druckspannung und hauptsächlich in sehr hartem Gestein mit geringer Querstützung auf. Durch die fortschreitende Spannungsumlagerung bilden sich weitere Abschalungen. Arbeiter und Gerät werden durch mögliche herabfallende Bruchstücke

gefährdet. Um die Gefahr von potentiellen Sprödbrüchen abschätzen zu können, sind die Gesteinsfestigkeit, die Spannungen und die Hohlraumgeometrie ausschlaggebend. Dieser Versagensmechanismus stellt grundsätzlich keine Gefahr für die Stabilität des Hohlraumes dar. Maßnahmen wie verankerte Stahlgitter oder Netze und dünne Spritzbetonlagen dienen lediglich der Sicherheit. Als Bergschlag wird ein schlagartiger und mit hoher Geschwindigkeit eintretender Sprödbruch bezeichnet der allerdings mit diesen Versuchen nicht nachgebildet wurde.

2.3 Scherversagen und Scherbruch

Ein Scherversagen tritt entweder in Form eines Scherbruches im intakten Gebirge, oder durch eine Scherbewegung entlang von vorhandenen Harnisch- oder Trennflächen auf. Nach der Bildung von Scherflächen im intakten umliegenden Gebirge sinkt die Scherfestigkeit auf den Gleitwiderstand der entstandenen Bruchfläche ab. Bei homogenem Gebirge treten Scherbrüche leicht gekrümmt und gegenläufig auf, wodurch es in der Achse der geringsten Druckspannung zu einem Kirschkerneffekt kommt (Abbildung 1). Der kompakte Block, begrenzt durch die Scherflächen und dem Ausbruchsrund wird dann zum Hohlraum hingeschoben. Durch die weitere Setzung der Firste nimmt die Krümmung der Stützzlinie zu und es kommt zu weiteren Scherbrüchen. Erst wenn der Winkel zwischen den Begrenzungen der Bruchzone klein genug wird, um das Ausquetschen zu sperren, stabilisiert sich der Zustand. Dies geschieht spätestens wenn dieser dem Reibungswinkel zwischen den Materialien entspricht (Feder 1978).

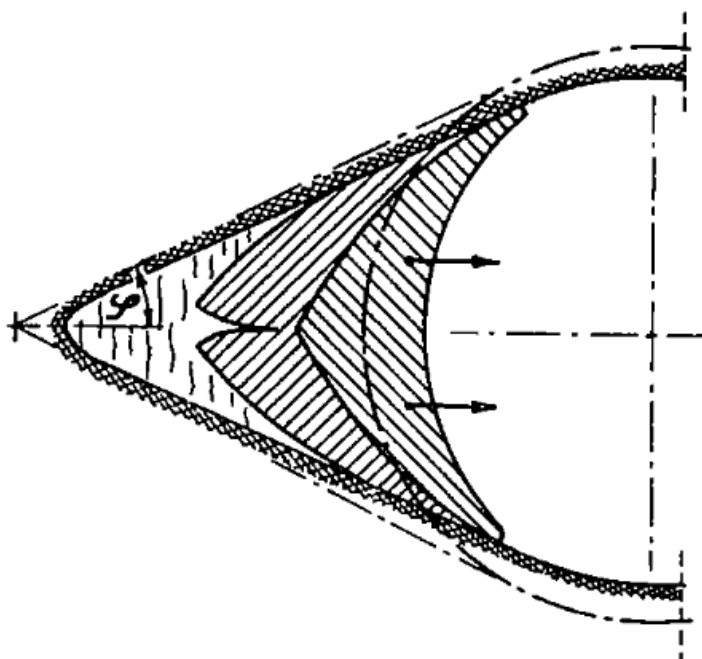


Abbildung 1 Kirschkerneffekt, (entnommen aus Feder (1978))

Scherversagen können zu starken anisotropen Verformungen des Hohlraumes mit der Gefahr von Verbrüchen führen. Neben der Gebirgsstruktur und den Gesteinseigenschaften nehmen die Spannungen und die Hohlraumgeometrie Einfluss auf ein Scherversagen. Besonders knapp am Ausbruchsrund verlaufende Harnischflächen mit einer geringen Scherfestigkeit können zu einem Scherversagen führen. Mögliche Maßnahmen zur Verhinderung von Scherversagen sind eine Erhöhung der Scherfestigkeit mittels Verankerung.

3 Vorbereitung der Modellversuche

3.1 Biaxialmaschine

Abbildung 2 zeigt die Biaxialmaschine, die aus einem fahrbaren Gestell, einem kippbaren Montagerahmen und einem Modellrahmen besteht (Kaltenböck, 2000). Der Modellrahmen ist von einer Akrylglascheibe vorne, und einer Stahlplatte hinten geschlossen. Die Aufbringung der Last auf die Druckplatten des Modellrahmens erfolgt über zwei unabhängig voneinander steuerbare Hydraulikzylinder. Die maximale vertikale Druckkraft beträgt 230 kN, die horizontale 115 kN. Die Regelung des Druckes wird mit elektromagnetisch gesteuerten Druckminderungsventilen über Handdrehräder gesteuert.

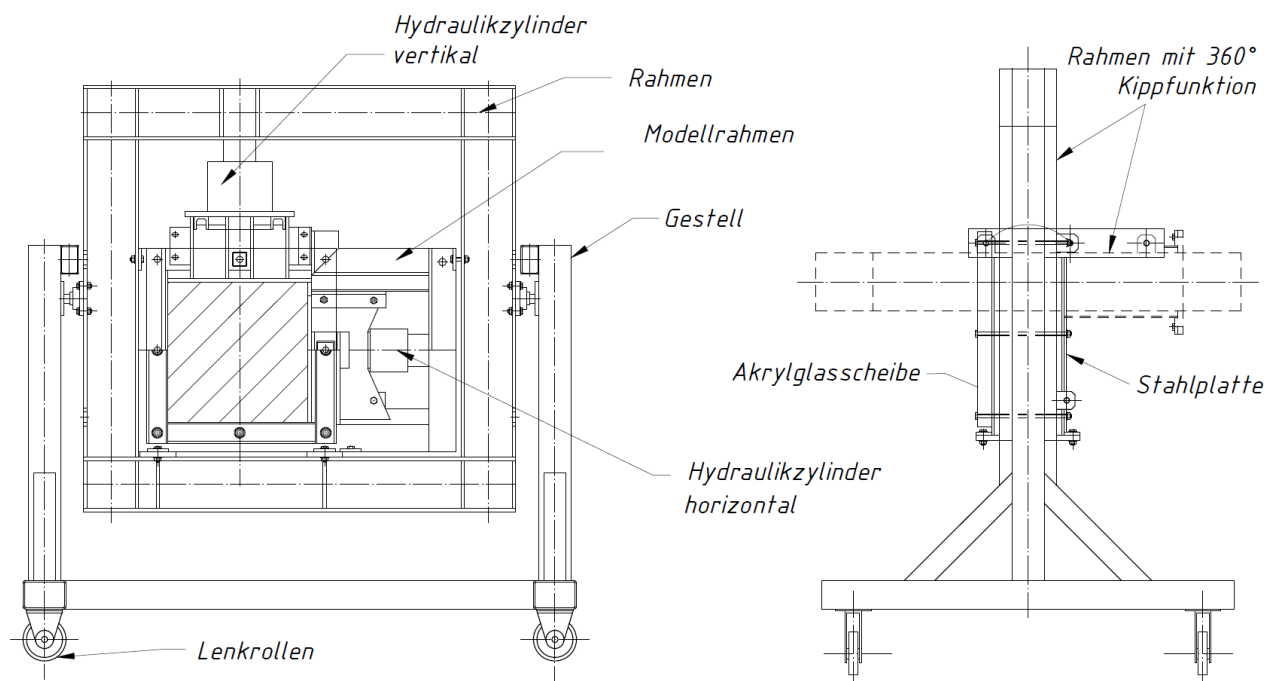


Abbildung 2 Bestandteile der Biaxialmaschine (entnommen aus Kaltenböck (2000))

3.2 Geometrie der Modelle

Die durch den Rahmen der Biaxialmaschine vorgegebene Geometrie für die Modelle war bei allen Versuchen gleich und entspricht der in Abbildung 3 dargestellten Abmessungen. Wie in Abbildung 4 ersichtlich, wurden die Versuche mit drei unterschiedliche Hohlräumgeometrien hergestellt. Bei zehn von zwölf Modellen wurde ein kreisrunder Hohlraum von 11 cm Durchmesser hergestellt. Beim vierten Modellversuch wurde der Hohlraum von einem Kreisprofil zu einem rechteckigen Hohlraum mit gewölbter Firste geändert. Beim sechsten Modellversuch wurde die Hohlraumform einer Kaverne nachgebildet.

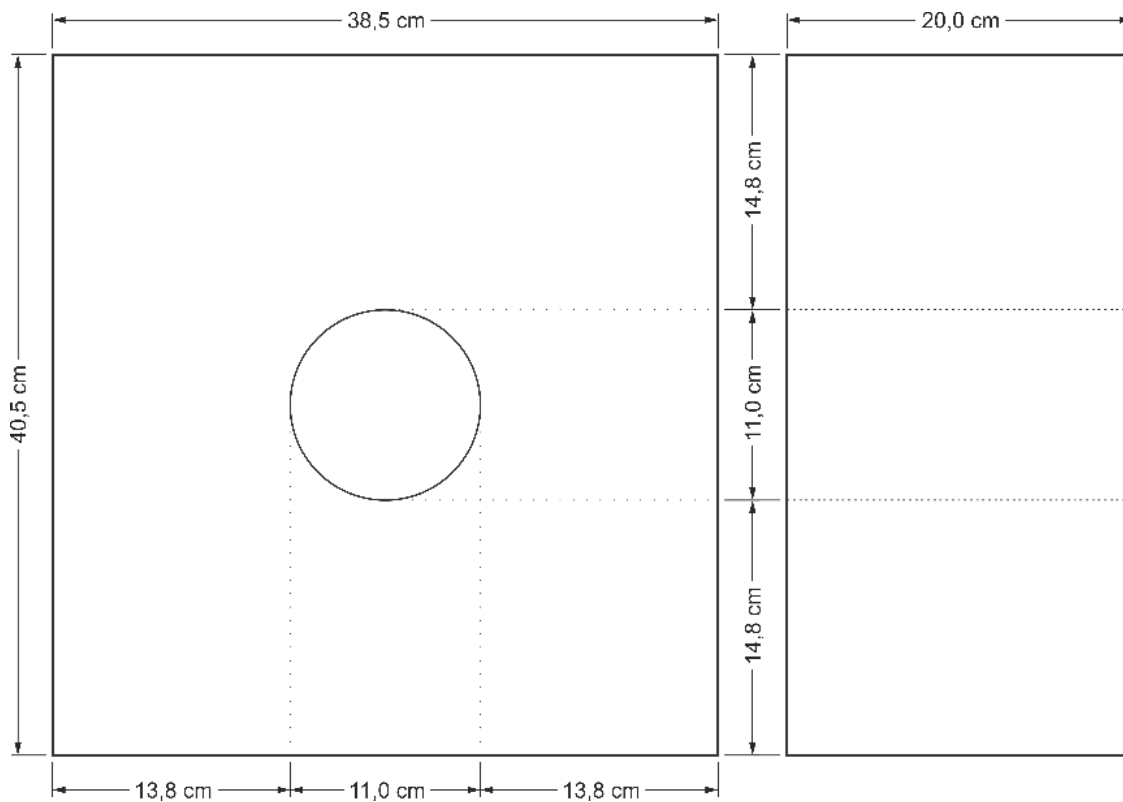


Abbildung 3 Modellabmessungen in Aufriss und Seitenriss mit eingezeichnetem Hohlraum in Kreisgeometrie

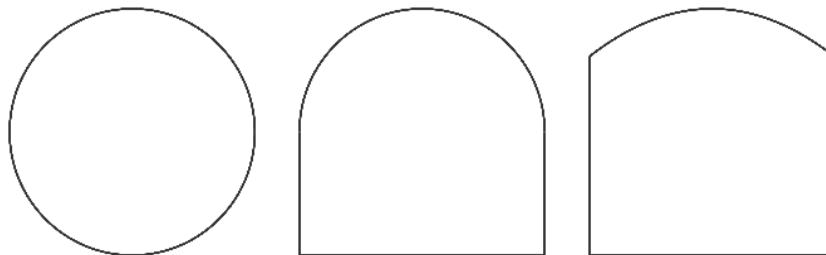


Abbildung 4 Unterschiedliche Hohlraumgeometrien der Versuche: Kreisprofil, Kavernenprofil, Rechteckprofil mit gewölbter Firste

3.3 Messtechnische Aufzeichnung

Wie Stadlbauer (2016) bereits hinwies, ist aufgrund der Modellgröße kein Einbau eines umfangreichen Messsystems möglich und wurde daher nicht weiter in Betracht gezogen. Das bestehende Messsystem der Biaxialmaschine wurde auf Funktionstauglichkeit untersucht und weiterverwendet. Die Einstellung der verwendeten Messsoftware Catman (Version 4.0) wurde nach Lager (2014) eingerichtet. Mit Wegaufnehmern der Firma HBM werden die horizontale und vertikale Verschiebungen aufgezeichnet. Zwischen Rahmen und Hydraulikstempel befindet sich jeweils eine Kraftmessdose. Die aufgezeichneten Messdaten befinden sich bei den jeweiligen Versuchsdatenblättern im Anhang.

3.4 Visuelle Aufzeichnung

Die Modellversuche wurden mit einer hochauflösenden Spiegelreflexkamera mit einem lichtstarken Objektiv (Canon 70D, Tamron 17-55mm 1:2,8) aufgezeichnet. Neben den Videoaufzeichnungen wurden die Versuche mit einer Spiegelreflexkamera (Canon 6D, 24-105mm 1:4L) festgehalten. Für die Erleichterung der Auswertung wird das Messdokument auf einem zweiten Bildschirm neben dem Modell dupliziert und mit der Videokamera aufgezeichnet. Eine detaillierte Fotostrecke der Versuche befindet sich bei den jeweiligen Versuchsdatenblättern im Anhang.

3.5 Modellmaterial

Die von Stadlbauer (2016) entwickelte und bei Versuchen bewährte Materialmischung, welche aus Akadur, Steinmehl, Wasser und Fließmittel besteht wurde für alle Modelle im Verhältnis 1:7:2:0,011 [A:SM:W:FM] verwendet. Zur Kontrolle von Materialeigenschaften wie der einaxialen Druckfestigkeit und dem Schwindverhalten wurden bei der Herstellung der Modelle jeweils zwei Prüfzylinder, mit einem Durchmesser von 100 [mm] und einer Höhe von 140 [mm], in einer EPS-Schalung hergestellt. Zur Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit wurden die Probenzylinder vor den durchgeführten Biaxialversuchen mit einem umgebauten Punktlastversuchsgerät getestet.

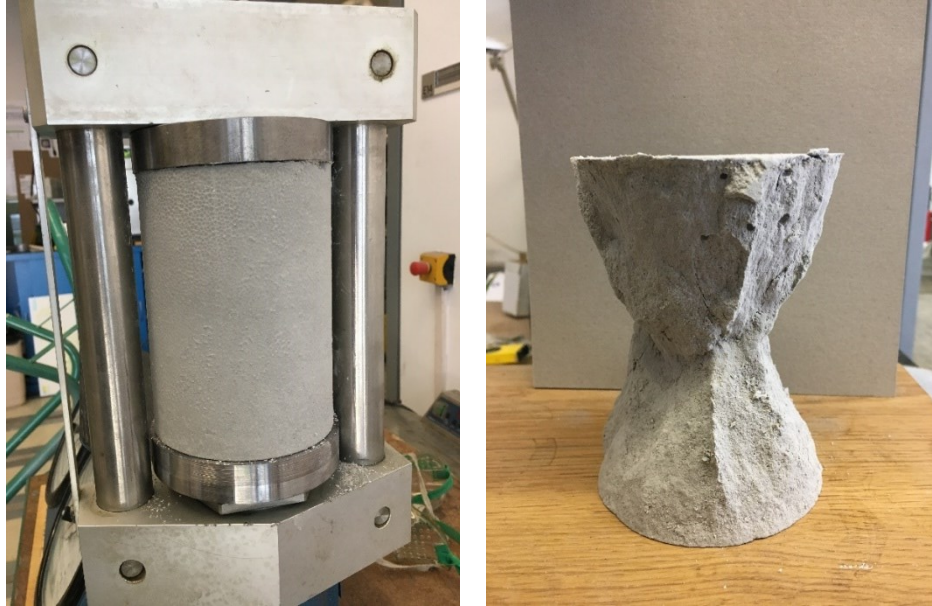


Abbildung 5 Probenkörper vor und nach der Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit mit dem umgebauten Punktlastversuchsgerät

3.6 Schalung, Bearbeitung und Einbau des Modells

Da beim ersten Versuch nicht klar war, wie die Herstellung der Trennflächen realisiert werden kann, wurde eine Holzschalungsplatte als Bodenschalung verwendet, die bei Bedarf zusammen mit dem Modell zersägt werden kann. Das Modell mit einer elektrischen Holzbandsäge zu zerteilen, war aufgrund der Modellhöhe nicht möglich. Eine handelsübliche Holzbogensäge stellte sich als zweckmäßig heraus und wurde bei den folgenden Modellversuchen angewandt. Die Hilfe einer zweiten Person ist hierbei erforderlich um einen exakten Schnitt auf beiden Seiten des Modells zu ermöglichen. Abbildung 6 zeigt die Herstellung der Trennflächen bei MV7.

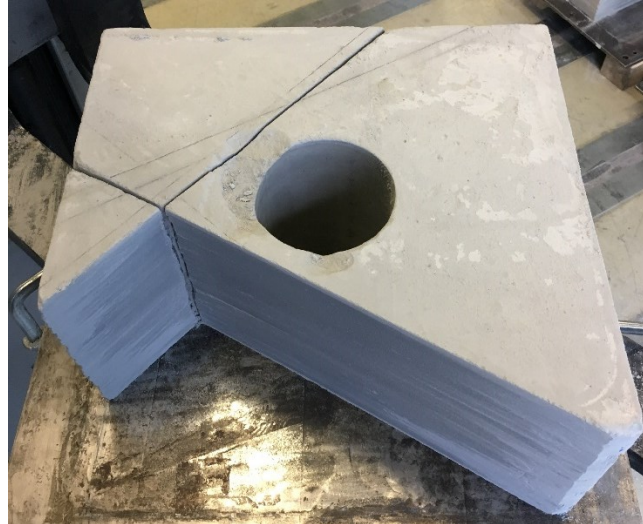


Abbildung 6 Herstellung der Trennflächen (MV7)



Abbildung 7 Herstellung der Kavernengeometrie (MV6)

Die Rückplatte der Biaxialmaschine wurde für alle Versuche als Bodenschalung verwendet und ermöglicht einen direkten Einbau des Modells. Dies gewährleistet einen möglichst schonenden Einbau des Modells. Der Tunnel in der Mitte des Modells wurde mittels Polokalrohr (110 mm Außendurchmesser) hergestellt. Vom kreisrunden Profil abweichende Hohlraumformen wurden im eingebauten Zustand mittels Sägeblatt hergestellt (Abbildung 7). Um ein Verrücken der Schalung beim Einbringen der Materialmischung zu verhindern, wurde die Schalung mit Schraubzwingen fixiert und das Rohr mit einer Gewindestange verschraubt (Abbildung 8). Vor dem Betonieren wurde ein Trennmittel (Schalöl) aufgetragen um ein Lösen des Modells von der

Schalung sicherzustellen. Gegen das Austreten der Materialmischung wurden die Fugen mittels Abdichtmasse verschlossen. Die Aushärtezeit der Modelle betrug zwischen fünf und sechs Tagen. Durch die 360° Kippfunktion der Biaxialmaschine ist es möglich, das Modell mithilfe des Hubstaplers horizontal einzubauen. Um eine optimale Oberfläche des Modells hinter der Plexiglasscheibe zu erhalten, wurden die Modelle mit der Bodenseite nach vorne eingebaut. Die Ausleuchtung im Tunnel wurde mit einem radial strahlenden LED-Licht sichergestellt. Um die Oberfläche der 4 cm Plexiglasscheibe bei den Versuchen nicht zu zerkratzen wurde eine 1 mm dicke Scheibe eingelegt, welche nach einigen Einsätzen ersetzt wird.



Abbildung 8 Herstellung der Modelle

3.7 Verschiebungsauswertung

Um eine Verschiebungsauswertung zu ermöglichen wurde, vor dem Versuch ein Raster (2,5 x 2,5 cm) auf die Modelloberflächen aufgebracht. Die hergestellten Harnischflächen wurden mit rotem, Trennflächen mit grünem Buntstift markiert. Deformationen und Verschiebungen sind dadurch besser sichtbar und ermöglichen eine bessere Auswertung. Bei allen Versuchen wurde eine Überlagerung des Endzustandes mit der ursprünglichen Hohlraumgeometrie und dem aufbrachten Raster vorgenommen und ist in den jeweiligen Datenblättern im Anhang ersichtlich.

3.8 Spannungs- und Verformungszustand

Bei der Biaxialmaschine wird durch das Aufbringen einer vertikalen und horizontalen Last auf Druckplatten ein dreidimensionaler Spannungszustand erreicht. Die Spannungen in Belastungsrichtung (x- und y-Achse) resultieren durch die aufgebrachte Last. Die Spannungen in Tunnellängsrichtung (y-Achse) entstehen durch die Querdehnung des Materials (Abbildung 9). Die Spannungen in Belastungsrichtung können durch die Division der aufgebrachten Kraft durch die Fläche der Druckplatte berechnet werden. Die Spannungen in Tunnellängsrichtung können durch die Kenntnis der Querdehnzahl berechnet werden. Aufgrund der Plexiglasscheibe und Stahlplatte wird die Dehnung des Modells in Tunnellängsrichtung behindert und es kann von einem zweidimensionalen Verzerrungszustand ausgegangen werden. Durch die einseitige Belastung von oben und rechts entsteht durch die starren Auflager ein asymmetrischer Verzerrungszustand. Da es bei den Versuchen mit der Biaxialmaschine um eine qualitative Veranschaulichung von Bruch- und Versagensmechanismen in Hohlräumen geht, wurden die Modelle direkt belastet. Um einen Zustand im Gebirge zu simulieren, müsste das Modell ohne Hohlraum hergestellt werden und anschließend belastet werden. Erst dann würde ein Ausbrechen des Hohlraumes eine Spannungsumlagerung bewirken und Verschiebungen und Bruchmechanismen könnten beobachtet werden. Eine wie von Huang et al. (2013) verwendete Stahlkonstruktion die nach dem Aufbringen des Primärspannungszustandes entfernt wird, wurde als nicht sinnvoll erachtet, da die unterschiedlichen Materialeigenschaften von Stahl und dem Modellmaterial Einfluss auf die Spannungsumlagerung nehmen.

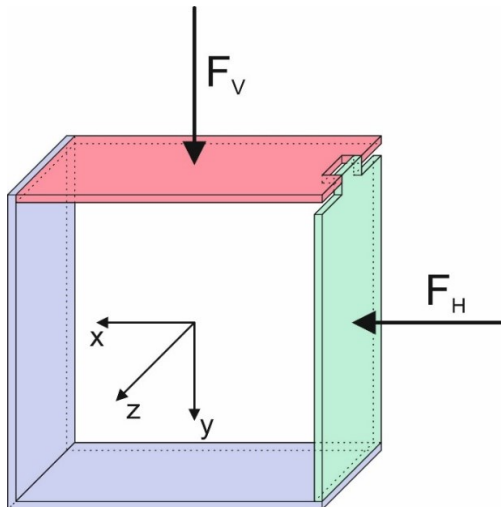


Abbildung 9 Koordinatenorientierung und Belastungsrichtung der Druckzylinder (entnommen aus Lagger (2014))

4 Erster Modellversuch

4.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

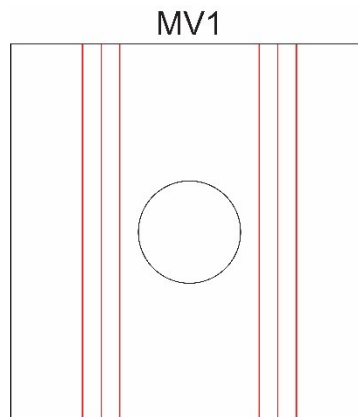


Abbildung 10 Geometrie des ersten Modellversuches, Harnischflächen (rot)

Bei MV1 wurden sechs vertikale parallel verlaufende Harnischflächen hergestellt. Um den Reibungswinkel zu reduzieren, wurden in den Schnitten jeweils zwei mit Silikonspray behandelte Kunststofffolien eingelegt. Durch eine Fehlstellung der Steuerungsventile war bei Aktivierung der Steuerungselektronik ein plötzliches Ausfahren der Hydraulikzylinder die Folge. Sowohl messtechnische und auch visuelle Aufzeichnung waren hierbei noch nicht aktiviert. Dem Endzustand zufolge, dürfte der vertikale Zylinder minimal vor dem horizontalen Zylinder ausgefahren sein.

4.2 Versuchsauswertung MV1

Eine detaillierte Auswertung ist aufgrund der fehlenden Aufzeichnung nicht möglich. Die bei diesem Modellversuch erstmals eingelegten Kunststofffolien konnten, wie erwartet, zur Reduktion der Scherfestigkeit beitragen. Bei näherer Betrachtung wurde, wie in Abbildung 11 ersichtlich, ein deutlicher Versatz an den Harnischflächen festgestellt.

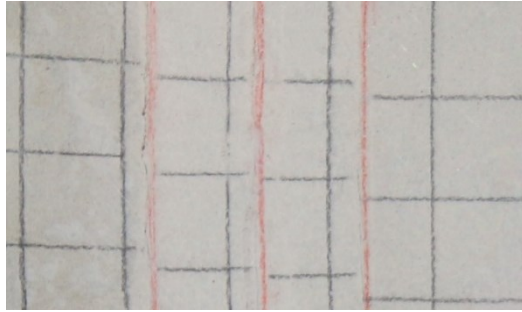


Abbildung 11 Versatz durch die Wirkung der Harnischfläche (rot markiert)

Abbildung 12 zeigt den Endzustand des ersten Modellversuches. Im Gegensatz zur hohen Auflockerung zwischen den Bruchflächen an der rechten Ulme, wo bereits ein Spaltbruch mit Abschaltungen zu erkennen ist, sieht man bei der linken Ulme einen kompakten Block, der in den Hohlraum hereingewandert ist. Zwischen den beiden Harnischflächen auf der linken Seite ist eine in Abbildung 12 mit roten Pfeilen markierte Scherbewegung zu erkennen. Durch die Scherbewegung zwischen den Harnischflächen findet eine Verschiebung in Richtung des Hohlraumes statt, und verursacht einen horizontal verlaufenden Scherbruch im linken Sohlbereich (siehe grüne Pfeile in Abbildung 12).

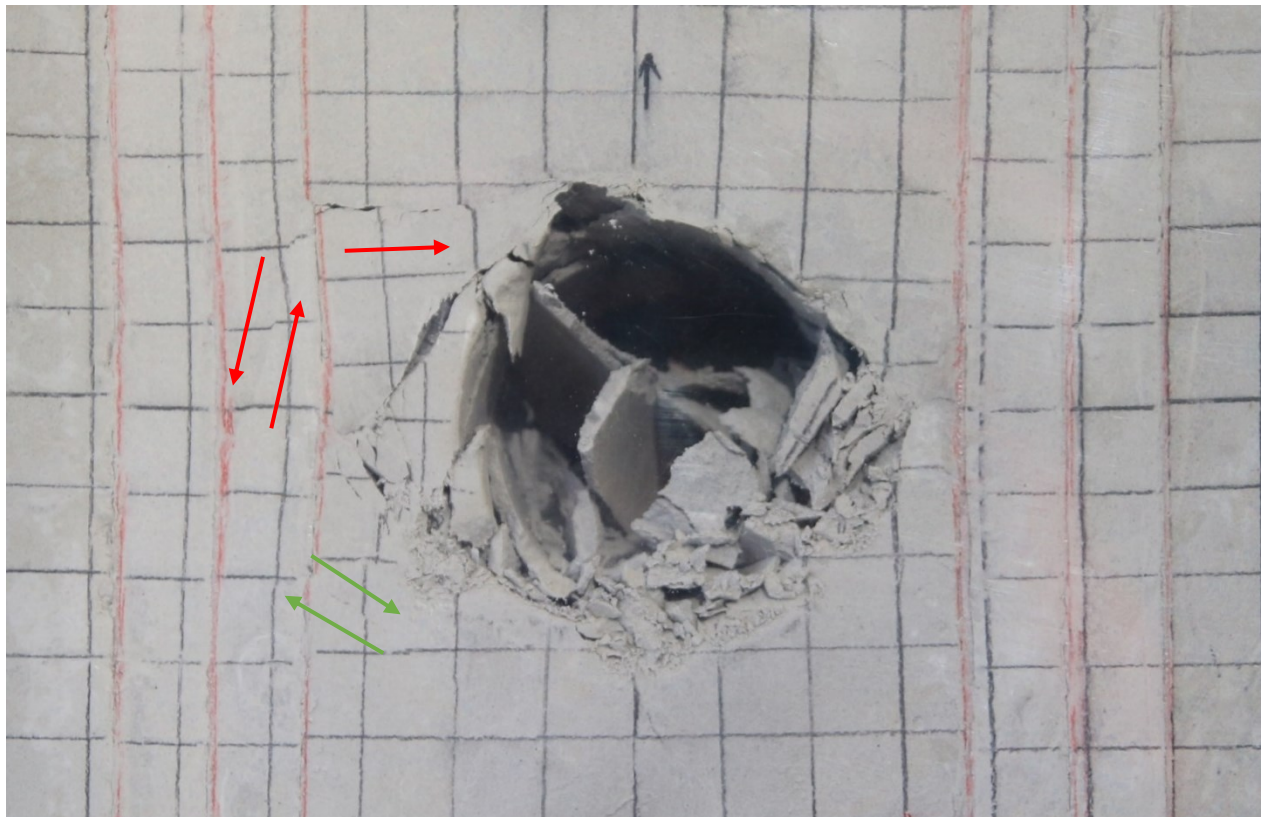


Abbildung 12 MV1 – Endzustand mit markierter Scherbewegung (rote und grüne Pfeile)

5 Erste Versuchsreihe

5.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

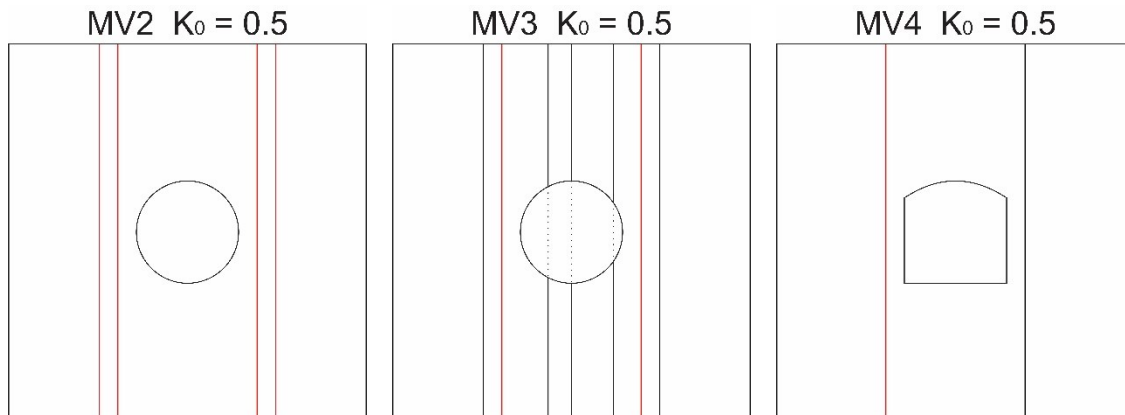


Abbildung 13 Geometrien der ersten Versuchsreihe, Harnischflächen (rot), Trennflächen (schwarz)

In der ersten Versuchsreihe wurden drei Modelle mit vertikaler Schichtung hergestellt. Neben zwei kreisrunden Ausbruchsprofilen in MV2 und MV3, wurde in MV4 ein rechteckiges Profil mit gewölbter Firste angefertigt. MV2 stellt aufgrund der fehlenden Daten bei MV1 eine Wiederholung des Versuches dar. Bei MV3 wurden neben den Harnischflächen mit eingelegter Kunststoffolie zusätzliche Trennflächen ohne Einlage hergestellt. Die Versuche wurden alle mit einem Seitendruckbeiwert von $K_0 = 0,5$ durchgeführt. Bei MV2 stellte sich heraus, dass eine Steuerung des horizontalen Hydraulikstempels über die Beipassleitung nur bedingt möglich ist. Durch das Flächenverhältnis der beiden Zylinder von 2:1 wird automatisch ein K_0 -Wert von 0,5 eingehalten. Da dies allerdings nur bis zu einer vertikal aufbrachten Spannung von $\sigma_v = 0,65 \text{ [MPa]}$ ($F_v = 50 \text{ [kN]}$) möglich ist, wurden alle weiteren Versuche getrennt über die Regelventile gesteuert.

5.2 Versuchsauswertung MV2

Im Bereich der beiden Ulmen kommt es bei einer vertikal aufgetragenen Spannung von $\sigma_v = 0,91 \text{ [MPa]}$ ($F_v = 70 \text{ [kN]}$) zu ersten Brucherscheinungen. Größere Abschalungen treten erstmals bei $\sigma_v = 1,56 \text{ [MPa]}$ ($F_v = 120 \text{ [kN]}$) auf. An beiden Ulmbereichen kommt es durch die Harnischflächen zu Spannungskonzentration, die zu Spaltbrüchen führen. Die oberflächlichen Risse links unten in der Sohle sind auf eine Verzerrung durch anhaftendes Material auf der Plexiglasscheibe zurückzuführen. Wie bereits bei MV1 ist auch in diesem Versuch ein Versatz, verursacht durch die geringe Scherfestigkeit der Harnischflächen, deutlich erkennbar.



Abbildung 14 MV2 – Endzustand mit Bruchzonen an der rechten und linken Ulme, Harnischflächen (rot)

5.3 Versuchsauswertung MV3

Wie bereits bei MV2 kommt es auch bei MV3 bei einer vertikal aufgebrachten Spannung von $\sigma_v = 0,65 \text{ [MPa]}$ ($F_v = 70 \text{ [kN]}$) zu Brucherscheinungen im Bereich der beiden Ulmen. Größere Abschalungen treten bei erstmals bei $\sigma_v = 1,56 \text{ [MPa]}$ ($F_v = 120 \text{ [kN]}$) auf. Bei etwa $\sigma_v = 1,30 \text{ [MPa]}$ ($F_v = 100 \text{ [kN]}$) kommt es zu einem Bruch im Bereich des rechten Kämpfers. Die Bruchzone am rechten Ausbruchrand ist eindeutig weitreichender aufgrund der zusätzlichen Trennfläche in diesem Bereich. Bei Spannungssteigerung kommt es zum Hereindrücken von größeren Platten an der rechten Ulme. An der linken Ulme führt die steigende Spannung zu kleineren Abschalungen.



Abbildung 15 MV3 – Endzustand, Harnischflächen (rot), Trennflächen ohne Kunststoffeinlage (grün)

5.4 Versuchsauswertung MV4

Bei MV4 kommt es zu Spannungskonzentrationen zufolge des Ausbruchsprofils. Im Bereich der linken Ulme tritt ein Scherbruch bei $\sigma_v = 0,65 \text{ [MPa]}$ ($F_v = 50 \text{ [kN]}$) ein. Zeitgleich entsteht im rechten unteren Bereich ein kleiner Scherbruch. Die beiden Seitenpfeiler werden durch die Steigerung der aufgebrachtten Spannungen und der damit verbundenen Verschiebung in den Hohlraum gedrückt. Ein vollständiges Hereinfallen des linken Pfeilers wird durch Material im hinteren Bereich des Tunnels verhindert. An diesem Versuch ist die Wirkung der Harnischfläche im Gegensatz zu einer Trennfläche deutlich erkennbar. Die Rasterlinien zeigen einen höheren Versatz an der linken Harnischfläche an. Zurückzuführen ist der große Versatz auf die geringe Scherfestigkeit der Harnischfläche. Die Bruchzonentiefe reicht auf beiden Seiten annähernd gleich tief in das intakte Material.



Abbildung 16 MV4 – Endzustand, Harnischfläche (rot), Trennfläche ohne Kunststoffeinlage (grün)



Abbildung 17 MV4 – Versagensentwicklung, Harnischfläche (rot), Trennfläche ohne Kunststoffeinlage (grün)

5.5 Gegenüberstellung von MV2, MV3 und MV4

Bei der Gegenüberstellung der ersten Versuchsreihe wird der Einfluss von vertikalen Harnisch- und Trennflächen untersucht. MV2 und MV3 zeigen erste Brucherscheinungen bei einer vertikal aufgetragenen Spannung von $\sigma_v = 0,65 \text{ [MPa]}$ ($F_v = 70 \text{ [kN]}$). Gleichzeitig kommt es bei $\sigma_v = 1,56 \text{ [MPa]}$ ($F_v = 120 \text{ [kN]}$) zu größeren Abschaltungen an beiden Ulmen. Die Bruchzone am rechten Ausbruchsrand reicht bei MV3 weiter Richtung rechten Kämpfer als bei MV2. Zurückzuführen ist dies auf die knapp innerhalb des rechten Ausbruchsrandes verlaufende Trennfläche. Die Firstverschiebung bei MV2 und MV3 ist annähernd gleich (Abbildung 18). Der vierte Modellversuch zeigt, welche Auswirkung eine Ausbruchsform in Rechtecksform mit gewölbter Firste hat. Die fehlende Querstützung bei einer größeren Knicklänge des Ausbruchsrandes führt zu einem früheren Bruchereignis als bei den Versuchen mit kreisrundem Profil. Bei allen drei Versuchen ist ein deutlicher Versatz entlang der Harnischflächen erkennbar. Bei MV2 ist eine Verringerung des Versatzes bei den weiter außen liegenden Trennflächen erkennbar. Bei MV3 und MV4 ist an den grün markierten Trennflächen durch die deutlich höhere Scherfestigkeit nahezu kein Versatz erkennbar.

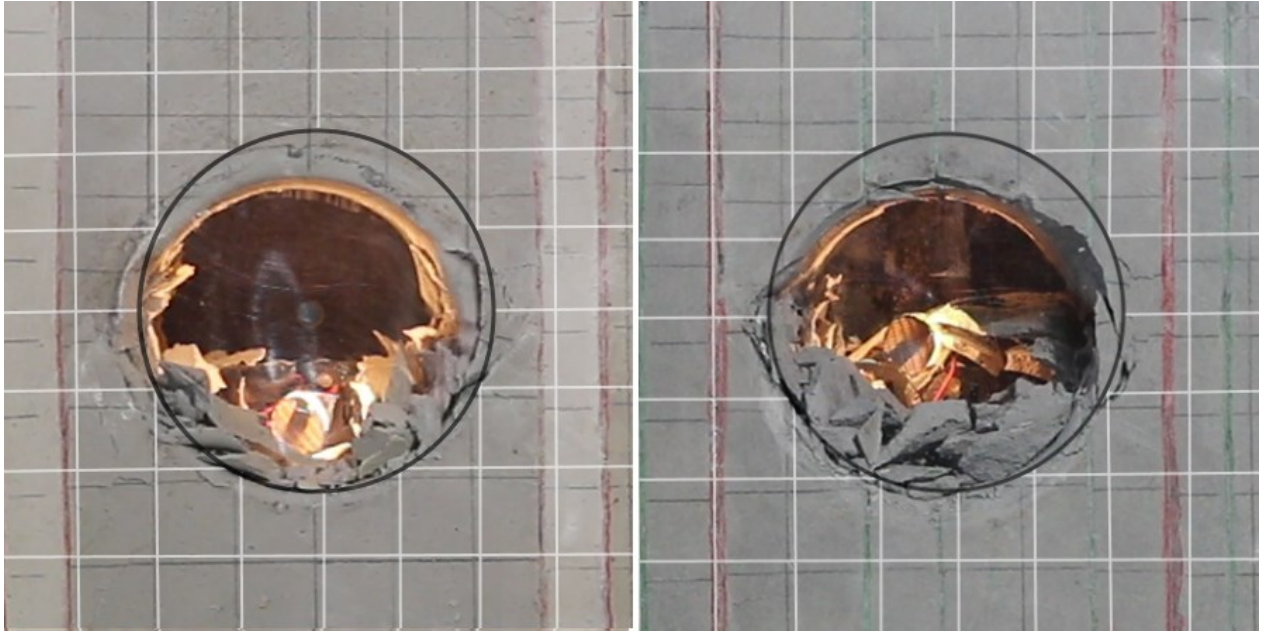


Abbildung 18 Gegenüberstellung der Endverschiebung MV2 - MV3

6 Zweite Versuchsreihe

6.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

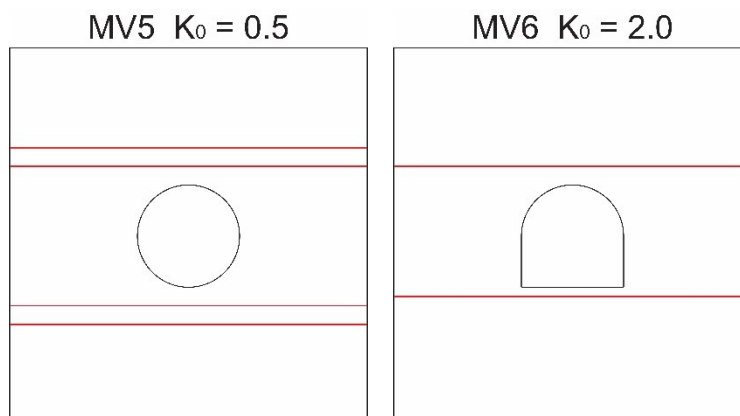


Abbildung 19 Geometrien der Modelle (Erste Versuchsreihe), Harnischflächen (rot)

In der zweiten Versuchsreihe wurden zwei Modelle mit horizontaler Schichtung angefertigt. Im MV5 verliefen jeweils zwei Harnischflächen parallel ober- und unterhalb des Ausbruchsrands. Bei MV6 wurde erstmals der Hohlraum in Kavernenform hergestellt. In unmittelbarer Nähe von Sohle und Firste verlaufen zwei horizontale Harnischflächen. MV5 wurde mit einem Seitendruckbeiwert von $K_0 = 0,5$ durchgeführt. Bei MV6 war die größte Hauptnormalspannungsrichtung horizontal mit einem Seitendruckbeiwert von $K_0 = 2,0$. In dieser Versuchsreihe soll die Einwirkung einer um 90° verdrehten maximalen Hauptspannungsrichtung gezeigt und der Einfluss einer knapp am unteren Ausbruchsrands verlaufenden Harnischfläche auf den Versagensmechanismus untersucht werden.

6.2 Versuchsauswertung MV5

Bei MV5 kommt es bei einer vertikal aufgebrachten Spannung von $\sigma_v = 1,04 \text{ [MPa]}$ ($F_v = 80 \text{ [kN]}$) zu ersten Brucherscheinungen an den Ulmen. An der rechten Ausbruchseite treten kleinere Abschalungen auf. An der linken Ulme kippt bei $\sigma_v = 2,60 \text{ [MPa]}$ ($F_v = 200 \text{ [kN]}$) eine größere Abschalung in den Hohlraum. Die horizontal verlaufenden Harnischflächen nehmen wenig Einfluss auf das Versagen an den beiden Ulmen.



Abbildung 20 MV5 – Endzustand

6.3 Versuchsauswertung MV6

Beim sechsten Modellversuch sei zu erwähnen, dass die obere Harnischfläche herstellungsbedingt bereits vor der Belastung nach oben hin gekrümmt war. Die Kombination der knapp unter- und oberhalb des Ausbruchrandes verlaufenden Harnischflächen und einem Seitendruckbeiwert von $K_0 = 2,0$, entstehen Spannungskonzentrationen in der Firste und Sohle. Der geringe Abstand zwischen Sohle und Harnisch führt bei $\sigma_h = 0,65 [MPa]$ ($F_h = 50 [kN]$) zu einem leichten Anheben der Sohle. Bei $\sigma_h = 0,71 [MPa]$ ($F_h = 55 [kN]$) kommt es zu einem Scherbruch in der Sohle und ein Aufschieben von Material ist die Folge. Durch die erhöhten Spannungen im oberen Ausbruchsrund kommt es im Firstbereich bei $\sigma_h = 0,91 [MPa]$ ($F_h = 70 [kN]$) zu ersten Abschalungen. Bei weiterer Spannungssteigerung kommt es bei $\sigma_h = 1,49 [MPa]$ ($F_h = 115 [kN]$) zu einem Herabfallen einer größeren dreiecksförmigen Abschalung. Zeitgleich entsteht unterhalb der Harnischfläche im Sohlbereich ein Scherbruch. Die Bruchfläche erstreckt sich über die ganze Breite der Kaverne und beißt unter den Eckpunkten der Sohle aus. Der intakte Block, begrenzt durch den Scherbruch und die Harnischfläche, wird bei weiterer Spannungssteigerung nach oben in Richtung Hohlraum geschoben.



Abbildung 21 MV6 – Endzustand

6.4 Gegenüberstellung von MV5 und MV6

Die dritte Versuchsreihe zeigt den Unterschied zwischen einem Seitendruckbeiwert von $K_0 = 0,5$ und $K_0 = 2,0$. Wie der Vergleich der beiden Modelle zeigt, kommt es bei den Versuchen zu Bruchzonen in der Achse der geringsten Druckspannung. Bei einem Seitendruckbeiwert von $K_0 = 2,0$ kommt es dadurch zu Brucherscheinungen in Firste und Sohle. Durch die fehlende Querstützung und dem geringen Abstand zwischen Sohle und horizontaler Harnischfläche kommt es bei MV6 bereits bei geringer Belastung zu einer Sohlhebung und anschließenden Brucherscheinungen. Zurückzuführen ist dies einerseits auf die Hohlraumform, und andererseits auf die nah am Ausbruchsrund horizontal verlaufende Harnischfläche. Der Vergleich dieser Versuche verdeutlicht, dass die Kenntnisse des Seitendruckbeiwertes und der Verlauf von Harnischflächen von großer Bedeutung sind.

7 Dritte Versuchsreihe

7.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

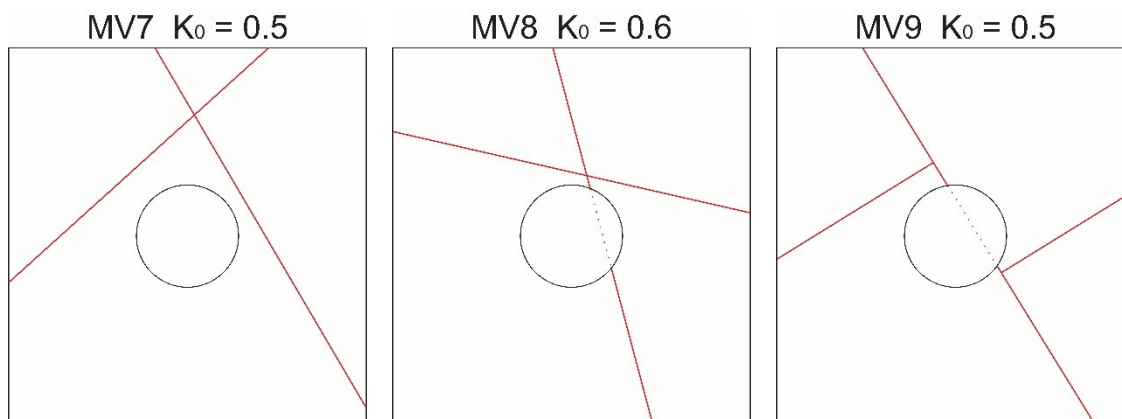


Abbildung 22 Geometrien der Modelle (Erste Versuchsreihe), Harnischflächen (rot)

In der dritten Versuchsreihe wurden drei Modelle mit unterschiedlichen, sich schneidenden Harnischflächen hergestellt. In MV7 verlaufen die Harnischflächen mit einem Normalabstand im Verhältnis 2:1 am Ausbruchsrund. In MV8 wurde eine knapp über dem Ausbruchsrund flach einfallende und eine steil stehende, den Hohlraum schneidende Harnischfläche hergestellt. MV9 zeigt eine durch den Hohlraum schneidende Harnischfläche und annähernd normal dazu eine versetzte Harnischfläche. Bei der dritten Versuchsreihe wurden MV7 und MV9 und mit einem Seitendruckbeiwert von $K_0 = 0,5$ durchgeführt und MV8 mit $K_0 = 0,6$. Untersucht wird bei diesen Versuchen der Einfluss von sich kreuzenden Harnischflächen auf den Versagensmechanismus.

7.2 Versuchsauswertung MV7

Der Einfluss der kreuzenden Harnischflächen bewirkt eine Spannungskonzentration zwischen Ausbruchsrund und Harnisch, wie in Abbildung 23 ersichtlich. Durch den geringen Normalabstand zur Harnischfläche kommt es im oberen Bereich der rechten Ulme zu ersten Brucherscheinungen bei einer vertikal aufgetragenen Spannung von $\sigma_v = 0,65 \text{ [MPa]}$ ($F_v = 50 \text{ [kN]}$). Erst bei $\sigma_v = 1,04 \text{ [MPa]}$ ($F_v = 80 \text{ [kN]}$) sind im oberen Bereich der linken Ulme erste Abschalungen zu erkennen. In beiden Bruchzonen kommt es zu Spaltbrüchen und Abschalungen von dünnen Platten, die in den Hohlraum gedrückt werden. Auch bei diesem Versuch kann ein deutlicher Versatz entlang der Harnischflächen beobachtet werden. Nachdem die Bruchzontiefe die

Harnischfläche bei $\sigma_v = 1,95 \text{ [MPa]}$ ($F_v = 150 \text{ [kN]}$) erreicht, kommt es im Bereich des rechten Kämpfers zu einer größeren Verschiebung und einer Bruchfläche oberhalb der Firste. In weiterer Folge führt die Spannungssteigerung zu einem Scherbruch, ausgehend von der linken Ulme zu der oberhalb der Firste entstandenen Bruchfläche. Begrenzt von der Harnischfläche rechts, der Bruchfläche oben und der Scherfläche links, bildet sich dadurch ein Block am oberen Hohlraumrand. Überträgt man diesen Modellversuch in die Natur, so wären beide Trennflächen weder an der Ortsbrust, noch an der Tunnellaibung sichtbar. Erhöhte Verschiebungen im Bereich des rechten Kämpfers und die Bruchzone deuten auf eine Störung im Nahbereich hin. Da auf keiner Seite eine Aufstandsfläche für den ausgeformten Block gegeben ist, hindert lediglich die Verspannung ein Herabfallen. Durch die Bruchzone an der rechten Ulme nehmen auch die Spannungen in diesem Bereich ab. Eine Verspannung ist dadurch lediglich in Tunnellängsrichtung gegeben.

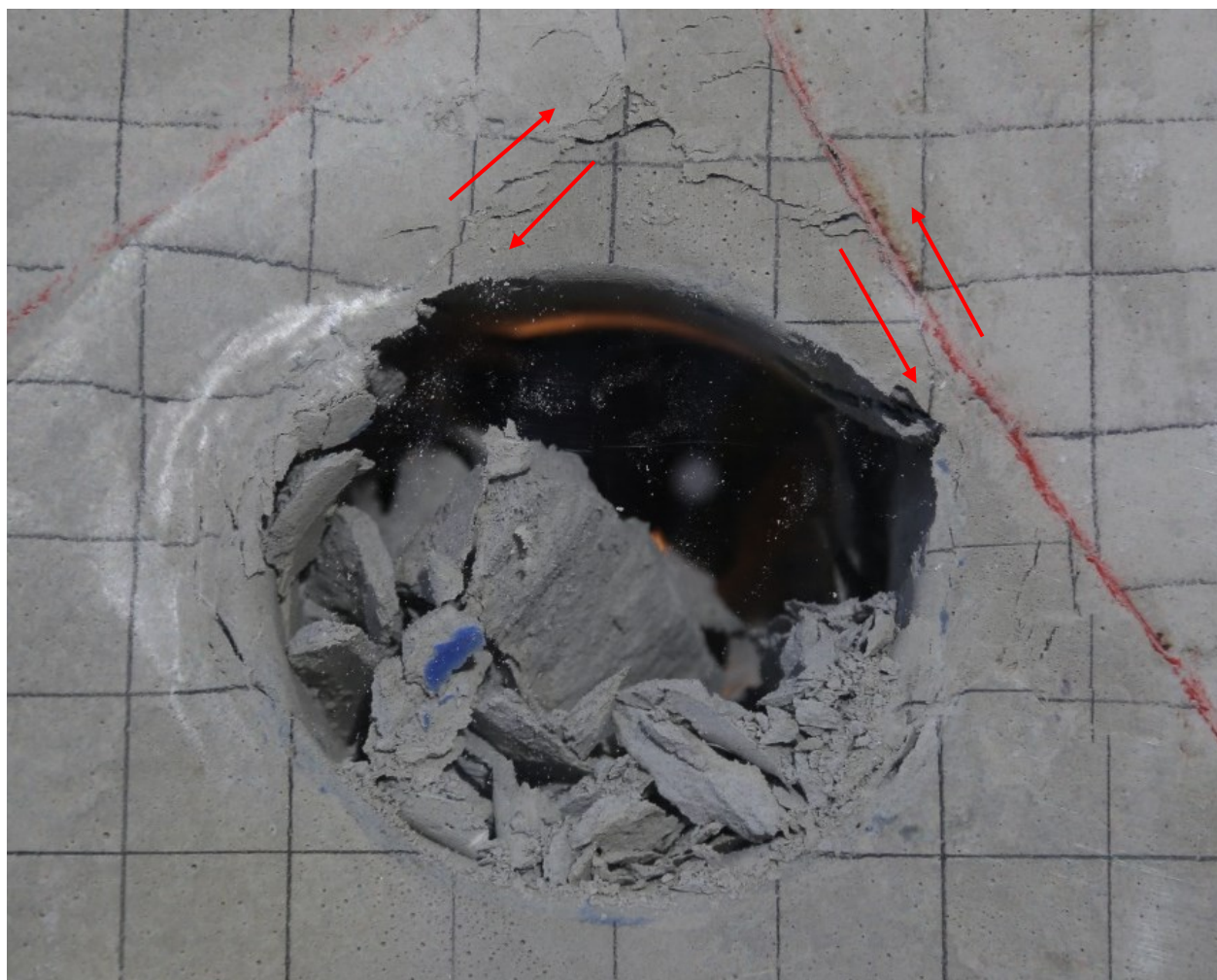


Abbildung 23 MV7 – Endzustand mit eingezeichneter Scherbewegung (rote Pfeile)

7.3 Versuchsauswertung MV8

Bei MV8 kommt es annähernd zeitgleich zu ersten Brucherscheinungen bei einer vertikal aufgetragenen Spannung von $\sigma_v = 0,78 \text{ [MPa]}$ ($F_v = 60 \text{ [kN]}$). Größere Abschaltungen treten bei erstmals bei $\sigma_v = 1,43 \text{ [MPa]}$ ($F_v = 110 \text{ [kN]}$) auf. In weiterer Folge kommt es bei $\sigma_v = 1,69 \text{ [MPa]}$ ($F_v = 130 \text{ [kN]}$) zu annähernd vertikal verlaufenden Scherbrüchen, ausgehend von den beiden Ulmen bis zur Harnischfläche (Abbildung 24). Begrenzt von den beiden Harnischflächen und den Scherbrüchen bilden sich zwei Blöcke am oberen Hohlraumrand. Die Blöcke werden durch die Verspannung und der Querdehnung des Materials gehindert in den Hohlraum zu fallen. Bei Versuchsende stellte sich heraus, dass die Blöcke vorwiegend durch die Verspannung in Tunnellängsrichtung gehalten wurden. Wie in Abbildung 25 ersichtlich, reichte beim Entfernen der Plexiglasscheibe ein Antippen des linken Blockes, um ihn loszulösen.

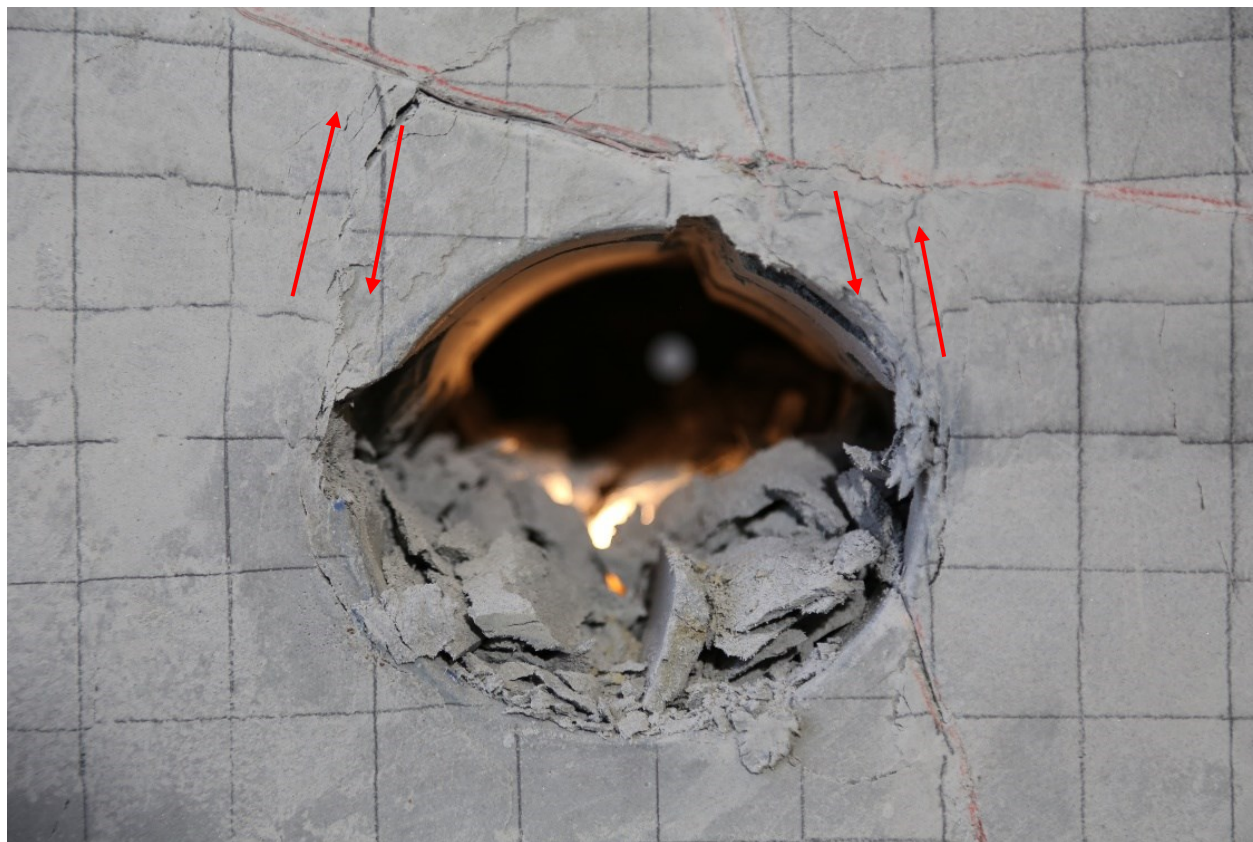


Abbildung 24 MV8 – Endzustand, mit eingezeichneter Scherbewegung (rote Pfeile)



Abbildung 25 MV8 – Herabfallen des ausgeformten Blockes (nach Versuchsende, ohne Plexiglas)

7.4 Versuchsauswertung MV9

Bei MV9 kommt es bereits bei einer vertikalen Spannung von $\sigma_v = 0,45 \text{ [MPa]}$ ($F_v = 35 \text{ [kN]}$) zu einem Scherbruch links der Firste. Ausgehend von der steil einfallenden Harnischfläche bis zum linken Kämpfer bildet sich ein Scherbruch (Abbildung 26). Bei $\sigma_v = 0,71 \text{ [MPa]}$ ($F_v = 55 \text{ [kN]}$) kommt es zu Abschalungen an beiden Ulmen. Begünstigt durch die flach einfallende Harnischfläche bilden sich an der rechten Ulme größere Blöcke, die in Richtung Hohlraum gedrückt werden. Im linken Ulmbereich kommt es zu deutlich kleineren Abschalungen. Um den Versagensmechanismus zu verdeutlichen, wurde bei diesem Modellversuch, nach dem Erreichen der maximal möglichen Spannung, die horizontale Kraft reduziert. Infolge der reduzierten Kraft und der dadurch ausweichenden vertikalen Druckplatte nach rechts, treten weitere Scherbrüche auf. Beim Entfernen der Plexiglasscheibe konnte bei näherer Betrachtung festgestellt werden, dass sich ein Block, begrenzt durch Harnischflächen und einem Scherbruch, gebildet hat (Abbildung 27). Durch die Größe und Position des Blockes war dieser allerdings gut verspannt und konnte nur schwer entfernt werden.



Abbildung 26 MV9 - Endzustand



Abbildung 27 MV9 - Herabfallen des ausgeformten Blockes (nach Versuchsende, ohne Plexiglas)

7.5 Gegenüberstellung MV7, MV8 und MV9

Die dritte Versuchsreihe zeigt den Einfluss von Harnischflächen auf den Versagensmechanismus. Überträgt man diesen Modellversuch auf ein reales Tunnelbauprojekt, sind knapp am Ausbruchsrund verlaufende und parallel zur Tunnelachse streichende Harnischflächen weder an der Ortsbrust noch am Ausbruchsrund sichtbar. Diese Harnischflächen formen zusammen mit entstandenen Bruchflächen Blöcke, die in den Hohlraum fallen können. Durch die Verspannung der ausgeformten Blöcke kam es bei keinem der drei Modellversuche zu einem selbstständigen Herabfallen. Gehindert wurden die Blöcke hauptsächlich durch die von der Querdehnung des Materials resultierende Verspannung in Tunnellängsrichtung. Nach dem Entfernen der Plexiglasscheibe konnte bei allen Modellen ein Herabfallen des ausgeformten Blockes durch eine Berührung herbeigeführt werden.

8 Vierte Versuchsreihe

8.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

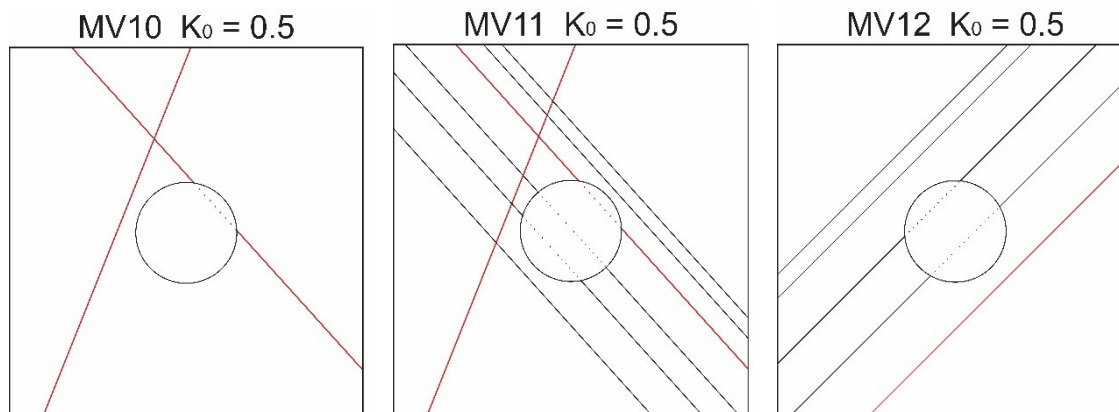


Abbildung 28 Geometrien der Modelle (Erste Versuchsreihe), Harnischflächen (rot), Trennflächen (schwarz)

In der vierten Versuchsreihe wurden drei Modelle angefertigt (Abbildung 28). Die steilstehenden, sich kreuzenden in rot markierten Harnischflächen in MV10 werden in MV11 mit einer parallel verlaufenden, schwarz markierten Trennflächenschar ergänzt. In MV12 wurden mit 45° einfallende Trennflächen hergestellt, wobei die unterste Trennfläche als Harnisch ausgeführt wurde. Diese Versuchsreihe soll den Einfluss von zusätzlich hergestellten Trennflächen auf das Bruchverhalten und die Verschiebungen aufzeigen. Alle Versuche wurden mit einem Seitendruckbeiwert von $K_0 = 0,5$ durchgeführt.

8.2 Versuchsauswertung MV10

Beim zehnten Modellversuch kommt es durch die nah am Ausbruchsrand verlaufende Harnischfläche zu einer Spannungskonzentration an der linken Ulme. Dort sind bereits erste Brucherscheinungen bei einer vertikal aufgebrachten Spannung von $\sigma_v = 0,39 \text{ [MPa]}$ ($F_v = 30 \text{ [kN]}$) sichtbar. Erst bei einer vertikalen Spannung von $\sigma_v = 0,91 \text{ [MPa]}$ ($F_v = 70 \text{ [kN]}$) kommt es an der rechten Ulme zum Abschalen von Material. Während die Spannungssteigerung in der linken Ulme zu Sprödbrüchen und einer Auflockerung führt, entsteht bei $\sigma_v = 1,10 \text{ [MPa]}$ ($F_v = 85 \text{ [kN]}$) am rechten Ausbruchsrand ein Scherbruch. Die Bruchfläche verläuft mit annähernd 30° zur Hauptnormalspannungsrichtung geneigt. Beginnend bei einer Spannung von $\sigma_v = 2,08 \text{ [MPa]}$ ($F_v = 50 \text{ [kN]}$) kommt es im linken Ulmenbereich zu einem Scherbruch und bei

weiterer Spannungserhöhung zu einem Hinausschieben eines größeren intakten Blockes, wie in Abbildung 30 ersichtlich.

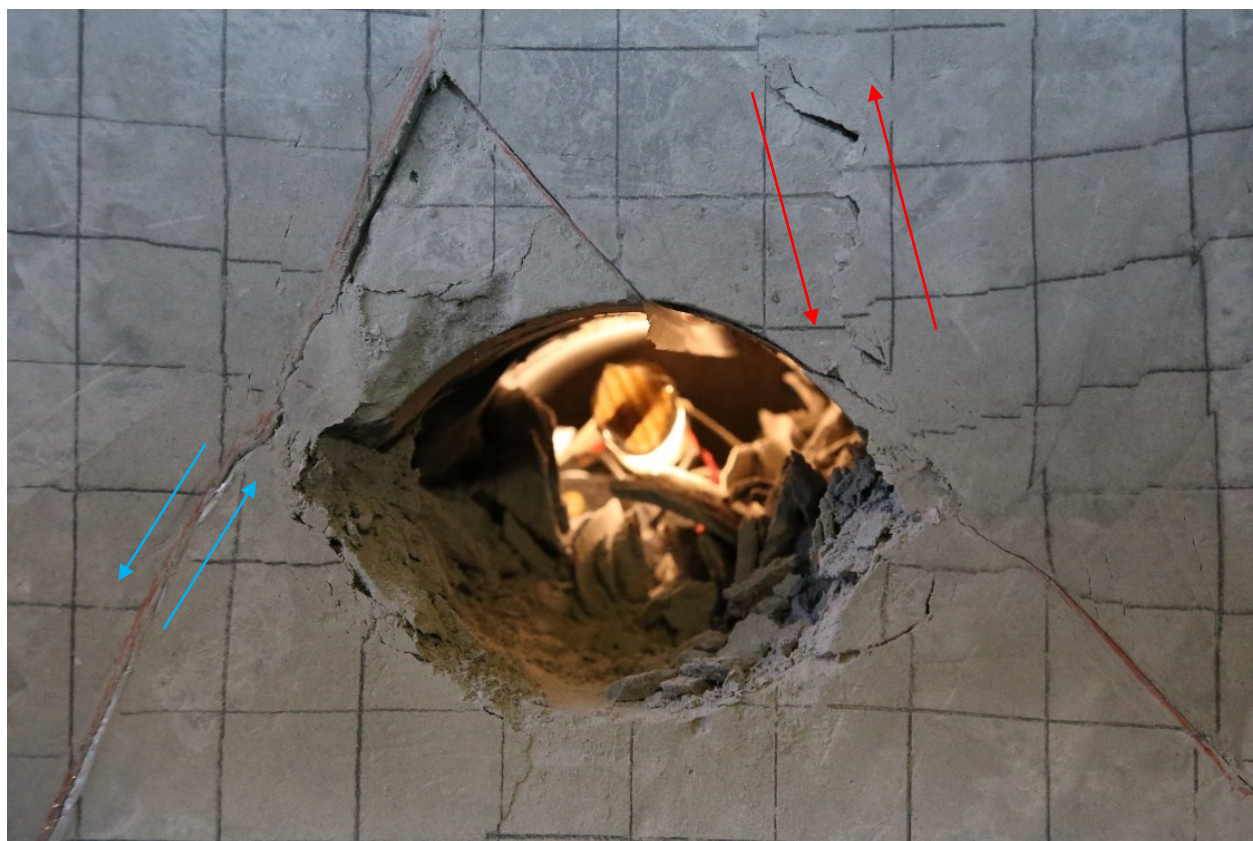


Abbildung 29 MV10 – Endzustand mit eingezeichneter Scherbewegung (rote und blaue Pfeile)



Abbildung 30 MV10 – Bruchentwicklung mit eingezeichneter Scherbewegung (rote Pfeile)

Um ein Herausfallen des von den Harnischflächen und der Bruchzone in der linken Ulme begrenzten Blockes zu provozieren, wurde in weiterer Folge die horizontal aufgebrachte Spannung reduziert. Die in Abbildung 29 erkennbaren Scherbewegungen, außerhalb vom rechten Aubruchrand, entstanden erst durch die Reduktion der horizontalen Kraft. Trotz der nahezu vollständigen Reduktion der horizontal aufgebrachten Spannung auf $\sigma_h = 0,12 \text{ [MPa]}$ ($F_h = 10 \text{ [kN]}$) blieb der Block stabil. Wie bereits bei vorherigen Versuchen, konnte nach Entfernen

der Plexiglasscheibe ein Herabfallen des Blockes durch Berühren herbeigeführt werden (Abbildung 31).



Abbildung 31 MV10 – Herabfallen des Blockes nach dem Entfernen der Plexiglasscheibe

8.3 Versuchsauswertung MV11

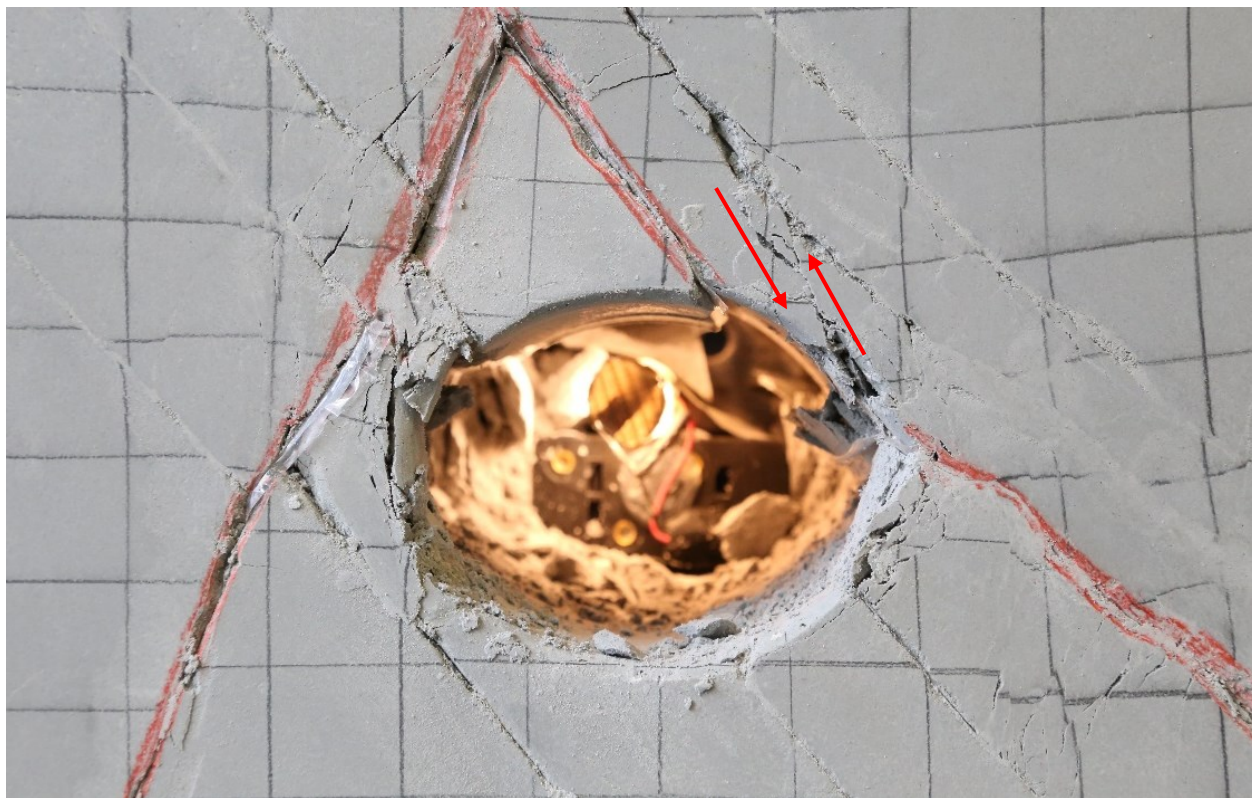


Abbildung 32 MV11 – Endzustand mit eingezeichneter Scherbewegung (rote Pfeile)

In dem in Abbildung 32 gezeigten Endzustand des elften Modellversuches ist deutlich zu erkennen, dass der durch die Harnischfläche, den Trennflächen und den Hohlraumrand begrenzte Block im linken Ulmbereich aufgrund der Spannungskonzentrationen eine starke Deformation erfährt. Dort sind bereits erste Risse bei einer vertikal aufgebrachtten Spannung von $\sigma_v = 0,39 \text{ [MPa]}$ ($F_v = 30 \text{ [kN]}$) sichtbar (Abbildung 33). Am linken Ausbruchsrund treten bei Spannungssteigerung die Brucherscheinungen fast ausschließlich in dem von der Harnischfläche und den beiden durch den Tunnel verlaufenden Trennflächen begrenzten Block auf. Am rechten Ausbruchsrund kommt es bei steigender Spannung zu großflächigen Abschaltungen unterhalb der Harnischfläche. Bei einer vertikalen Spannung von $\sigma_v = 1,56 \text{ [MPa]}$ ($F_v = 120 \text{ [kN]}$) kommt es im Bereich des rechten Kämpfers zu einem Scherbruch (Abbildung 34). Die Bruchfläche verläuft steil bis zur nächsten Trennfläche und bei weiterer Spannungssteigerung kann eine deutliche Scherbewegung entlang dieser Fläche festgestellt werden.

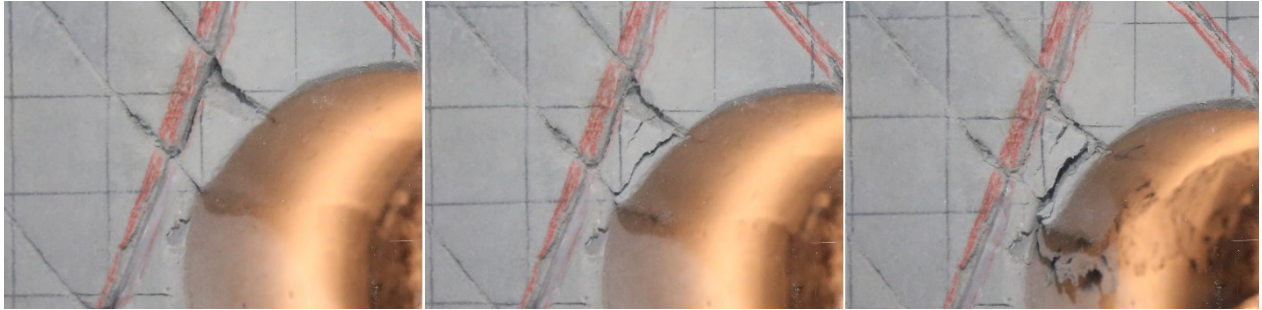


Abbildung 33 MV11 - Bruchentwicklung an der linken Ulme



Abbildung 34 MV11 - Scherbruchentwicklung im rechten Kämpfer (rote Pfeile)

Wie bereits bei MV10 wurde versucht, ein Herausfallen des Blockes in der Firste durch die Reduktion der horizontal aufgebrachten Spannung zu erreichen. Auch in diesem Modellversuch hinderte die Verspannung in Tunnellängsrichtung den Block vor einem Herabfallen in den Hohlraum. Im Gegensatz zu den anderen Versuchen reichte das Entfernen der Plexiglasscheibe um ein Herabfallen zu erreichen (Abbildung 35).



Abbildung 35 MV11 - Herabfallen des Blockes in der Firste

8.4 Versuchsauswertung MV12

Die grün markierten Trennflächen und die rote Harnischfläche führt zu einer leichten Verdrehung der Bruchzonen im Uhrzeigersinn. Bei $\sigma_v = 0,65 \text{ [MPa]}$ ($F_v = 50 \text{ [kN]}$) treten erste Brucherscheinungen im linken Kämpfer und am rechten unteren Ausbruchsrund im geringsten Normabstand zur Harnischfläche auf. Bei Erhöhung der aufgetragenen Spannung kommt es zu Abschaltungen an beiden Bruchzonen. Bei einer vertikalen Spannung von $\sigma_v = 1,69 \text{ [MPa]}$ ($F_v = 130 \text{ [kN]}$) kommt es am rechten Ausbruchsrund zu größeren Abschaltungen. Bei $\sigma_v = 2,60 \text{ [MPa]}$ ($F_v = 200 \text{ [kN]}$) kommt es zu einem, mit annähernd $\alpha = 30^\circ$ in Richtung Hohlraum geneigten Scherbruch (Abbildung 36). Im Gegensatz zur rot markierten Harnischfläche, weisen die in grün markierten Trennflächen nahezu keinen Versatz auf.



Abbildung 36 MV12 – Endzustand, Harnischfläche (rot), Trennfläche (grün), Scherbewegung (rote Pfeile)

8.5 Gegenüberstellung von MV10, MV11 und MV12

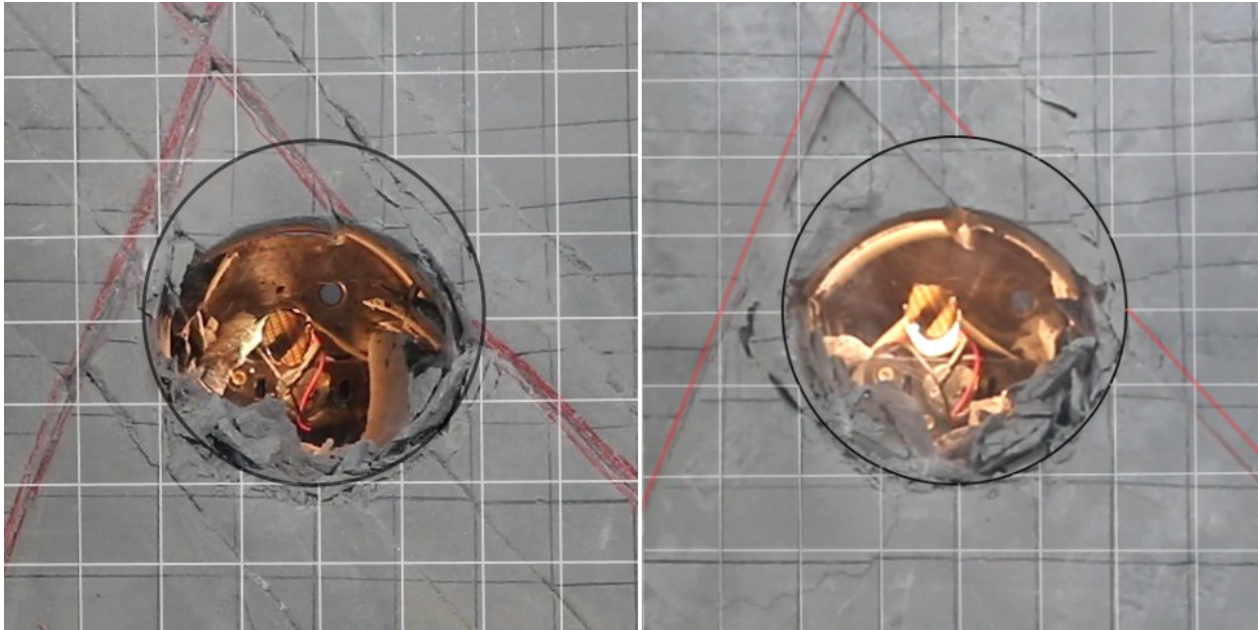


Abbildung 37 Gegenüberstellung MV10 – MV11, Überlagerung von Hohlraum und Raster bei Versuchsstart (schwarzer Kreis, weißes Raster)

Bei der Gegenüberstellung von MV10 und MV11 wird der Einfluss von zusätzlichen Trennflächen auf die Bruch- und Versagensentwicklung untersucht. Wie bereits in Abbildung 28 ersichtlich, sind die in rot markierten Harnischflächen bei MV10 und MV11 gleich angeordnet. Zusätzlich wurden bei MV11 parallel zur flacher einfallenden Harnischfläche mehrere Trennflächen hergestellt. Um die beiden Modelle vergleichen zu können, wurden die Aufnahmen bei Versuchsende, vor der Reduktion der horizontal aufgebrachtten Spannung, herangezogen. In Abbildung 37 werden die beiden Versuche gegenübergestellt. Bei beiden Modellversuchen kommt es durch die nah am Ausbruchsrund verlaufende Harnischfläche zu einer Spannungskonzentration an der linken Ulme. Erste Brucherscheinungen treten bei beiden Modellen bei einer vertikalen Spannung von $\sigma_v = 0,39 \text{ [MPa]}$ ($F_v = 30 \text{ [kN]}$) auf. Bei $\sigma_v = 0,91 \text{ [MPa]}$ ($F_v = 70 \text{ [kN]}$) kommt es bei beiden Versuchen zu einer Bruchentwicklung an der rechten Tunnellaubung. Bei MV11 entsteht unterhalb des Schnittpunktes der Harnischfläche mit dem Ausbruchsrund ein Spaltbruch. MV10 hingegen, weist dünne Abschalungen oberhalb des Schnittpunktes auf. Bei weiterer Spannungssteigerung kommt es bei beiden Versuchen zu Scherbrüchen oberhalb der rechten Ulme. Bei MV10 kommt es bei $\sigma_v = 1,04 \text{ [MPa]}$ ($F_v = 80 \text{ [kN]}$), beginnend beim Ausbruchsrund, zu einem Scherbruch. Ähnlich MV10, kann bei MV11 bei $\sigma_v = 1,04 \text{ [MPa]}$ ($F_v = 80 \text{ [kN]}$) ein Scherversagen etwas außerhalb der rechten Ulme festgestellt werden. Zu einem weiteren Scherbruch kommt es bei

MV10 im linken Kämpfer bei $\sigma_v = 1,56 \text{ [MPa]}$ ($F_v = 120 \text{ [kN]}$). Im Gegensatz zu dem weit nach oben verlaufenden Scherbruch bei MV10, reichen die Scherbrüche bei MV11 lediglich bis zur nächstgelegenen Trennfläche. Der linke Ausbruchsrund unterscheidet sich bei beiden Modellversuchen stark voneinander. Beeinflusst durch die Trennflächen, kommt es bei MV10 hauptsächlich im Bereich des begrenzten Blockes zu Brucherscheinungen. Bei MV10 entsteht durch die Spannungssteigerung eine Bruchzone normal zur Harnischfläche. Während der Bereich unterhalb der Ulme bei MV11 intakt bleibt, entwickelt sich bei MV10 und einer vertikalen Spannung von $\sigma_v = 2,08 \text{ [MPa]}$ ($F_v = 160 \text{ [kN]}$) ein Scherbruch, der im linken Sohlbereich ausbeißt. Die Bruchzone bei MV10 bietet eine bessere Aufstandsfläche für den Block in der Firste, als bei MV11. Durch die entstandene Bruchzone unterhalb des Blockes in MV11 kommt es zu einer Spannungsumlagerung, wodurch die Verspannung des Blockes in der Firste reduziert wird. Der Block wird lediglich durch die Verspannung in Tunnellängsrichtung gehalten. Beim Entfernen der Plexiglasscheibe ist es zu einem plötzlichen Herabfallen des Blockes bei MV11 gekommen. Die Firstverschiebung ist bei beiden Versuchen annähernd gleich groß. Wie die beiden Modellversuche zeigen, wirken sich zusätzliche Trennflächen mit hoher Scherfestigkeit zwar auf die Bruchentwicklung aus, beeinflussen jedoch die Verformungen des Hohlraums kaum.

9 Verschiebungsdatenauswertung

9.1 Auswertung mit Particle Image Velocimetry

Um die Verschiebungen der Modellversuche anschaulich darzustellen, wurden die Aufzeichnungen mit der PIV-Methode (Particle Image Velocimetry) analysiert. Für die Berechnung wurde das Matlab-Program PIVlab (Version 1.41) von Thielicke & Stamhuis (2014) verwendet. Bei dieser Methode wird die Pixelverschiebung zwischen zwei Bildern berechnet wodurch die Bewegungsrichtung und Bewegungsgeschwindigkeit näherungsweise ermittelt werden kann. In den durchgeführten Versuchen wurde jedes fünfundzwanzigste Bild der Videoaufnahmen für die Analyse verwendet. Die Berechnung der Gesamtverschiebungen der einzelnen Punkte wurde anhand des Masterprojektes von Aichinger (2016) und der Masterarbeit von Stadlbauer (2016) durchgeführt.

9.2 Analyse

Wie in Abbildung 38 ersichtlich, ist die Richtung der größten Druckspannung deutlich erkennbar. Durch die Belastung des Modells von oben und rechts entsteht eine asymmetrische Verzerrung des Modells. Die größten Verschiebungen erfährt das Model im Bereich zwischen der Stahlplatte und dem Hohlraum. Zur Erreichung eines realitätsnahen Verzerrungszustandes müsste das Modell von allen vier Seiten belastet werden. Durch die Spiegelung um die vertikale Symmetrieachse des Modells erhält man einen Verschiebungsverlauf wie er bei einer Belastung von beiden Seiten in Belastungsrichtung entstehen würde (Abbildung 39).

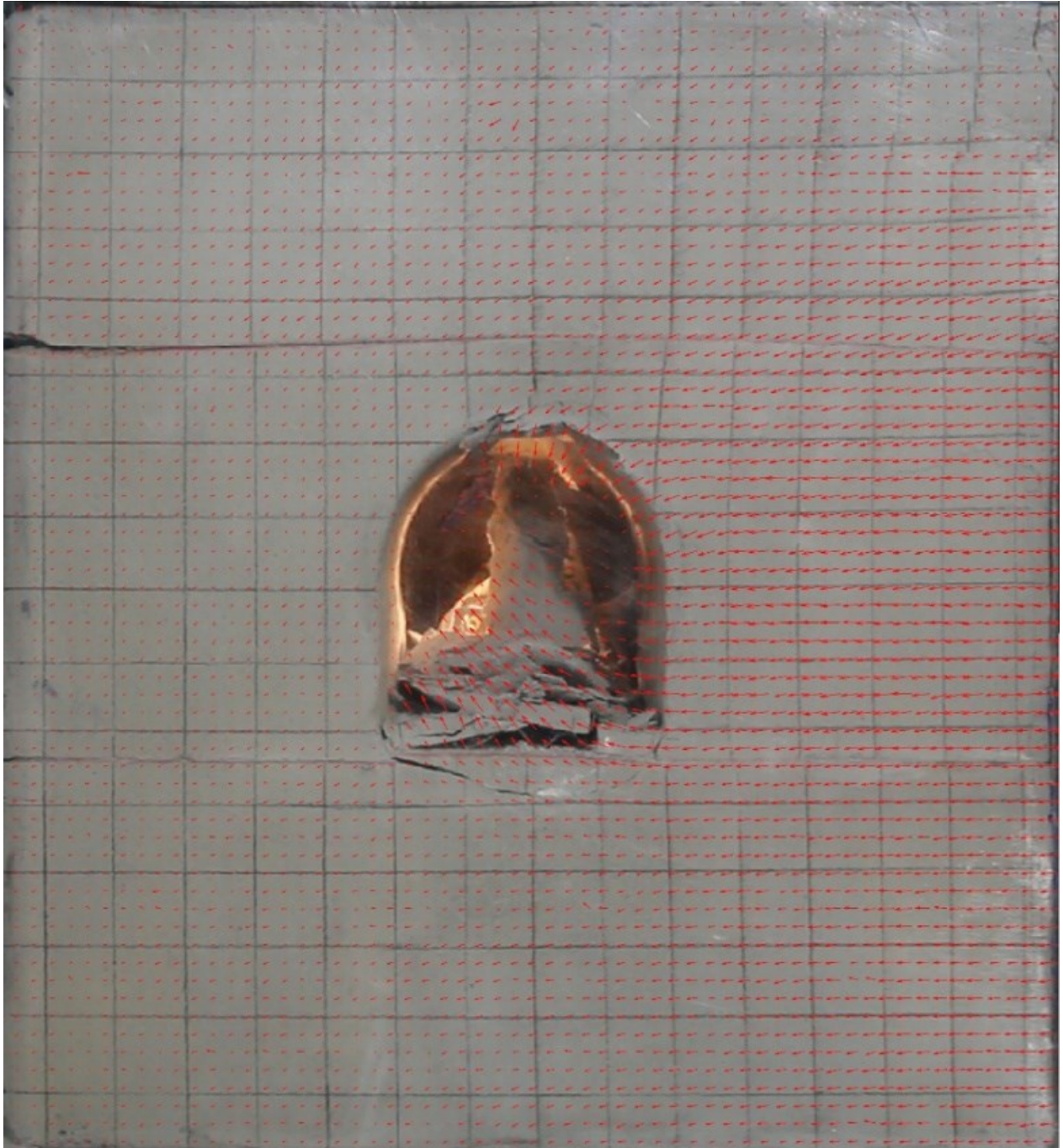


Abbildung 38 MV6 mit überlagerten Verschiebungsvektoren (rote Pfeile) der PIV-Methode

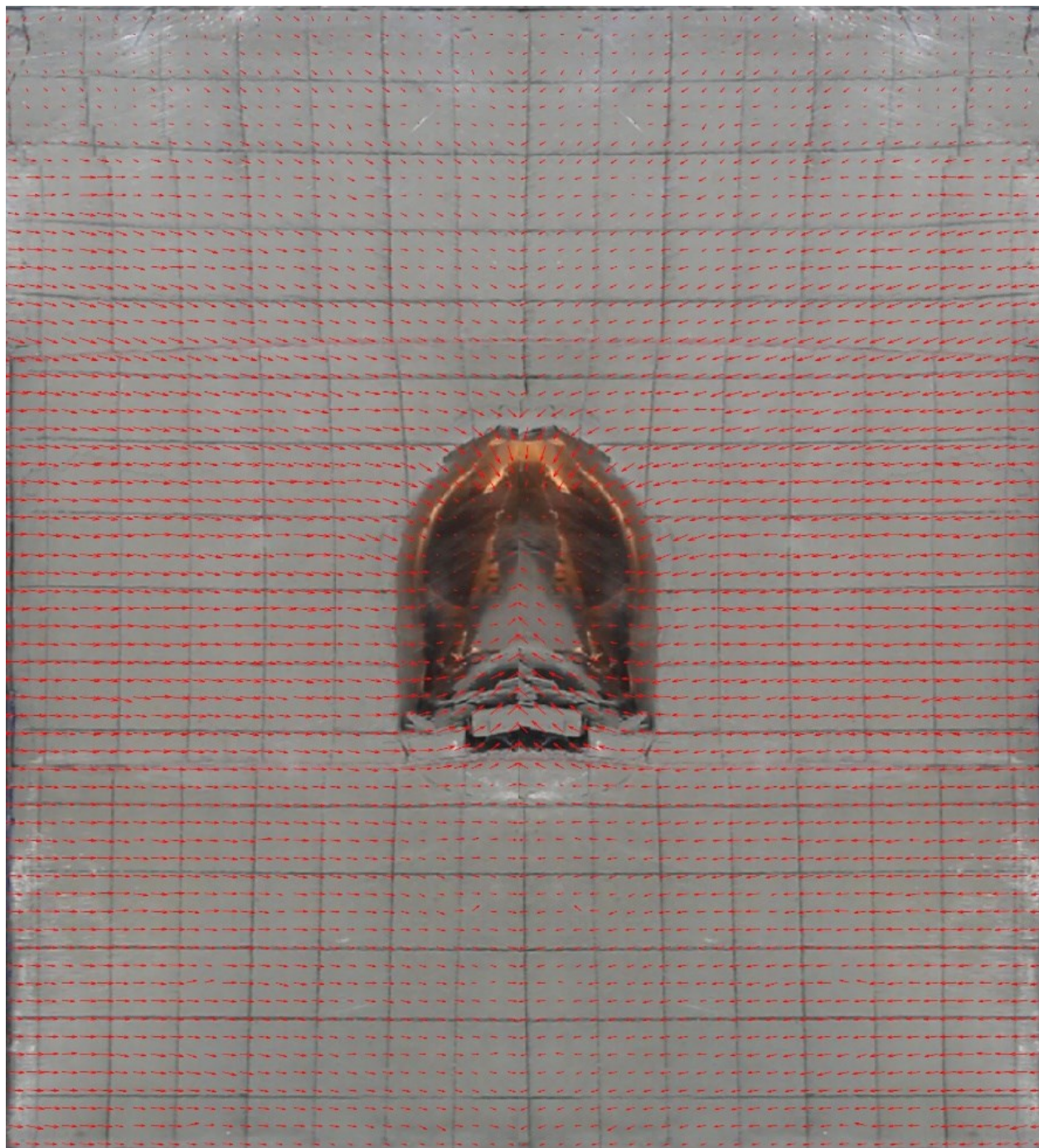


Abbildung 39 MV6 – Spiegelung des Modells um die vertikale Symmetrieachse

10 Zusammenfassung und Ausblick

Mit Modellversuchen in der Biaxialmaschine ist es möglich, Bruch- und Versagensmechanismen von Hohlräumen darzustellen. In dieser Arbeit wurden zwölf Modellversuche mit unterschiedlichen Trennflächen und Harnischflächen hergestellt. Zu Beginn wurden Verfahren getestet, das Modell mit exakten Schnitten zu zerteilen und somit Trennflächen in dem homogenen Modellblock herzustellen. In den Harnischflächen eingelegte Kunststofffolien dienten zur Reduktion der Scherfestigkeit.

In der ersten Modellreihe konnte gezeigt werden, wie sich vertikal verlaufende Harnisch- und Trennflächen auf die Brucherscheinungen und Verschiebungen auswirken. Im direkten Vergleich von MV2 und MV3 konnte anhand der Firstverschiebung und den entstandenen Bruchzonen kein signifikanter Unterschied zwischen dem Modell mit Harnischflächen und dem Modell mit zusätzlichen Trennflächen erkannt werden. Es konnte gezeigt werden, dass Trennflächen mit relativ hoher Scherfestigkeit einen geringen Einfluss auf die Verschiebungen nehmen. Im Versuch mit dem Rechteckprofil mit gewölbter Firste führten Spannungskonzentrationen und die fehlende Querstützung zu frühzeitigen Brucherscheinungen in den Ulmen.

Bei der zweiten Modellreihe wurde anhand von zwei Versuchen der Einfluss von unterschiedlichen Seitendruckbeiwerten von $K_0 = 0,5$ und $K_0 = 2,0$ aufgezeigt. Anhand von diesen beiden Versuchen konnte gezeigt werden, dass sich die Bruchzonen normal zur Richtung der größten Druckspannung ausbilden. Der sechste Modellversuch zeigt die Brucherscheinungen infolge der Kavernengeometrie und der knapp ober- und unterhalb des Ausbruchsrandes verlaufenden Harnischflächen.

In der dritten Versuchsreihe wurde anhand von drei Modellen die Auswirkung von gekreuzten Harnischflächen untersucht. Die Harnische wiesen unterschiedliche Abstände und Orientierungen zum Hohlraumrand auf. Es konnte beobachtet werden, dass knapp am Ausbruchsrand verlaufende Harnischflächen zu Spannungskonzentration und darauffolgende Brucherscheinungen im geringsten Normalabstand zum Hohlraum führen. Durch diese Modellversuche konnte gezeigt werden, wie Harnischflächen gemeinsam mit entstandenen Bruchflächen Blöcke bilden. Es konnte festgestellt werden, dass es durch die Querdehnung des Materials zu einer Verspannung der Blöcke in Tunnellängsrichtung gekommen ist und dadurch

gehindert werden in den Hohlraum zu fallen. Es konnte gezeigt werden, welche Gefahren von „versteckten“ parallel zur Tunnelachse streichenden Harnischflächen ausgehen, die weder am Hohlraumrand noch an der Ortsbrust sichtbar sind. Die Videoauswertung der Versuche zeigt die stufenlose Entwicklung des Gebirgsverhaltens und kann dadurch besser verstanden werden.

Die Verschiebungsvektorenauswertung mit der PIV – Methode konnte das Problem der starren Auflager des Modells in der Biaxialmaschine aufzeigen. Durch die Randbedingungen der Biaxialmaschine ist es nicht möglich, einen realistischen Verzerrungszustand zu erreichen. Um einen realistischeren Verzerrungszustand zu erreichen, sollte die Scherfestigkeit zwischen Modell und Stahlrahmen auf ein Minimum reduziert werden. Dies könnte zum Beispiel durch eine glatte Kunststoffeinlage erfolgen.

Für weitere Arbeiten wäre es sinnvoll, einige Anpassungen an der Biaxialmaschine durchzuführen. Durch die Aufrüstung des horizontalen Druckzylinders auf die gleiche Fläche des vertikalen Druckzylinders könnten unterschiedliche Seitendruckbeiwerte ohne Einschränkung untersucht werden. Da die Herstellung der Trennflächen einen hohen Aufwand darstellt, ist eine Möglichkeit den Versuchsblock maschinell zu zerteilen erstrebenswert.

Literatur

Stadlbauer, K. 2016. Durchführung und Untersuchung von biaxialen Modellversuchen. Masterarbeit am Institut für Felsmechanik und Tunnelbau. Technische Universität Graz.

Aichinger, S. 2015. Biaxialmaschine – Modellherstellung, Versuchsaufbau und Druckversuche zur Wiederinbetriebnahme der Maschine. Bachelorprojekt am Institut für Felsmechanik und Tunnelbau. Technische Universität Graz.

Aichinger, S. 2016. Verformungs- und Spannungsermittlung von Biaxialdruckversuchen anhand von PIV-Datenanalyse. Masterprojekt am Institut für Felsmechanik und Tunnelbau. Technische Universität Graz.

Lagger, M. 2014. Wiederinbetriebnahme und Optimierung der Biaxialmaschine. Bachelorprojekt am Institut für Felsmechanik und Tunnelbau. Technische Universität Graz.

Lisec, S. 2002b. Modellversuche mit der Biaxmaschine. Diplomarbeit am Institut für Felsmechanik und Tunnelbau. Technische Universität Graz.

Kaltenböck, A. 2000. Modellrahmen, Projekt Geotechnik am Institut für Felsmechanik und Tunnelbau. Technische Universität Graz.

Feder, G. 1978. Versuchsergebnisse und analytische Ansätze zum Scherbruchmechanismus im Bereich tiefliegender Tunnel. *Felsmechanik*. 1978, Bd. 6, S. 71-102.

Huang, F., Zhu, H., Xu, Q., Cai, Y. & Zhuang, X. 2013. The effect of weak interlayer on the failure pattern of rock mass around tunnel – Scaled model tests and numerical analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*. Vol.35, pp. 207-218, Elsevier: Amsterdam.

Thielicke, W. & Stamhuis, E. J. 2014. PIVlab - Time-Resolved Digital Particle Image Velocimetry Tool for MATLAB (version: 1.41).

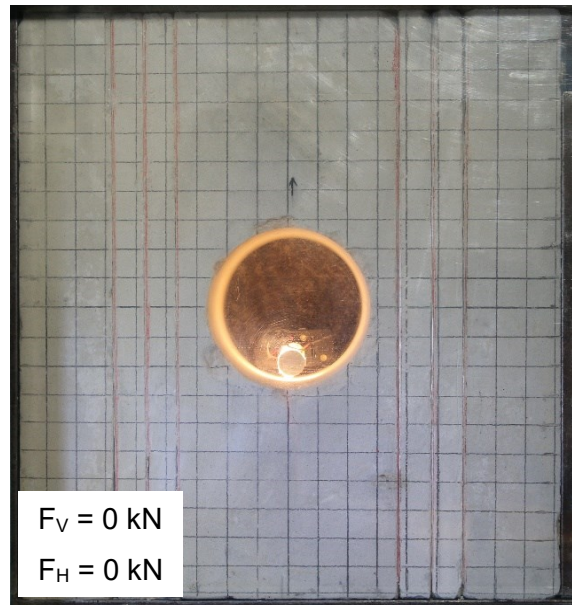
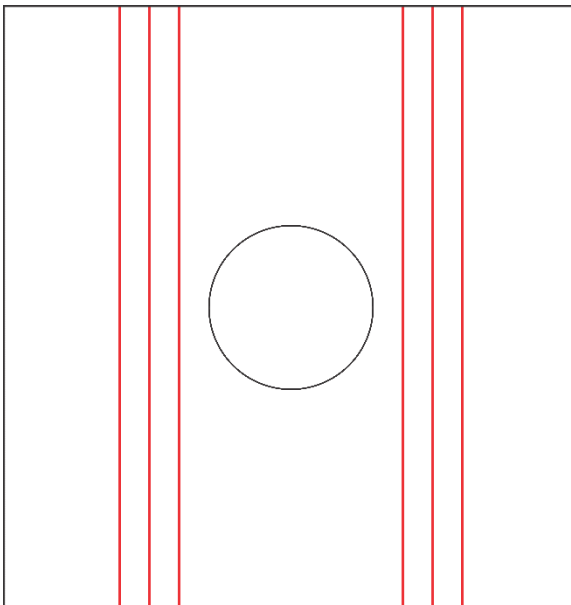
Anhang

Modellversuch 1

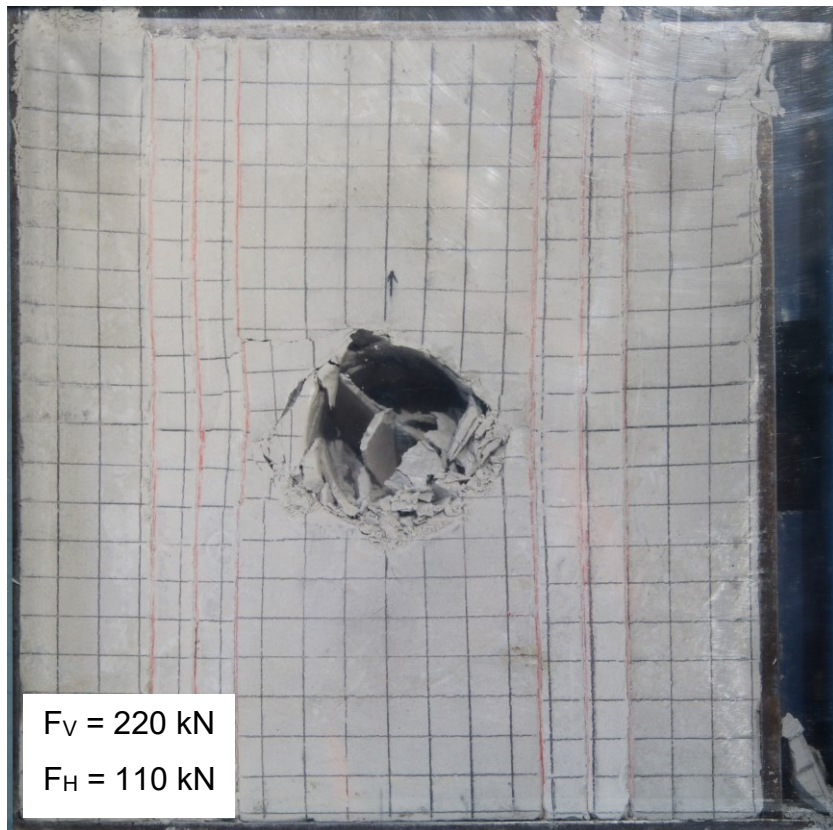
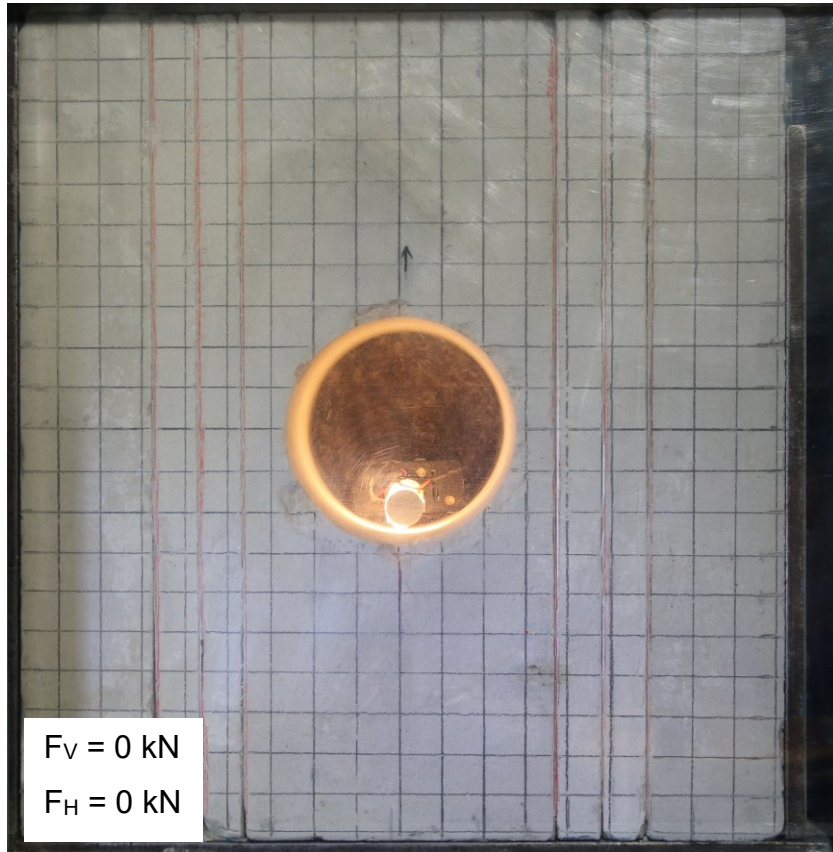
Modellparameter

Material	1:7:2:0,011	[A:SM:W:FM]
Festigkeit	0,7	[MPa]
K_0	0,5	[-]
Raster	2,0	[cm]
Modellbreite	38,5	[cm]
Modellhöhe	40,5	[cm]
Modelltiefe	20	[cm]
Tunnelgeometrie	Kreisprofil, 11cm	[-]
Tunnelachse	000/00	[°]
Trennflächen	6	[Stk.]
Harnisch (rote Linie)	090/90	[°]

Modellgeometrie



Modellversuch 1



Modellversuch 1

Verschiebungsbild



Harnischfläche vor Belastung



Harnischfläche nach Belastung

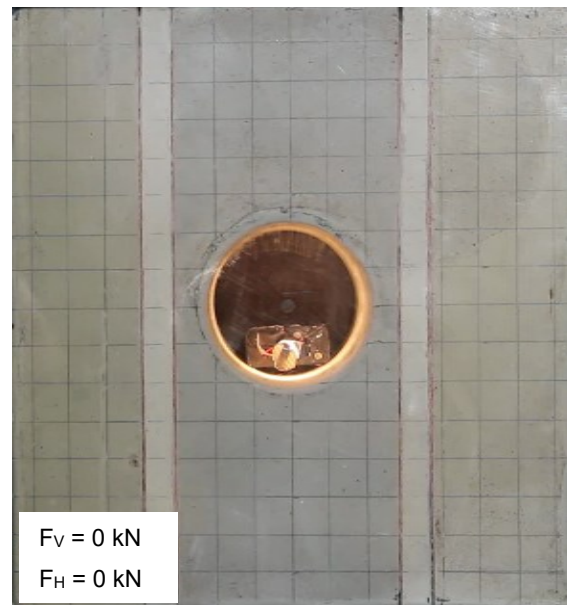
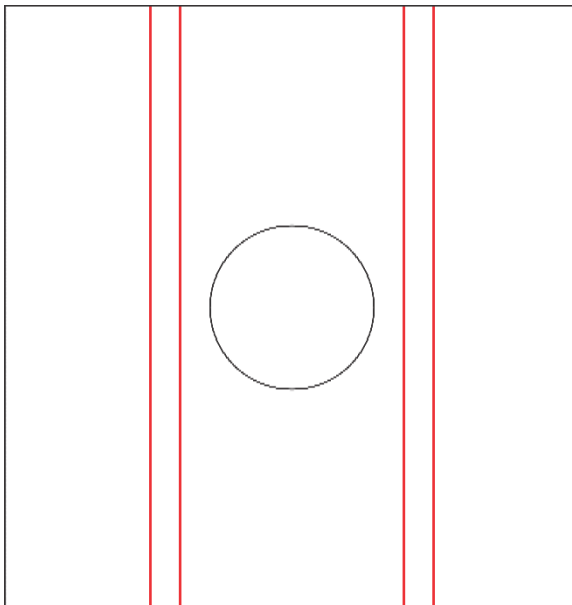


Geometrie des Hohlraumes vor Belastung

Modellversuch 2

Modellparameter		
Material	1:7:2:0,011	[A:SM:W:FM]
Festigkeit	0,68	[MPa]
K_0	0,5	[-]
Raster	2,5	[cm]
Modellbreite	38,5	[cm]
Modellhöhe	40,5	[cm]
Modelltiefe	20	[cm]
Tunnelgeometrie	Kreisprofil, 11cm	[-]
Tunnelachse	000/00	[°]
Trennflächen	4	[Stk.]
Harnisch (rote Linie)	090/90	[°]

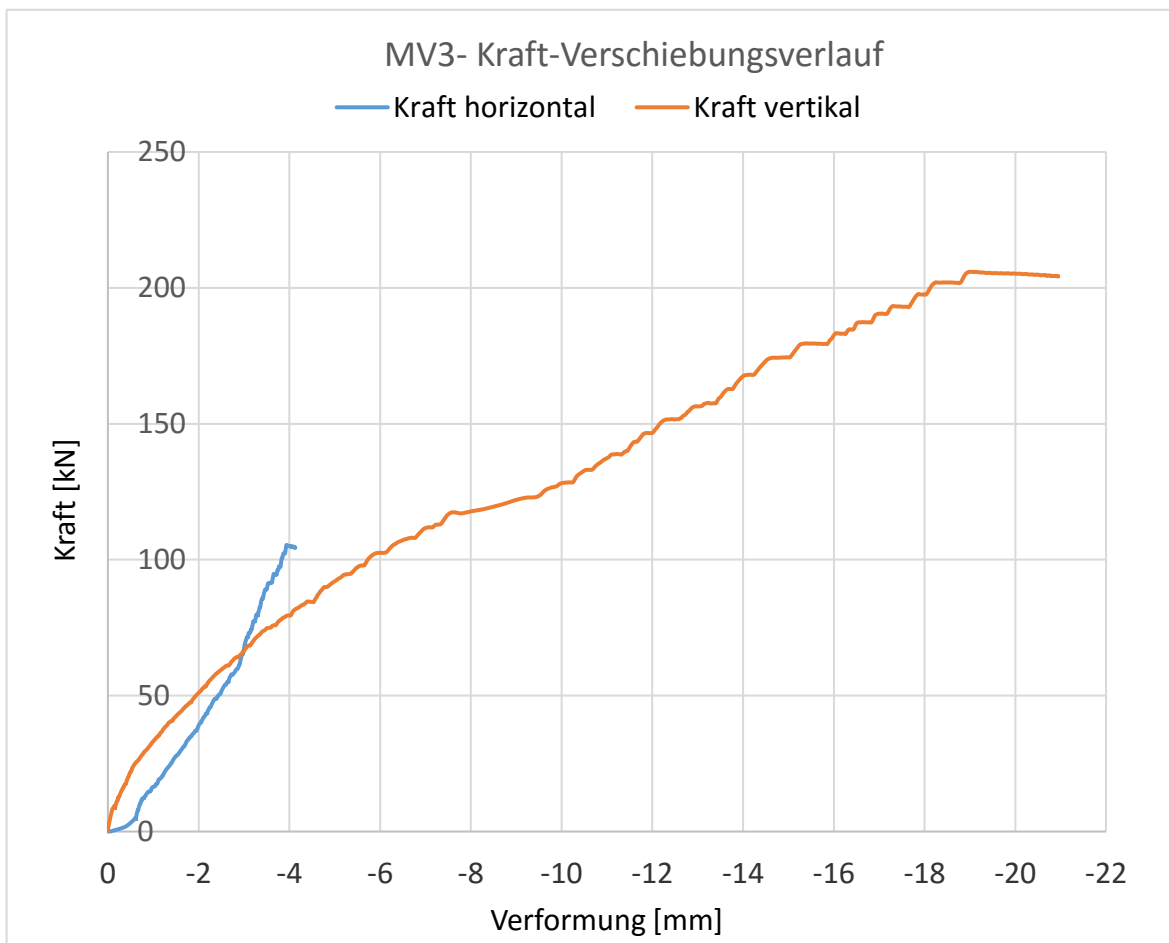
Modellgeometrie



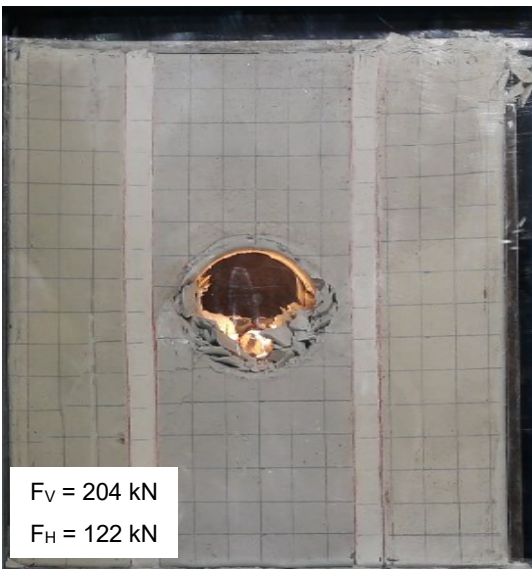
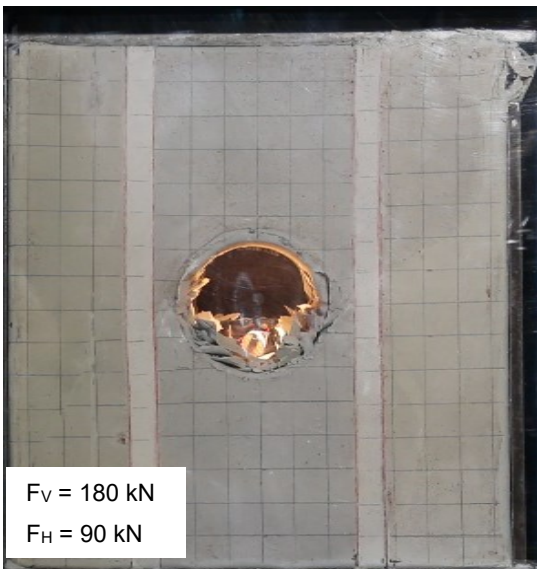
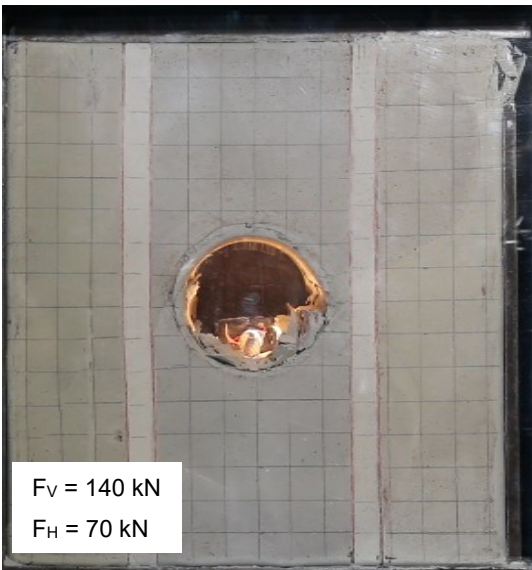
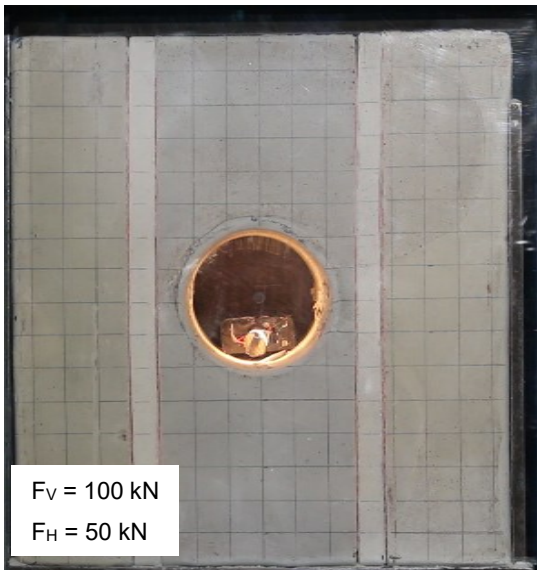
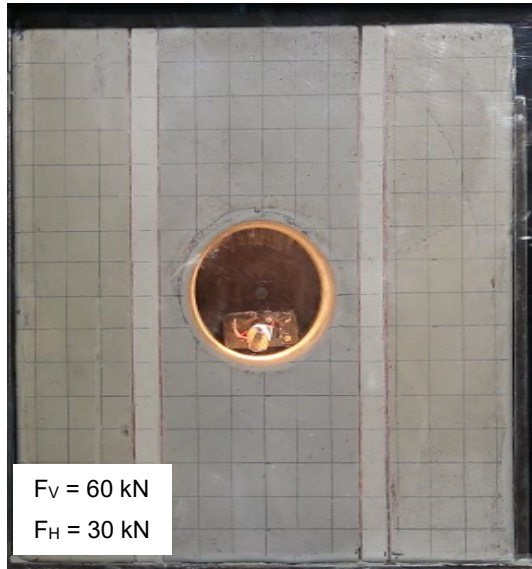
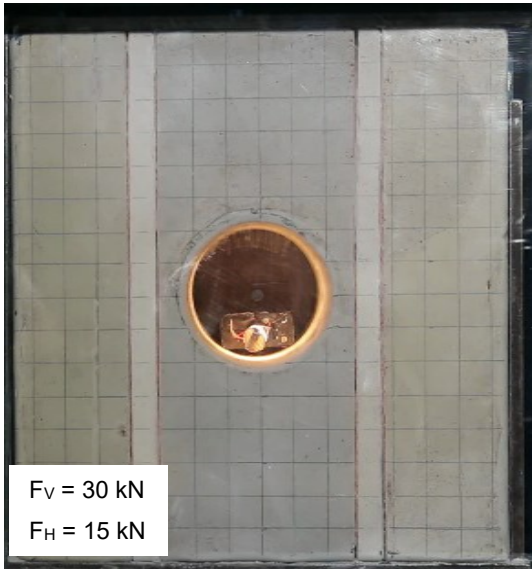
Kraft- und Verschiebungsdaten

Verformung horizontal [mm]	Kraft horizontal [kN]	Verformung vertikal [mm]	Kraft vertikal [kN]	K_0 [-]
-0.64	6.54	-0.18	10.10	0.65
-0.99	16.33	-0.86	30.12	0.53
-1.45	26.64	-1.95	50.11	0.53
-1.65	30.76	-2.55	60.18	0.51
-2.07	40.65	-4.05	79.97	0.51
-2.44	50.04	-5.74	100.21	0.50
-2.81	59.23	-8.71	120.45	0.49
-3.11	73.04	-11.47	140.41	0.51
-3.32	80.63	-13.53	160.41	0.50
-3.61	91.48	-15.92	180.89	0.51
-3.86	101.68	-18.15	200.74	0.51
-4.01	104.99	-19.78	205.29	0.51

Versuchsablauf

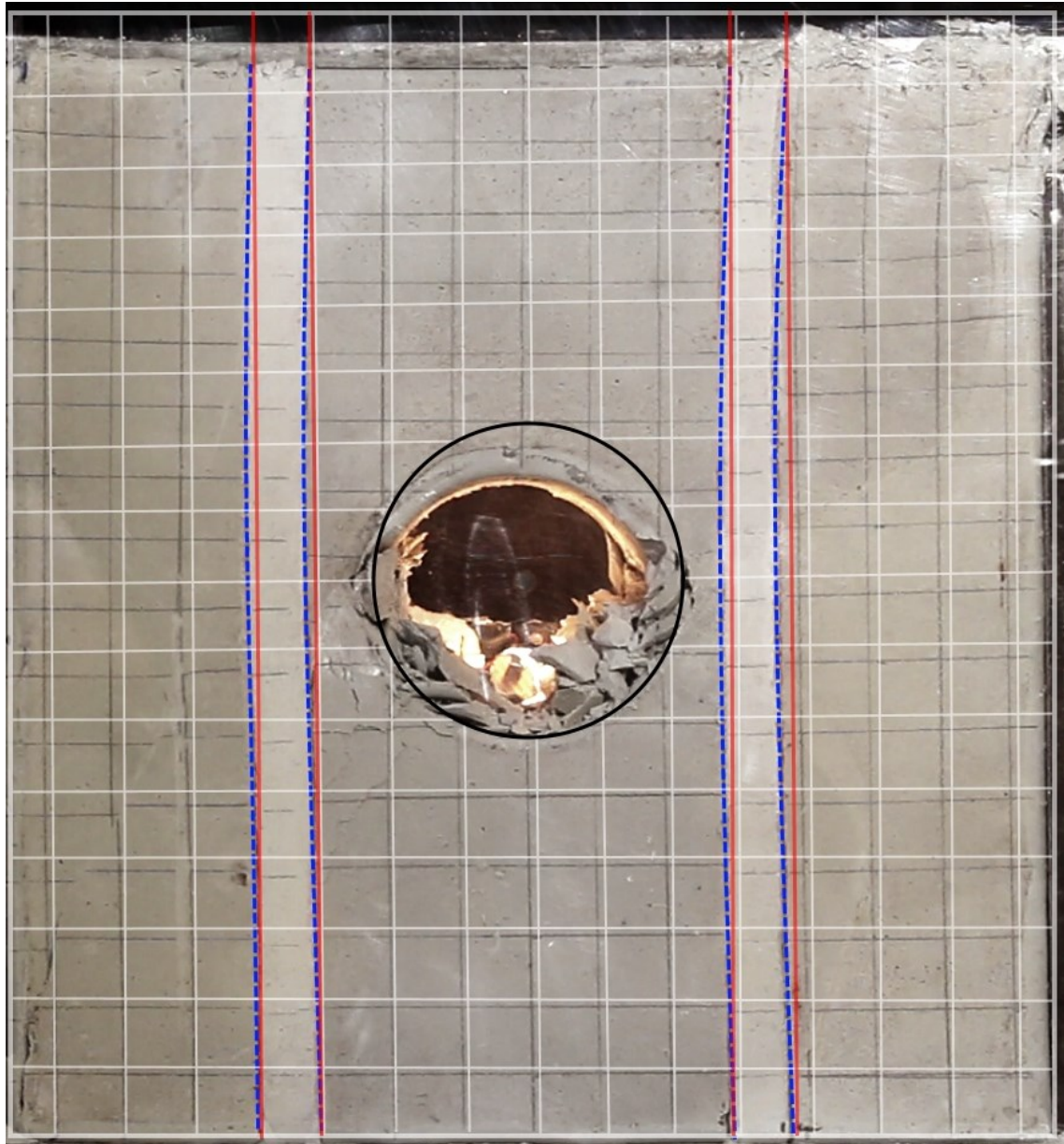





Modellversuch 2



Modellversuch 2

Verschiebungsbild

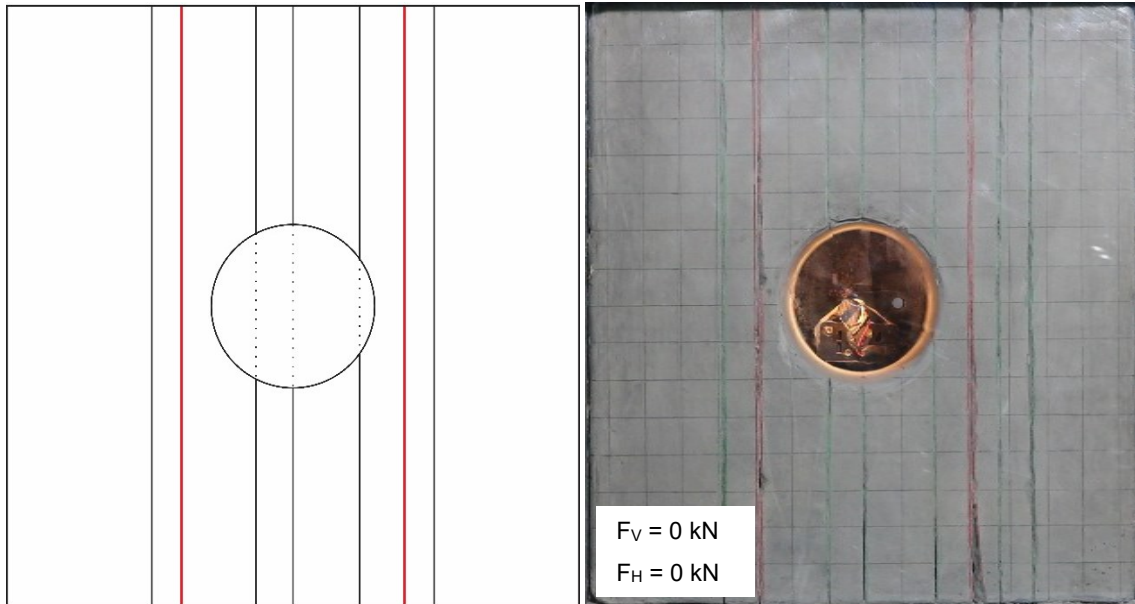


-  Harnischfläche vor Belastung
-  Harnischfläche nach Belastung
-  Geometrie des Hohlraumes vor Belastung

Modellversuch 3

Modellparameter		
Material	1:7:2:0,011	[A:SM:W:FM]
Festigkeit	0,59	[MPa]
K_0	0,67	[-]
Raster	2,5	[cm]
Modellbreite	38,5	[cm]
Modellhöhe	40,5	[cm]
Modelltiefe	20	[cm]
Tunnelgeometrie	11	[cm]
Tunnelachse	000/00	[°]
Trennflächen	8	[Stk.]
Harnisch (rot)	090/90	[°]
Schieferung (grün)	090/90	[°]

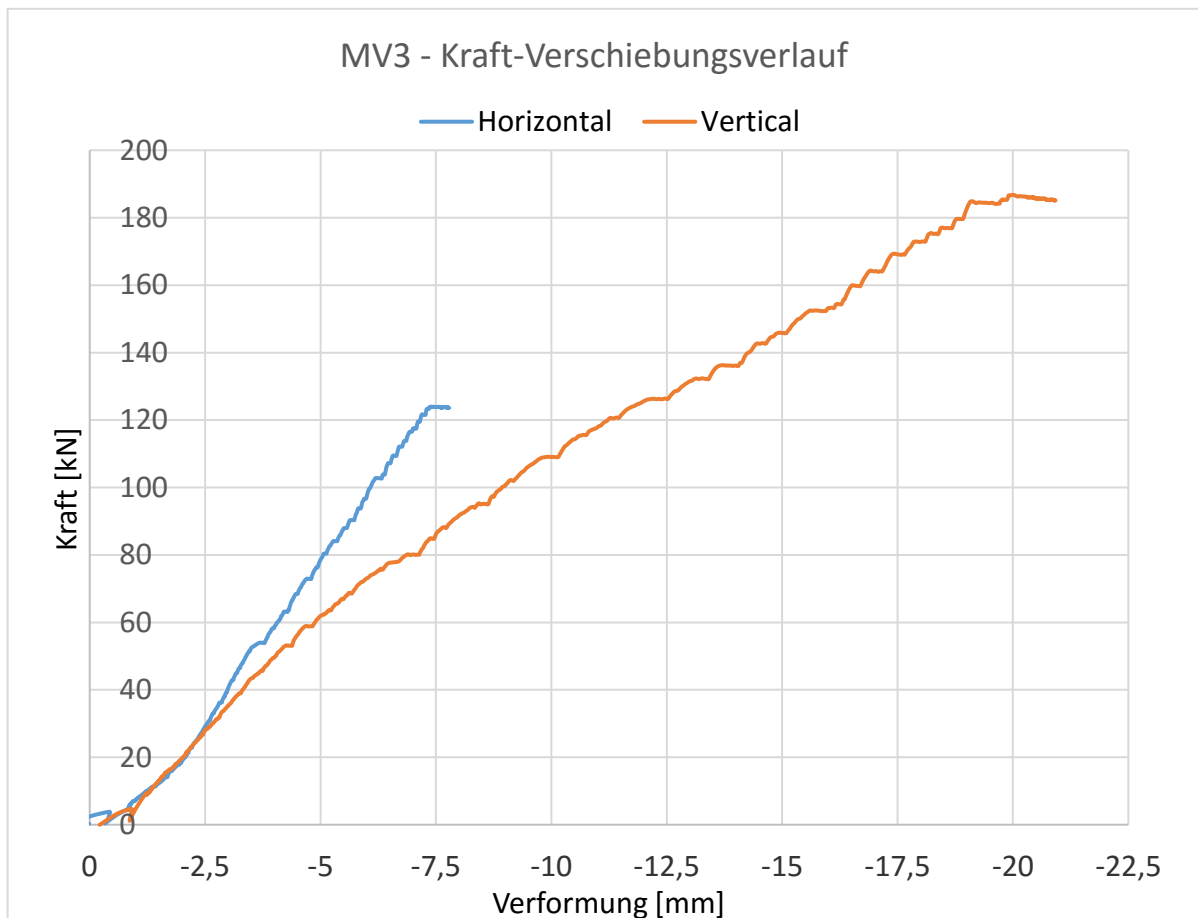
Modellgeometrie



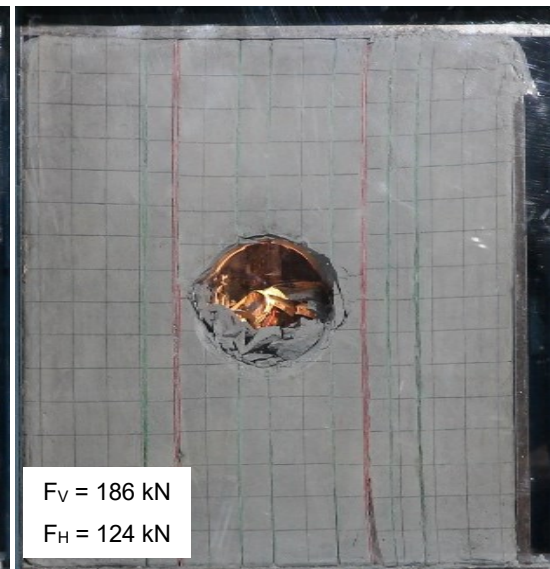
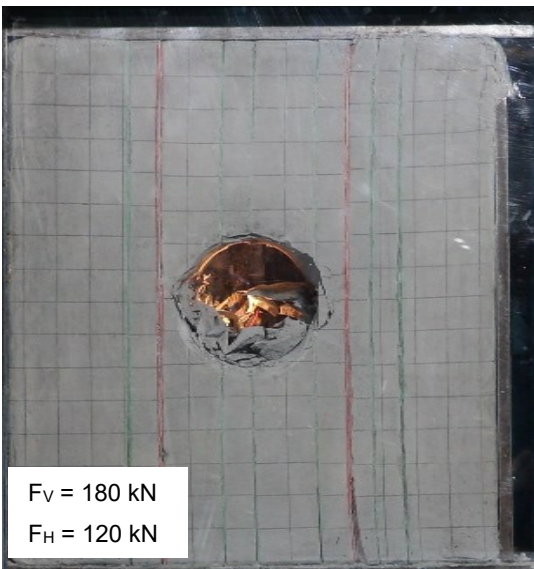
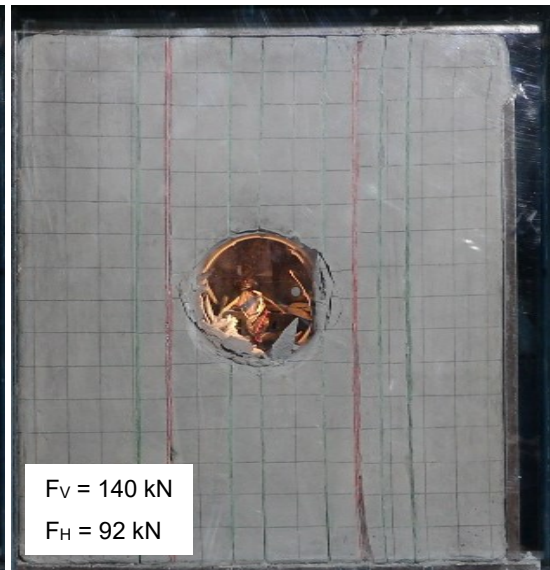
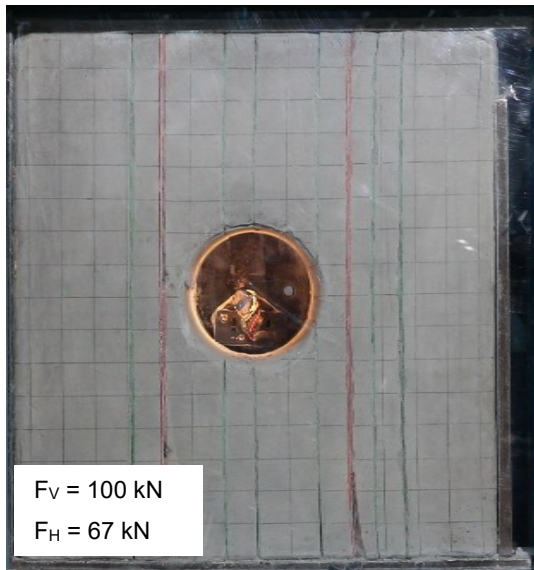
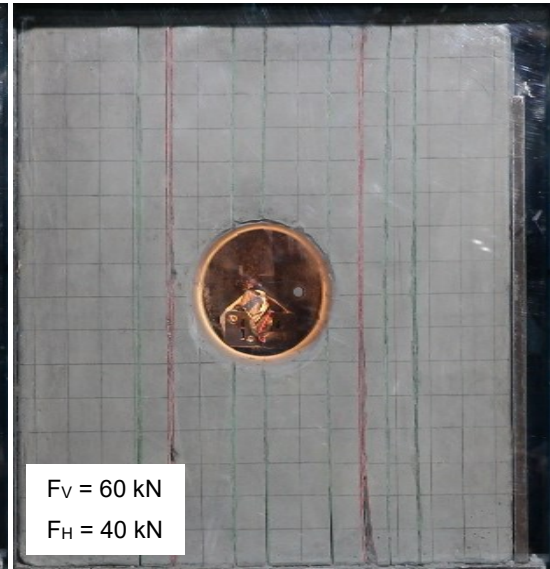
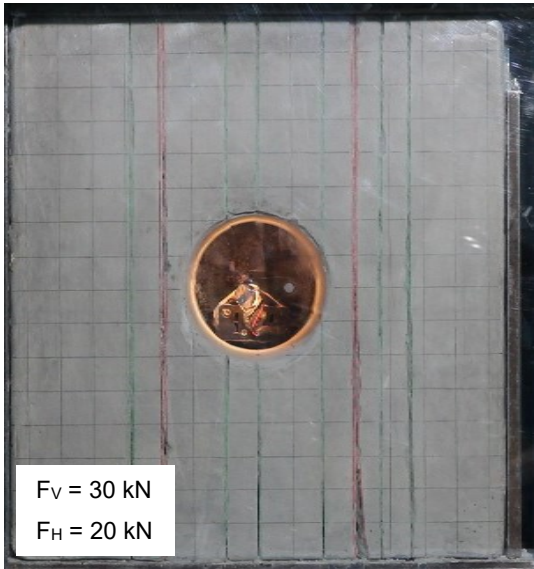
Kraft- und Verschiebungsdaten

Verformung horizontal [mm]	Kraft horizontal [kN]	Verformung vertikal [mm]	Kraft vertikal [kN]	K ₀ [-]
-0.95	6.95	-1.31	10.02	0.69
-2.07	20.05	-2.66	30.02	0.67
-2.72	34.03	-4.03	50.10	0.68
-2.98	39.77	-4.89	60.18	0.66
-3.61	53.43	-6.87	80.03	0.67
-4.39	66.52	-8.93	100.08	0.66
-5.06	80.29	-11.25	120.46	0.67
-5.79	92.53	-14.34	140.73	0.66
-6.52	107.25	-16.72	160.38	0.67
-7.15	119.47	-18.94	180.29	0.66
-7.47	123.90	-19.98	186.76	0.66

Versuchsablauf

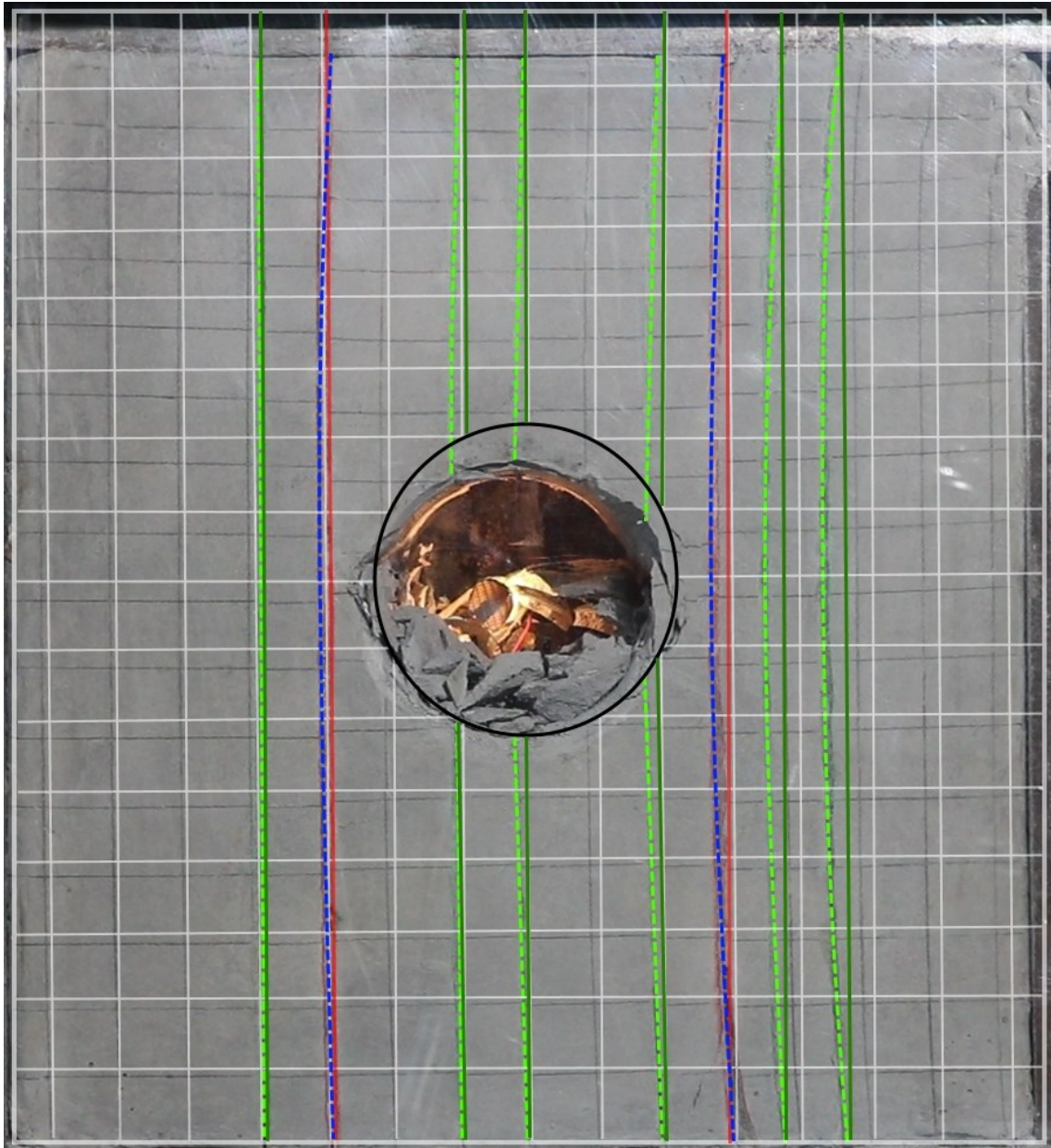







Modellversuch 3



Modellversuch 3

Verschiebungsbild



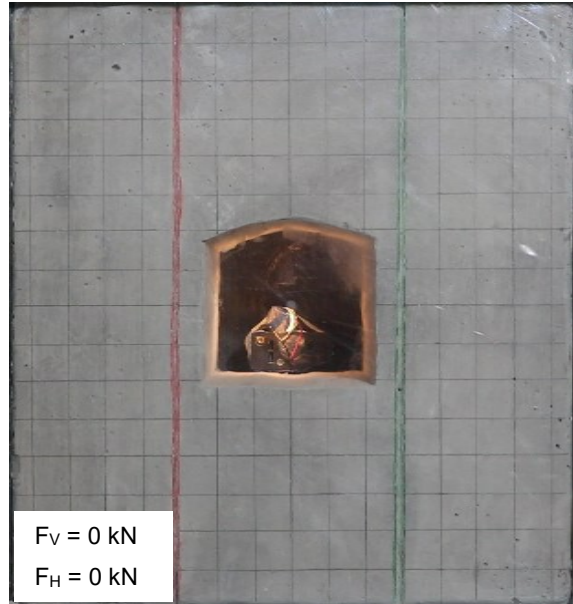
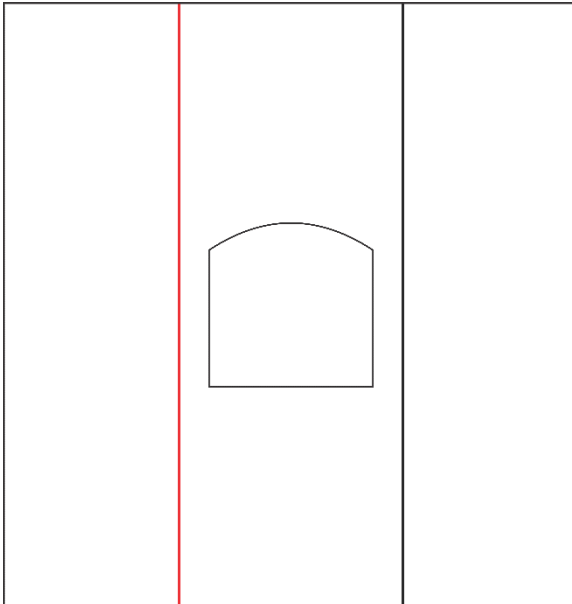
-  Harnischfläche vor Belastung
-  Harnischfläche nach Belastung
-  Trennfläche vor belastung
-  Trennfläche nach Belastung
-  Geometrie des Hohlraumes vor Belastung

Modellversuch 4

Modellparameter

Material	1:7:2:0,011	[A:SM:W:FM]
Festigkeit	0,68	[MPa]
K_0	0,5	[-]
Raster	2,5	[cm]
Modellbreite	38,5	[cm]
Modellhöhe	40,5	[cm]
Modelltiefe	20	[cm]
Tunnelgeometrie	Rechteck,11	[cm]
Trennflächen	2	[Stk.]
Tunnelachse	000/00	[°]
Harnisch (rot)	090/00	[°]
Trennfläche (grün)	090/00	[°]

Modellgeometrie

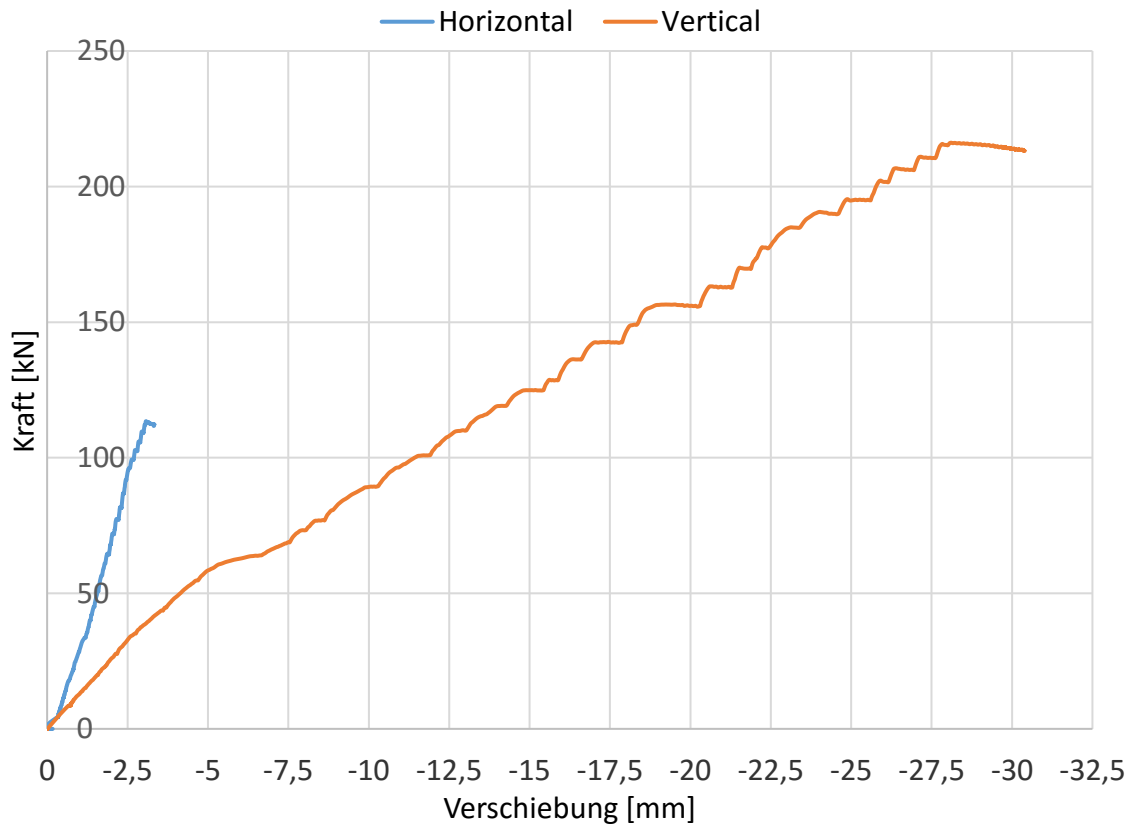


Kraft- und Verschiebungsdaten

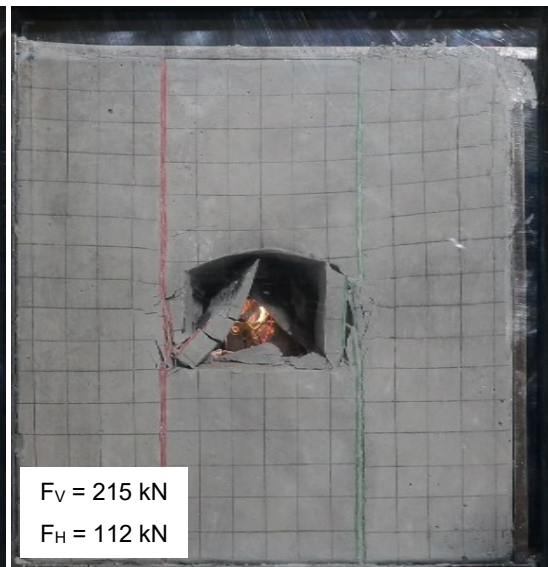
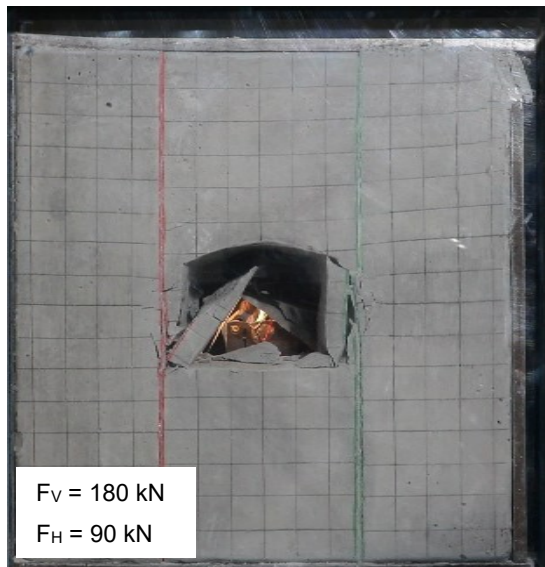
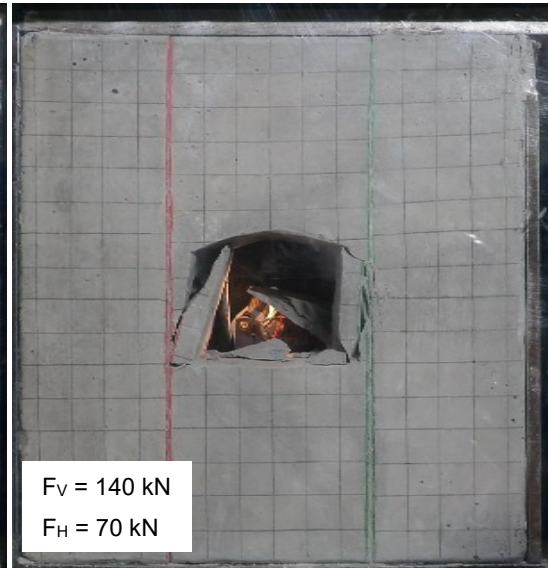
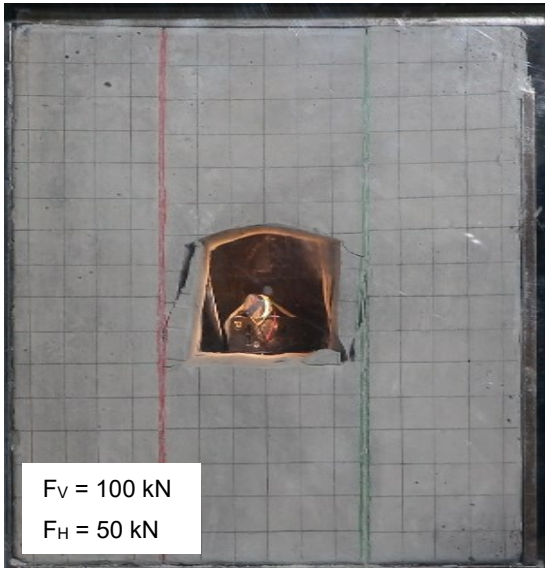
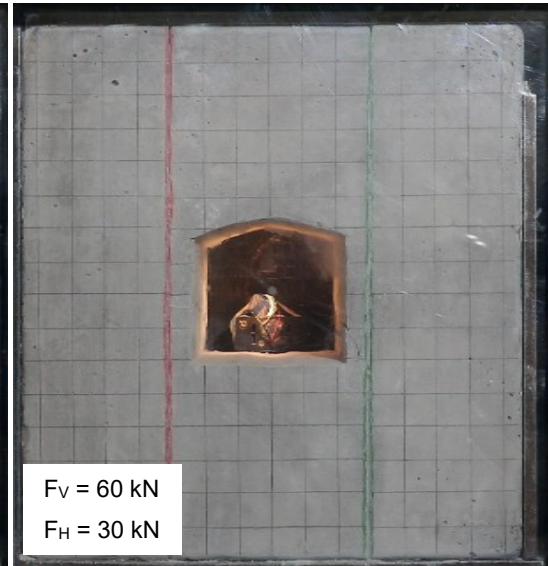
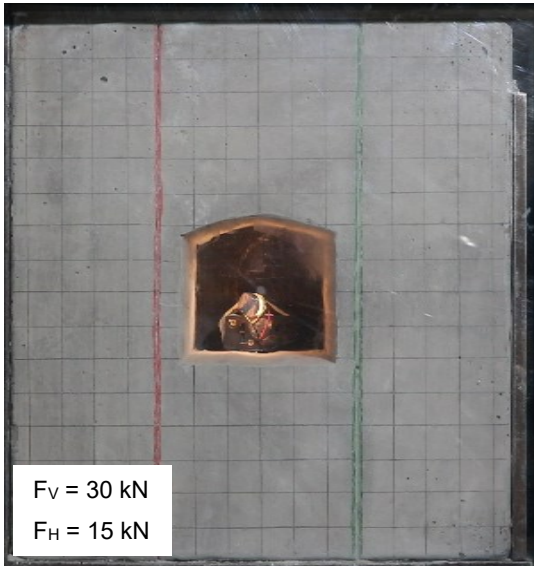
Verformung horizontal [mm]	Kraft horizontal [kN]	Verformung vertikal [mm]	Kraft vertikal [kN]	K_0 [-]
-0.35	5.28	-0.79	10.01	0.53
-0.61	15.90	-2.30	30.02	0.53
-0.91	25.76	-4.15	50.10	0.51
-1.07	31.59	-5.25	60.03	0.53
-1.37	41.72	-8.82	80.36	0.52
-1.56	50.41	-11.42	100.01	0.50
-1.82	61.66	-14.36	120.62	0.51
-2.00	69.88	-16.78	139.94	0.50
-2.24	78.83	-20.43	160.14	0.49
-2.50	94.13	-22.63	180.27	0.52
-2.83	104.77	-25.81	200.87	0.52
-3.00	109.19	-28.11	216.17	0.51

Versuchsablauf

MV4 - Kraft-Verschiebungsverlauf

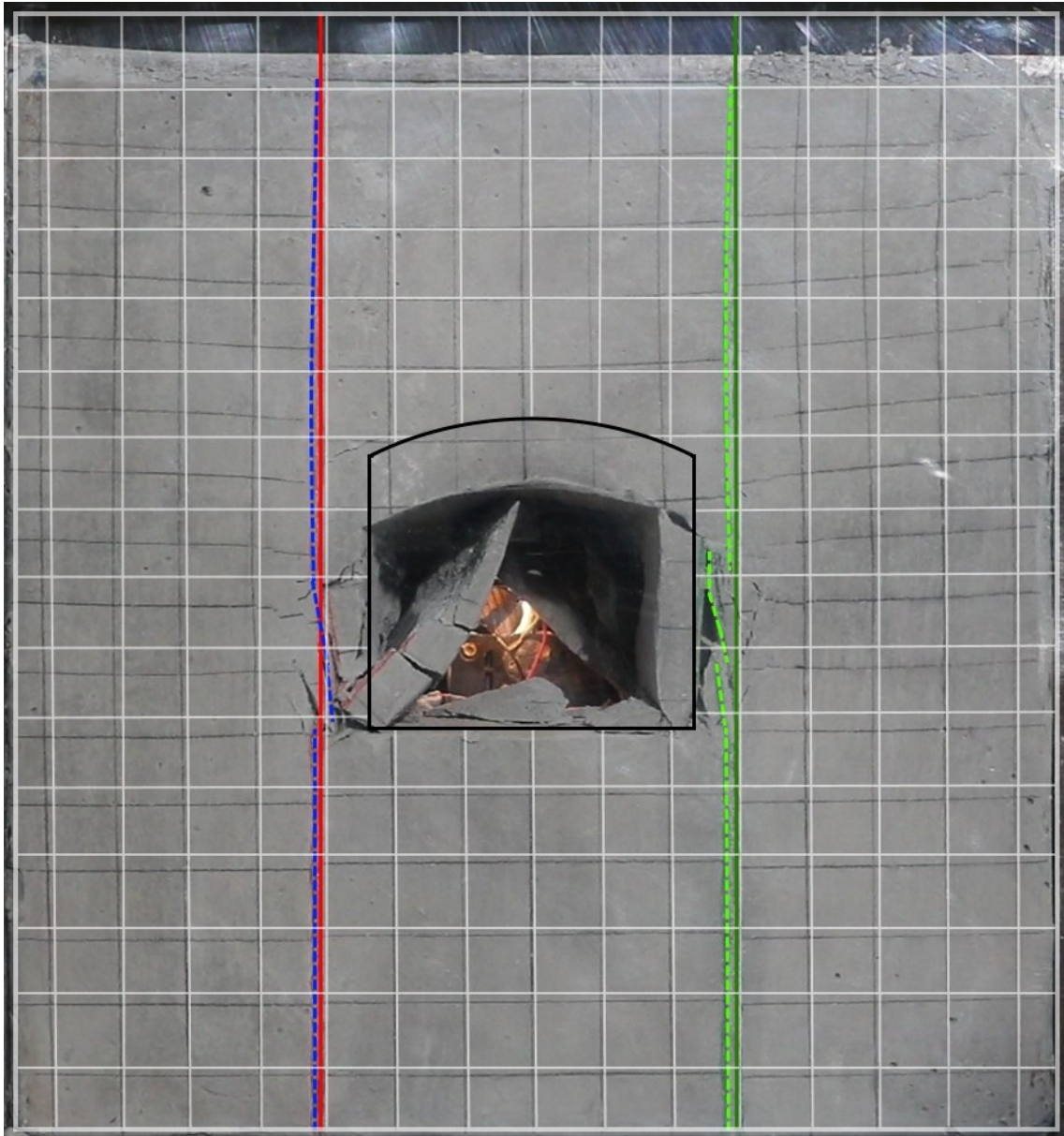







Modellversuch 4



Modellversuch 4

Verschiebungsbild



-  Harnischfläche vor Belastung
-  Harnischfläche nach Belastung
-  Trennfläche vor belastung
-  Trennfläche nach Belastung
-  Geometrie des Hohlraumes vor Belastung

Modellversuch 5

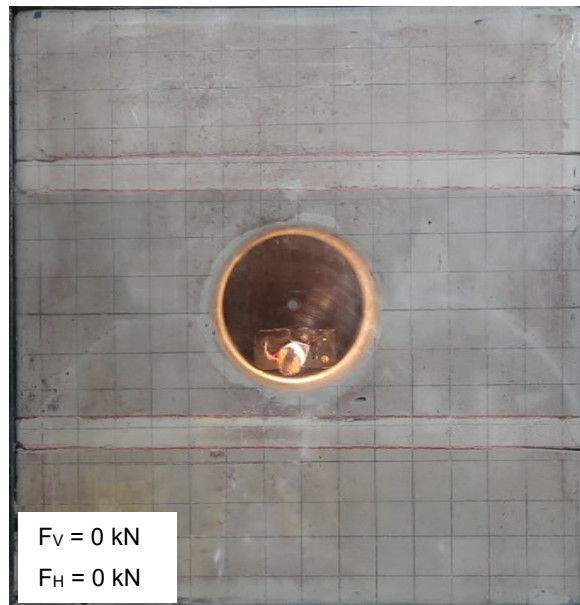
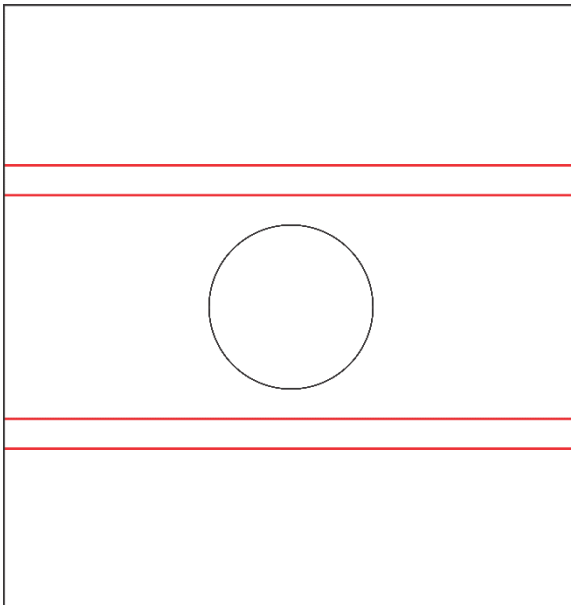
Modellparameter

Material	1:7:2:0,011	[A:SM:W:FM]
Festigkeit	0,71	[MPa]
K_0	0,5	[-]
Raster	2,5	[cm]
Modellbreite	38,5	[cm]
Modellhöhe	40,5	[cm]
Modelltiefe	20	[cm]
Tunnelgeometrie	Kreisprofil, 11cm	[-]
Tunnelachse	000/00	[°]
Trennflächen	4	[Stk.]
Harnisch (rot)	090/00	[°]

Eingabeparameter Numerisches Modell

Poissonzahl	0,28	[MPa]
Elastizitätsmodul	210	[MPa]
Reibungswinkel φ	41,5	[°]
Kohäsion c	0,16	[MPa]
Zugfestigkeit	0,07	[MPa]
Dilatanzwinkel ψ	0	[°]

Modellgeometrie

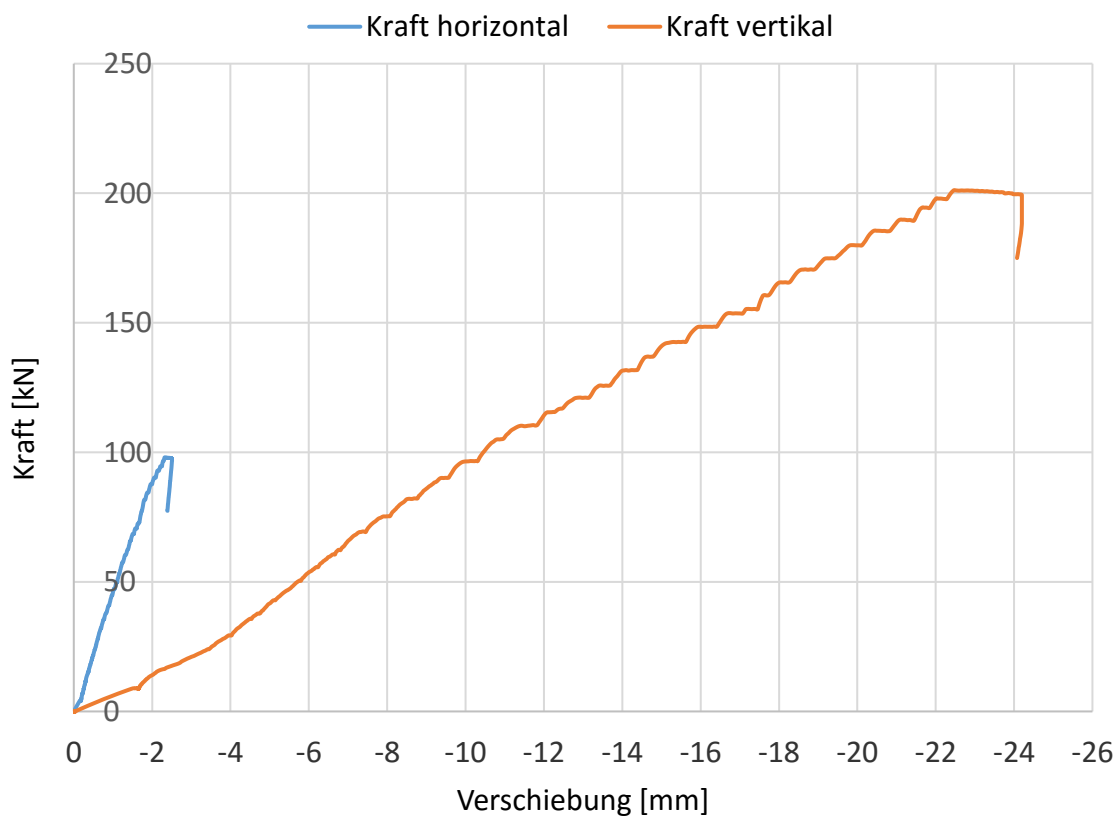


Kraft- und Verschiebungsdaten

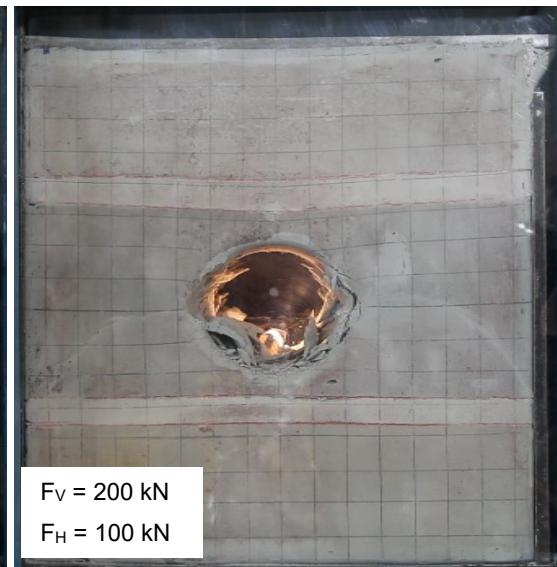
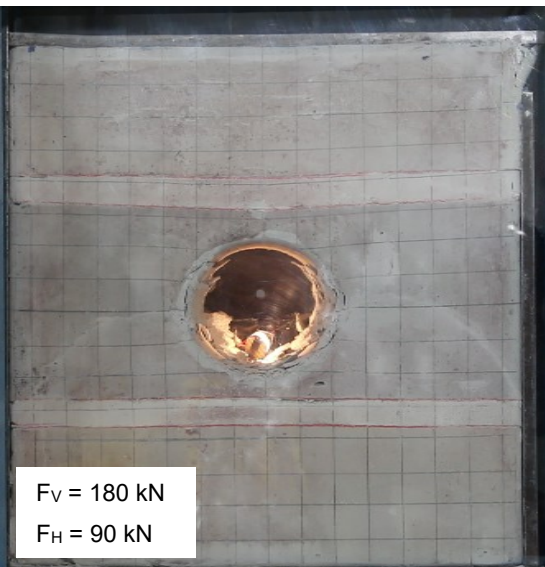
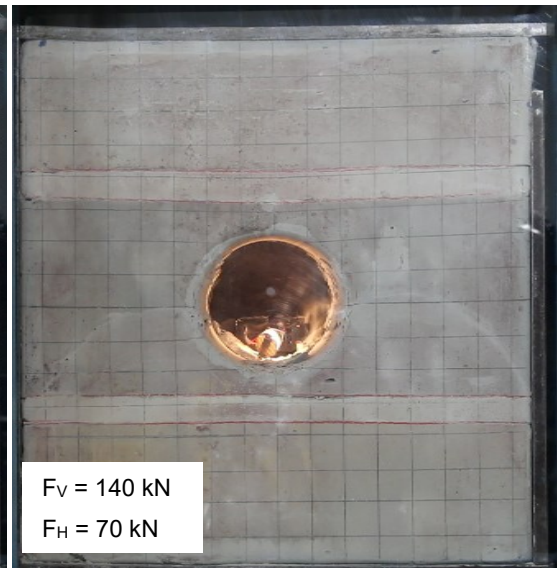
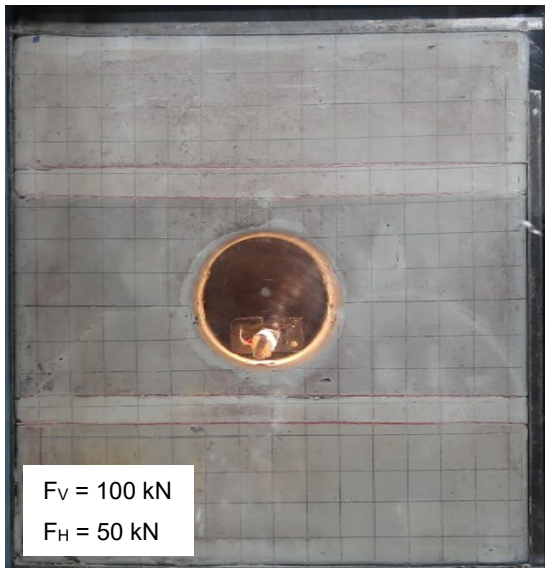
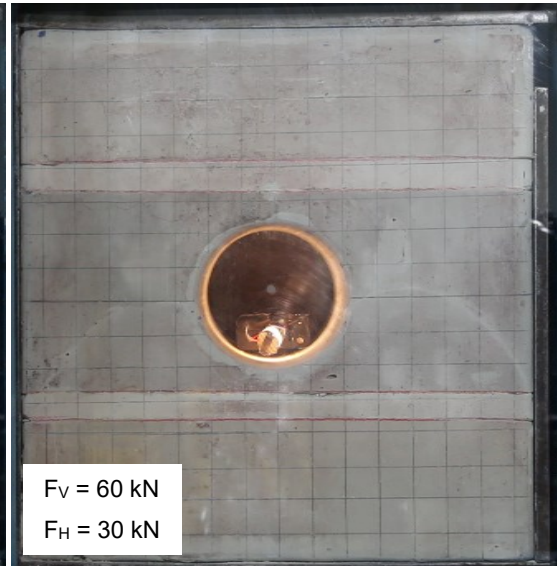
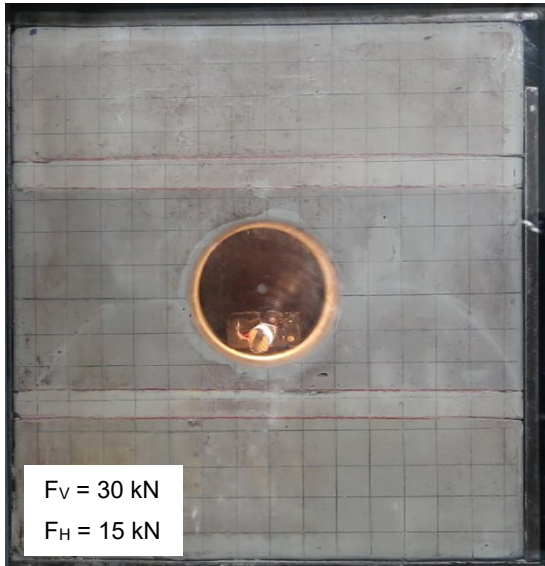
Verformung horizontal [mm]	Kraft horizontal [kN]	Verformung vertikal [mm]	Kraft vertikal [kN]	K_0 [-]
-0.19	4.94	-1.70	10.09	0.49
-0.38	15.82	-4.05	30.07	0.53
-0.56	24.96	-5.71	50.04	0.50
-0.67	31.32	-6.56	60.05	0.52
-0.87	39.85	-8.35	80.06	0.50
-1.06	48.16	-10.47	100.38	0.48
-1.23	57.05	-12.73	120.32	0.47
-1.48	67.60	-15.00	140.96	0.48
-1.73	77.24	-17.58	160.35	0.48
-2.09	90.19	-20.16	180.65	0.50
-2.35	98.00	-22.36	199.43	0.49

Versuchsablauf

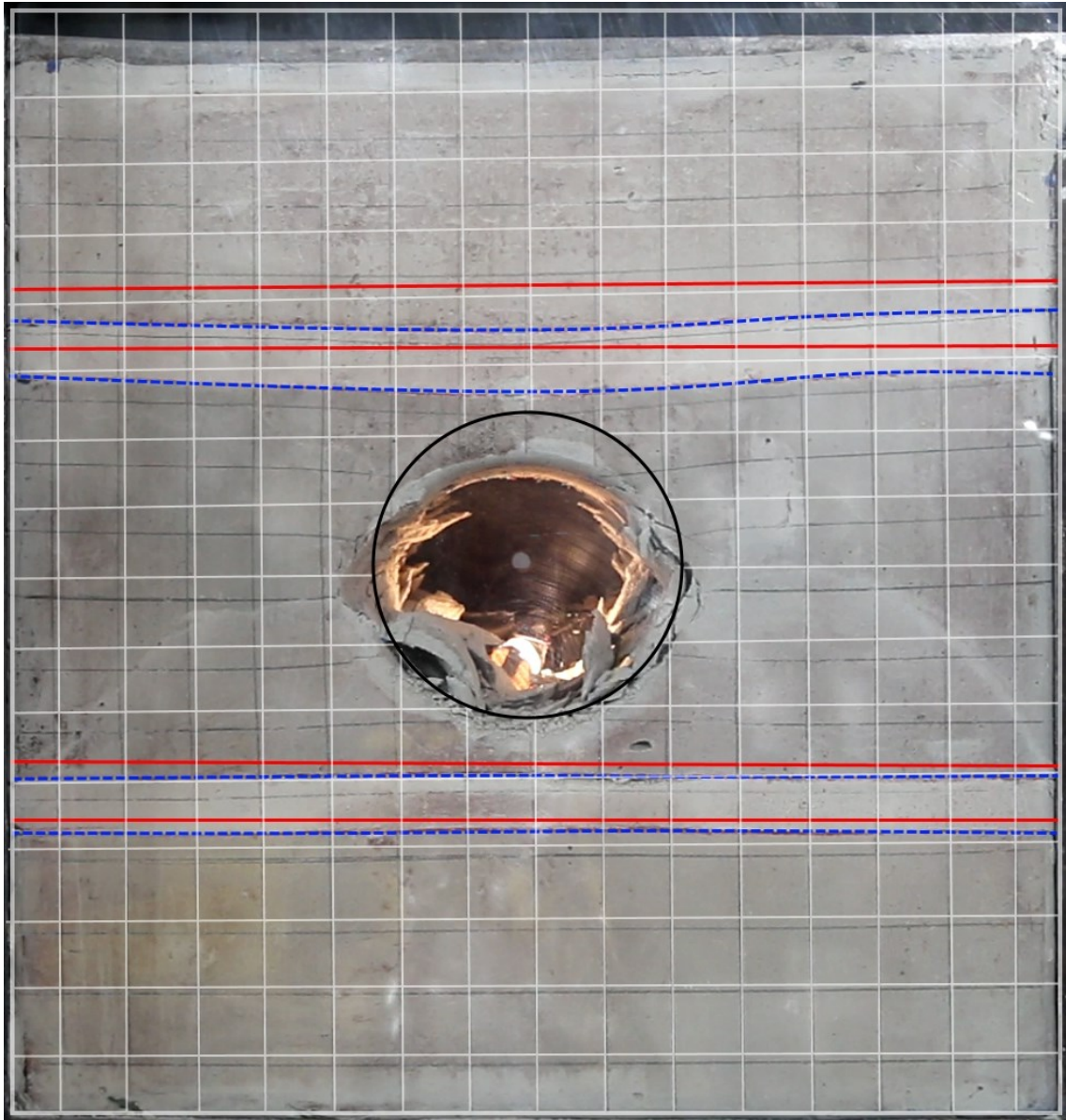
MV5- Kraft-Verschiebungsverlauf






Modellversuch 5



Modellversuch 5
Verschiebungsbild



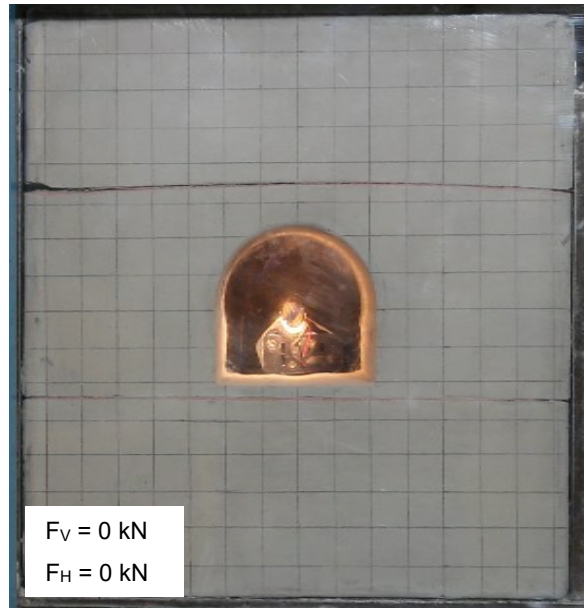
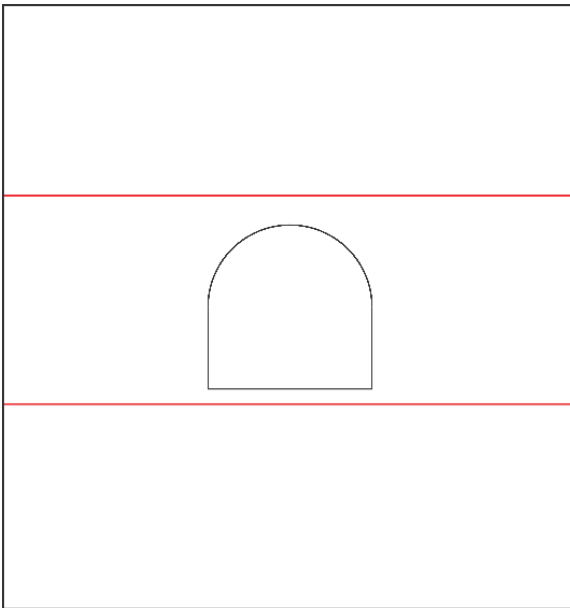
-  Harnischfläche vor Belastung
-  Harnischfläche nach Belastung
-  Geometrie des Hohlraumes vor Belastung

Modellversuch 6

Modellparameter

Material	1:7:2:0,011	[A:SM:W:FM]
Festigkeit	0,63	[MPa]
K_0	2,0	[-]
Raster	2,5	[cm]
Modellbreite	38,5	[cm]
Modellhöhe	40,5	[cm]
Modelltiefe	20	[cm]
Tunnelgeometrie	11	[cm]
Trennflächen	2	[Stk.]
Harnisch (rote Linie)	090/00	[°]

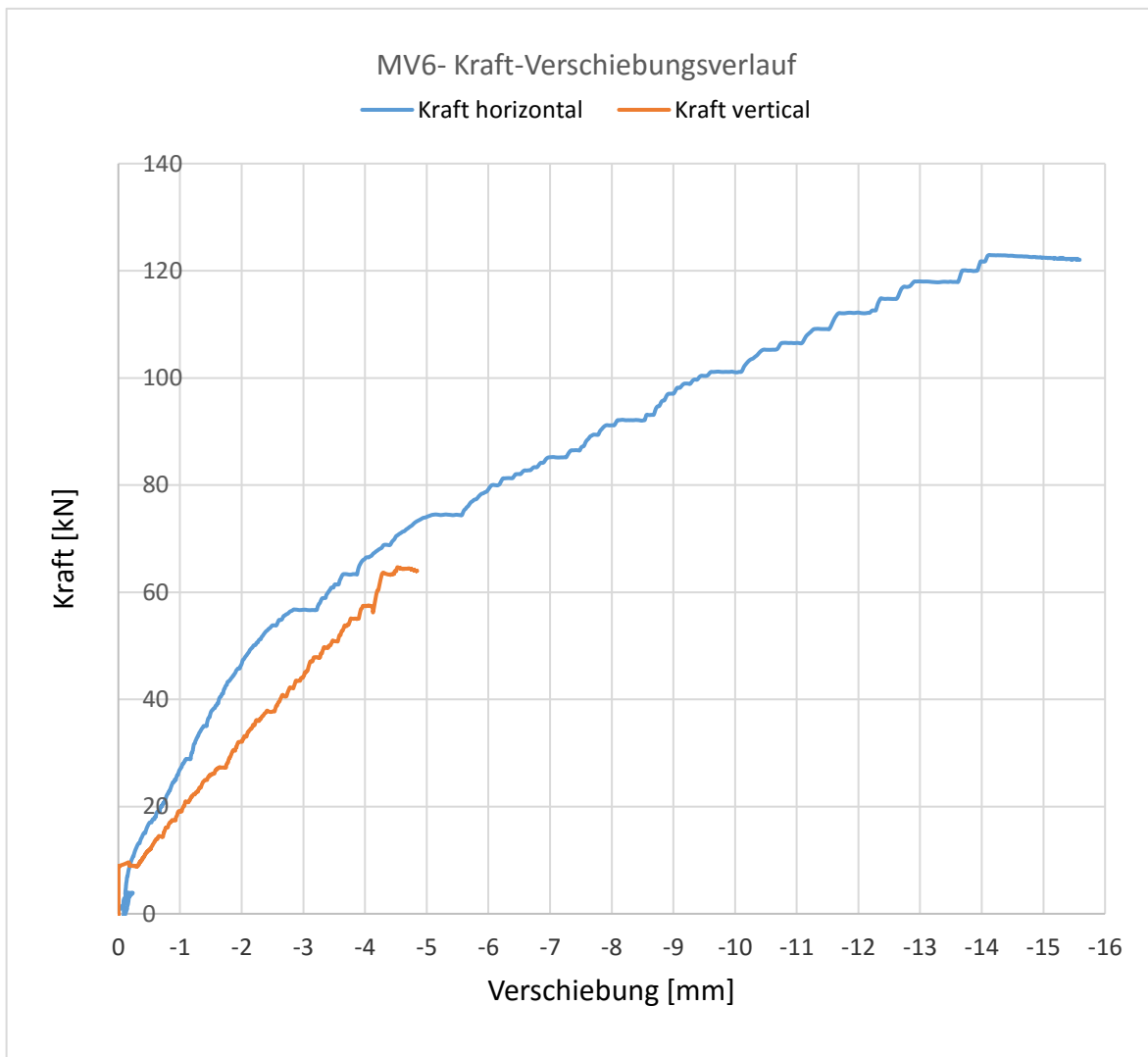
Modellgeometrie



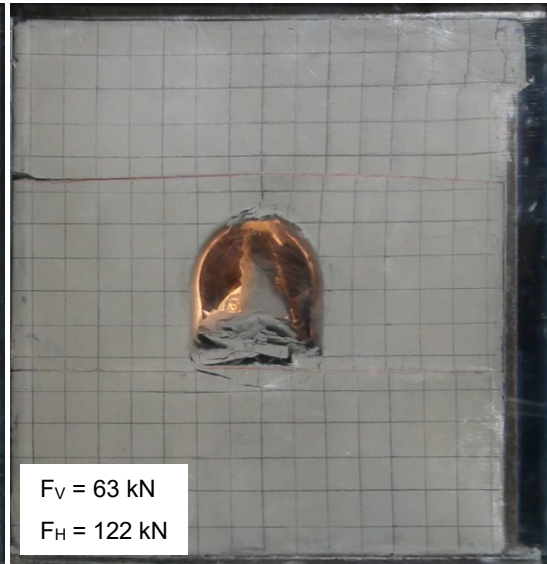
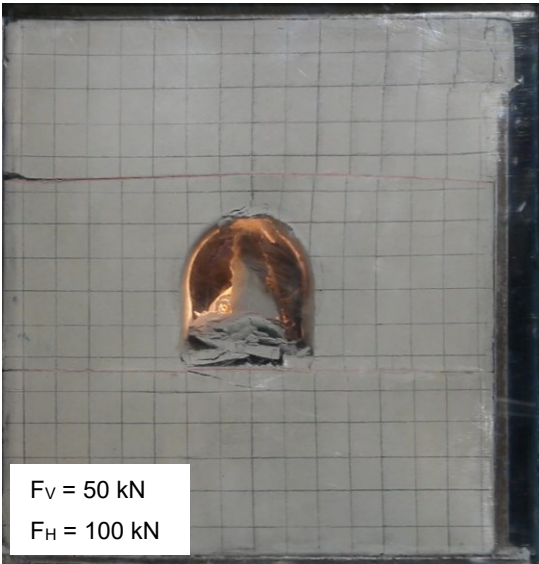
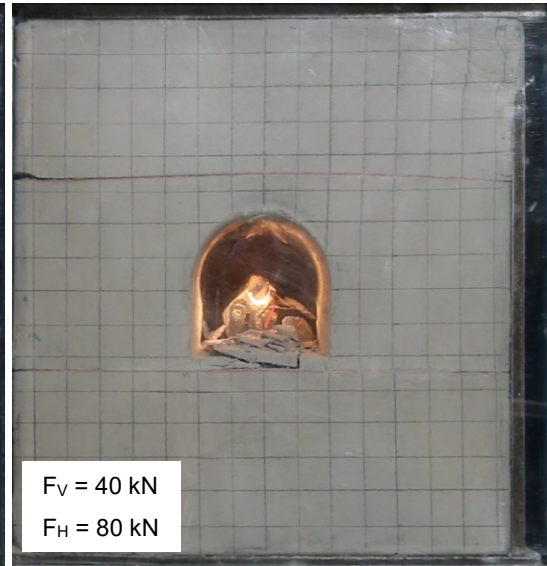
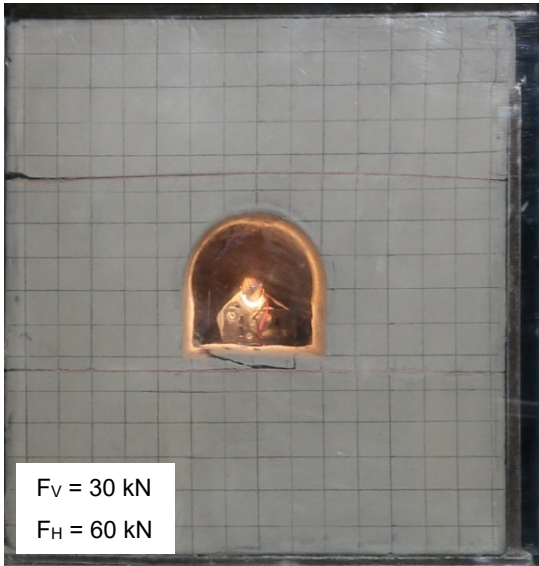
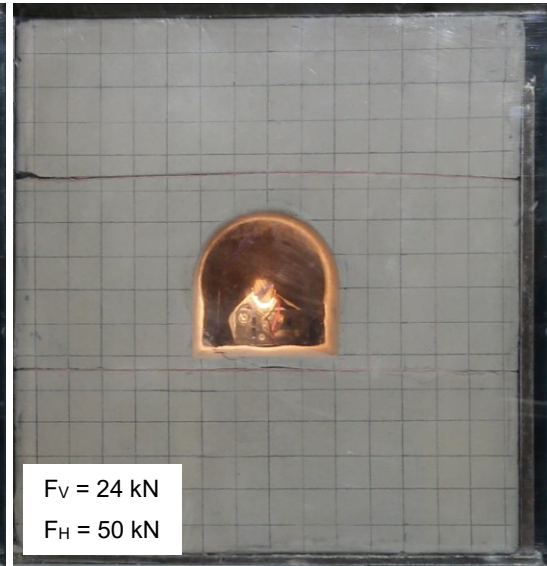
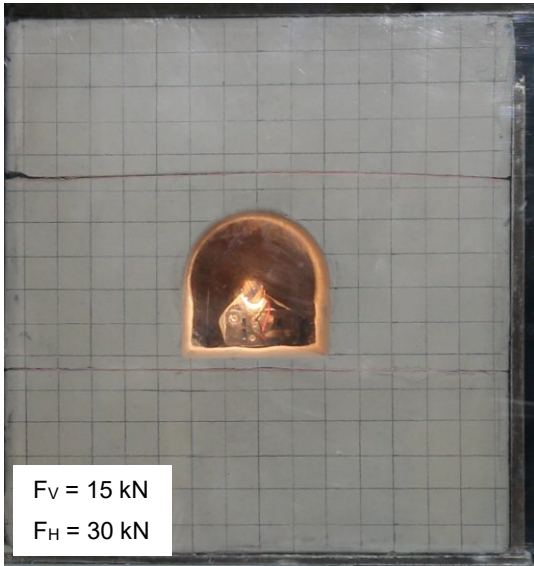
Kraft- und Verschiebungsdaten

Verformung horizontal [mm]	Kraft horizontal [kN]	Verformung vertikal [mm]	Kraft vertikal [kN]	K_0 [-]
0.00	3.65	0.00	9.05	2.48
-0.19	9.04	-0.20	9.00	1.00
-1.19	30.04	-0.75	15.34	0.51
-2.20	50.11	-1.42	24.96	0.50
-3.41	60.14	-1.84	30.03	0.50
-6.07	80.03	-2.66	40.85	0.51
-9.42	100.14	-3.46	50.69	0.51
-13.71	120.07	-4.34	63.44	0.53
-15.59	122.03	-4.85	63.97	0.52

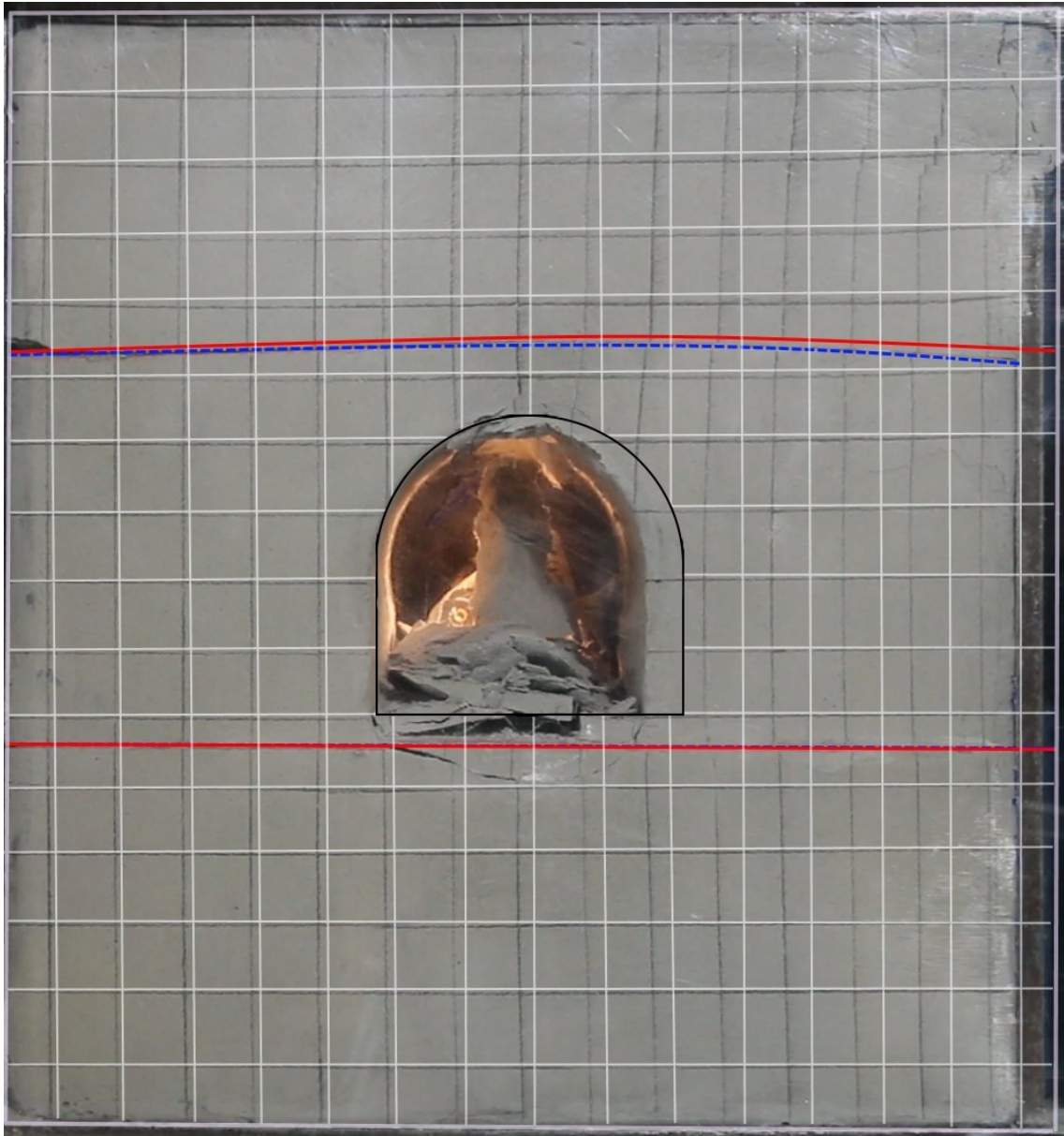
Versuchsablauf






Modellversuch 6



Modellversuch 6
Verschiebungsbild

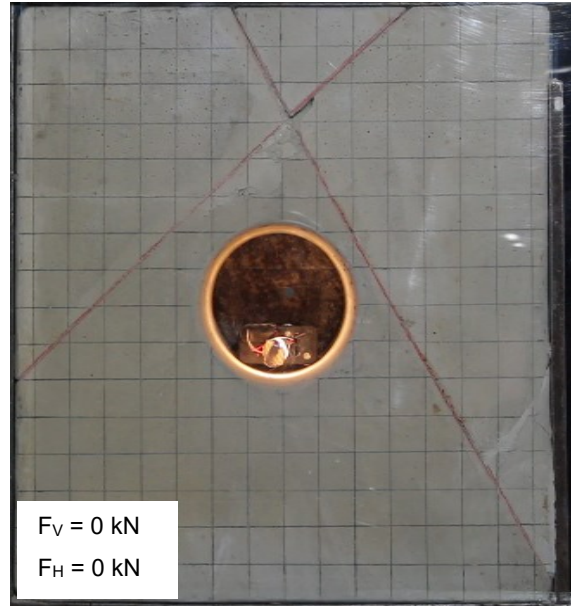
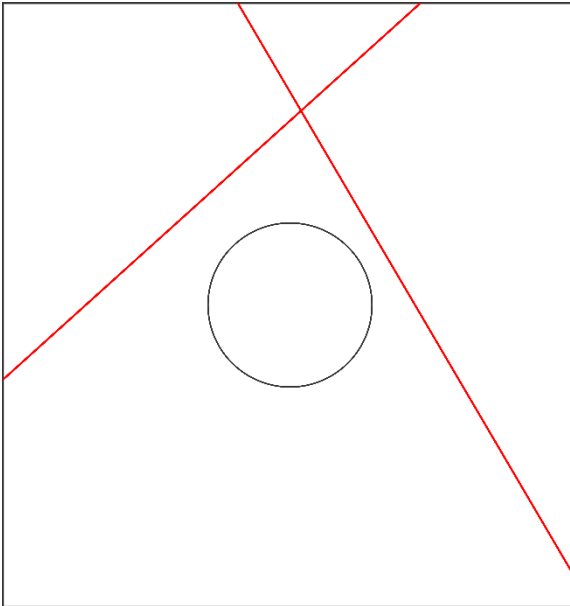


-  Harnischfläche vor Belastung
-  Harnischfläche nach Belastung
-  Geometrie des Hohlraumes vor Belastung

Modellversuch 7

Modellparameter		
Material	1:7:2:0,011	[A:SM:W:FM]
Festigkeit	0,68	[MPa]
K_0	0,6	[-]
Raster	2,5	[cm]
Modellbreite	38,5	[cm]
Modellhöhe	40,5	[cm]
Modelltiefe	20	[cm]
Tunnelgeometrie	Kreisprofil, 11cm	[-]
Tunnelachse	180 - 000	[°]
Trennflächen	2	[Stk.]
Harnisch 1(rot)	090/60	[°]
Harnisch 2(rot)	270/42	[°]

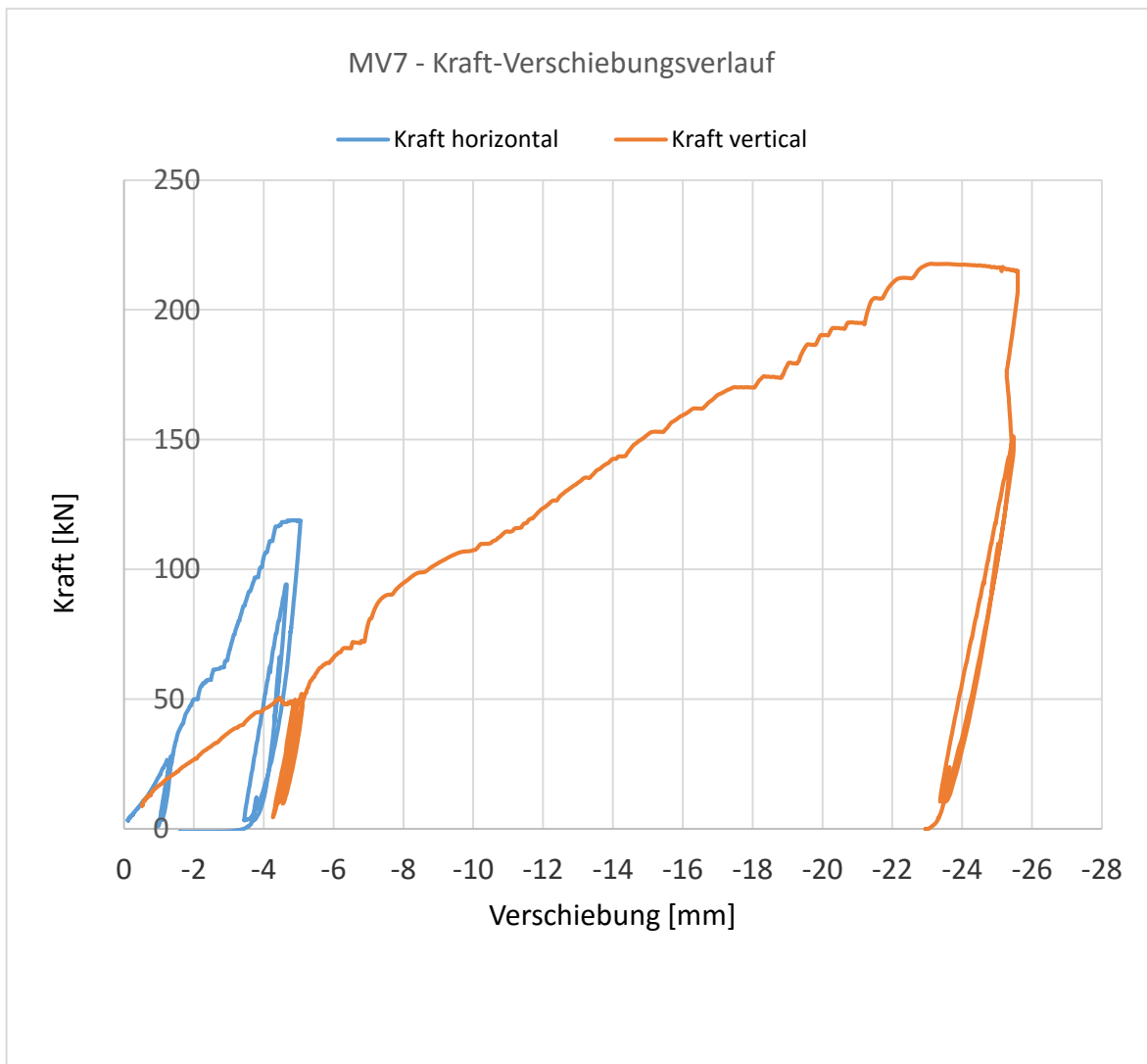
Modellgeometrie



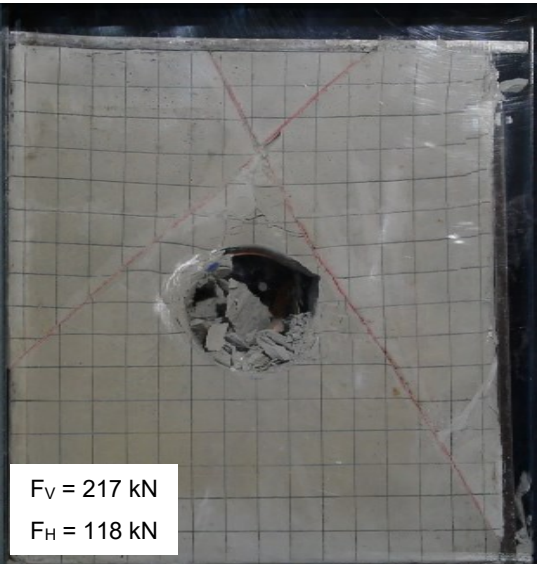
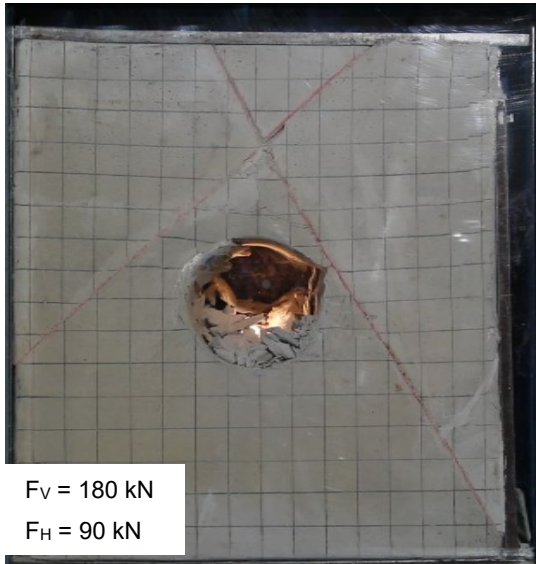
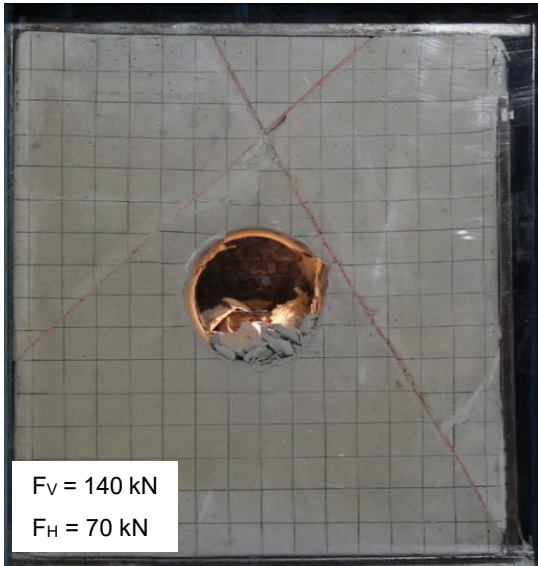
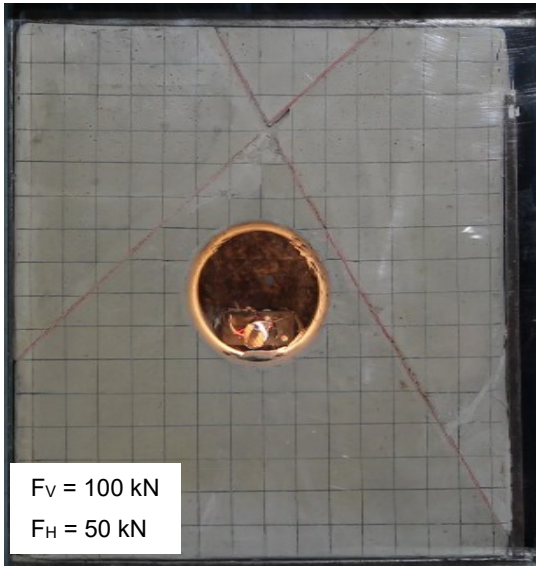
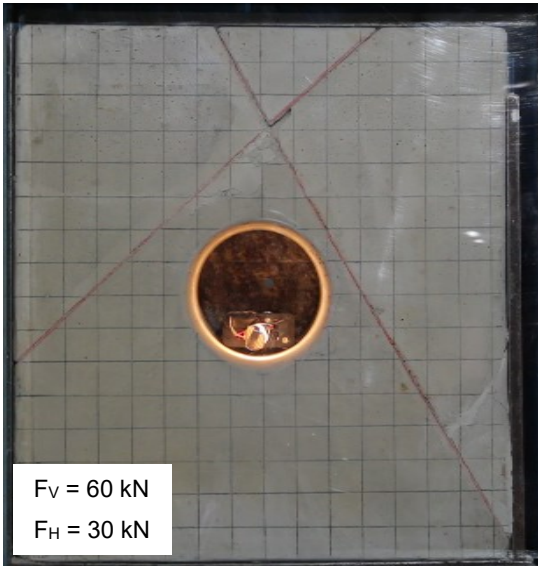
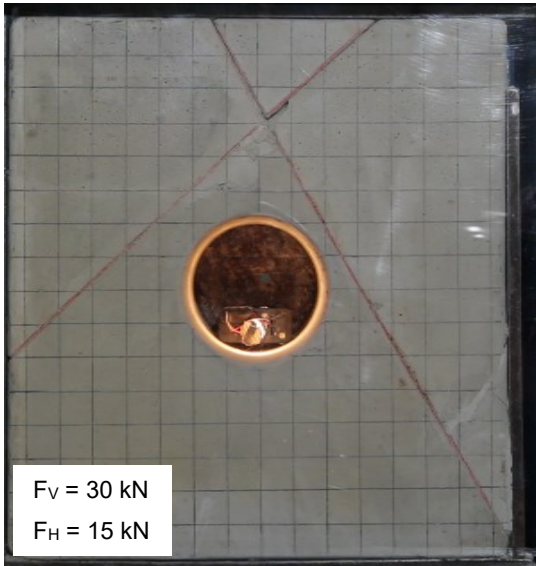
Kraft- und Verschiebungsdaten

Verformung horizontal [mm]	Kraft horizontal [kN]	Verformung vertikal [mm]	Kraft vertikal [kN]	K_0 [-]
-0.13	3.80	-0.55	10.09	0.38
-0.79	15.32	-2.31	30.15	0.51
-1.23	26.49	-4.44	50.37	0.53
-1.55	36.94	-5.51	60.10	0.61
-2.59	61.42	-7.01	79.76	0.77
-2.73	61.70	-8.80	100.82	0.61
-2.96	64.90	-11.73	120.07	0.54
-3.22	77.71	-13.76	140.17	0.55
-3.54	89.84	-16.06	159.79	0.56

Versuchsablauf

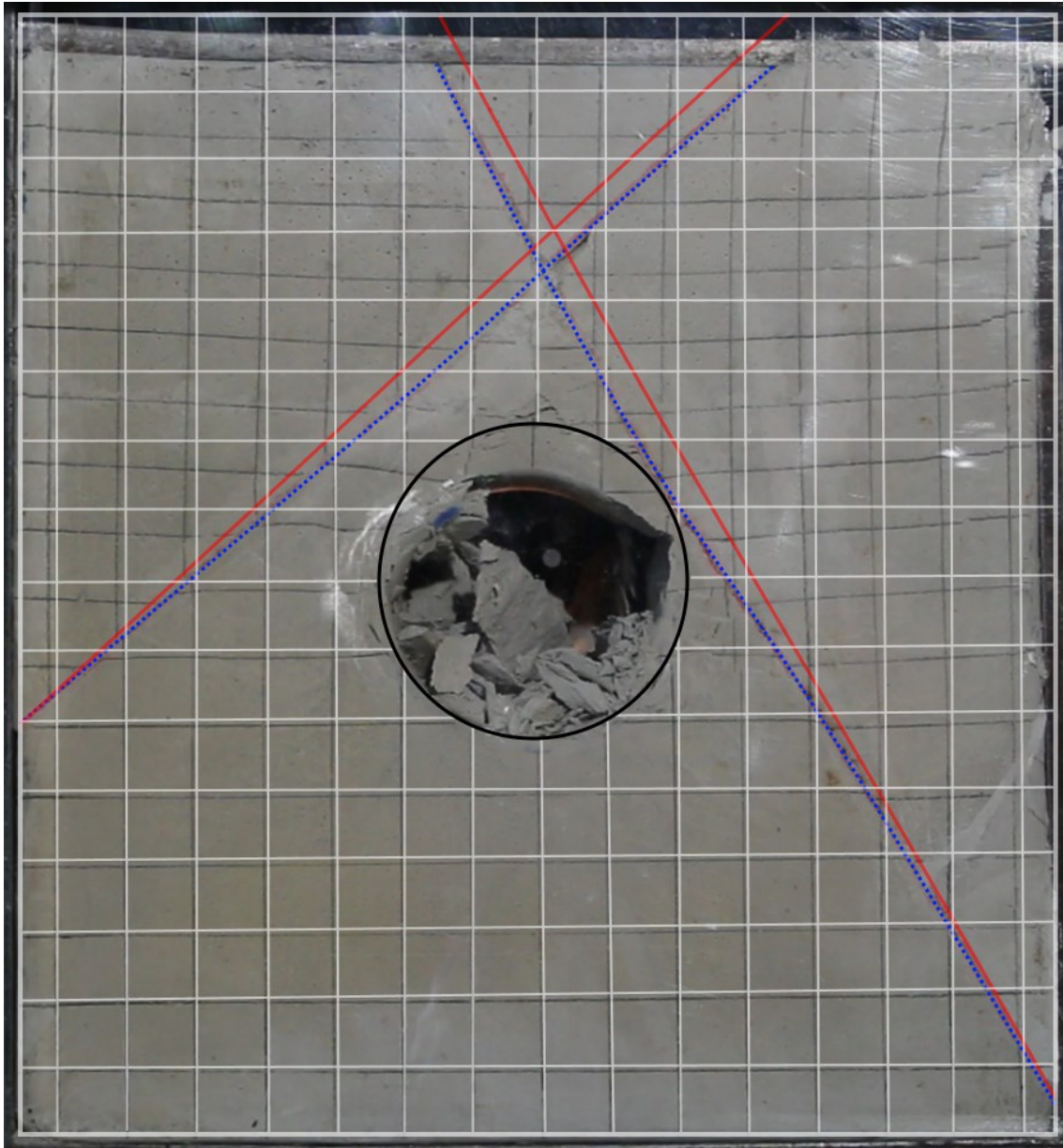





Modellversuch 7



Modellversuch 7

Verschiebungsbild

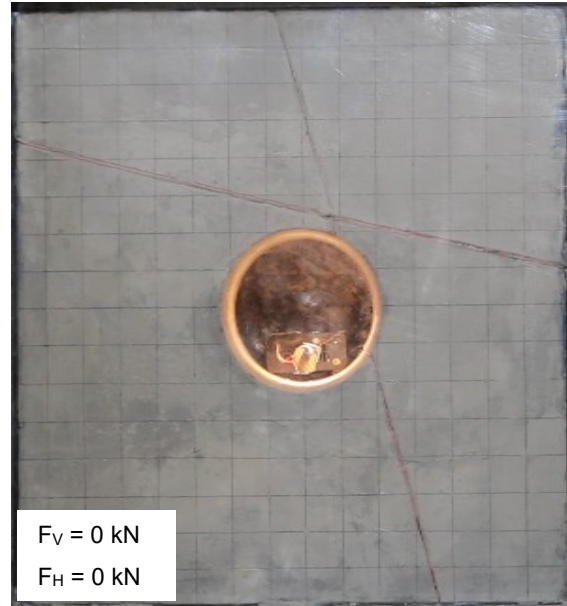
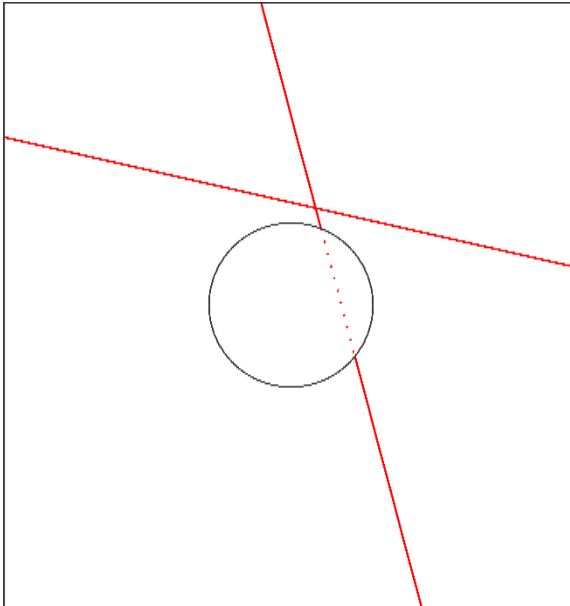


-  Harnischfläche vor Belastung
-  Harnischfläche nach Belastung
-  Geometrie des Hohlraumes vor Belastung

Modellversuch 8

Modellparameter		
Material	1:7:2:0,011	[A:SM:W:FM]
Festigkeit	0,66	[MPa]
K_0	0,6	[-]
Raster	2,5	[cm]
Modellbreite	38,5	[cm]
Modellhöhe	40,5	[cm]
Modelltiefe	20	[cm]
Tunnelgeometrie	Kreisprofil, 11cm	[-]
Tunnelachse	000/00	[°]
Trennflächen	2	[Stk.]
Harnisch 1 (rot)	090/13	[°]
Harnisch 2 (rot)	090/75	[°]

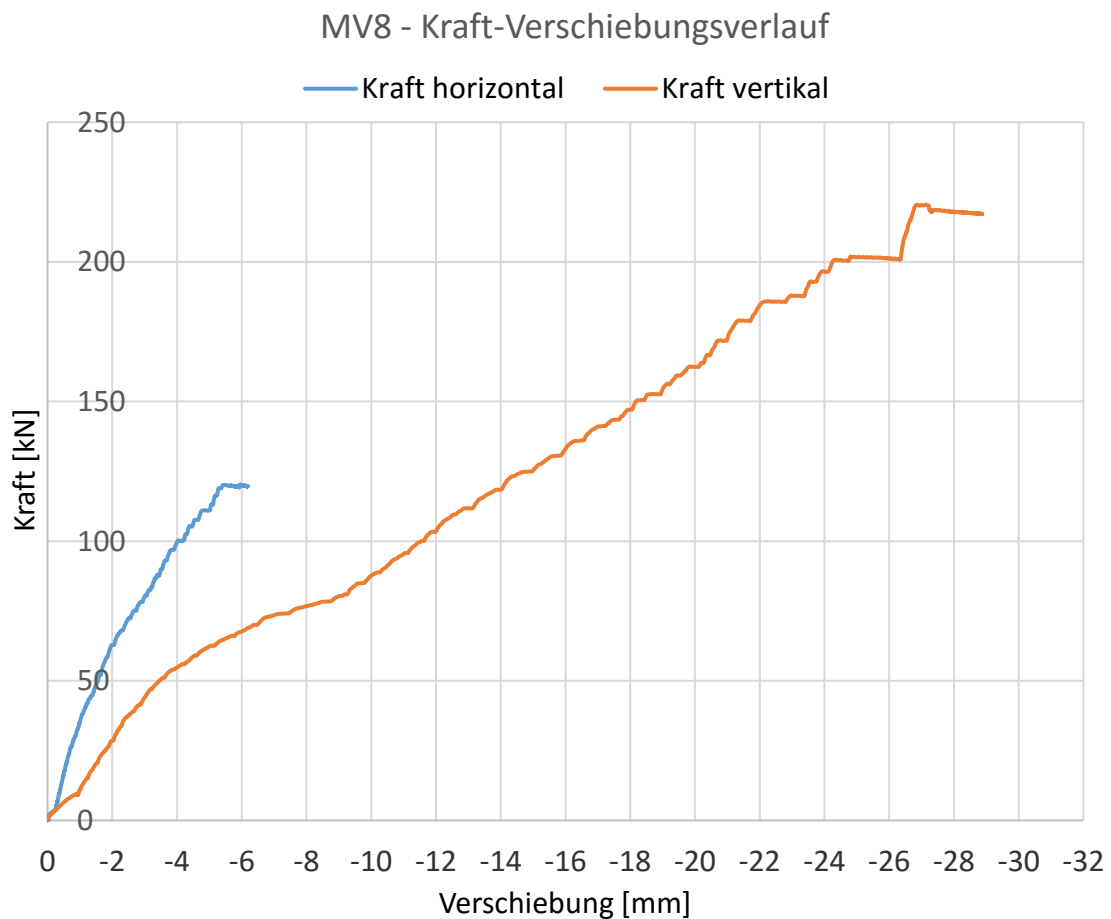
Modellgeometrie



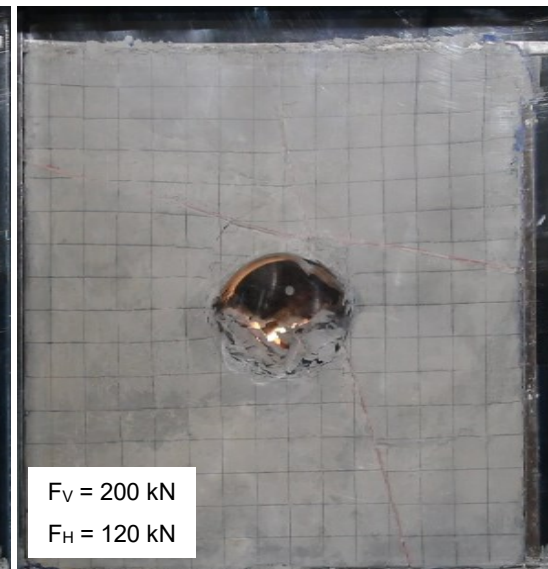
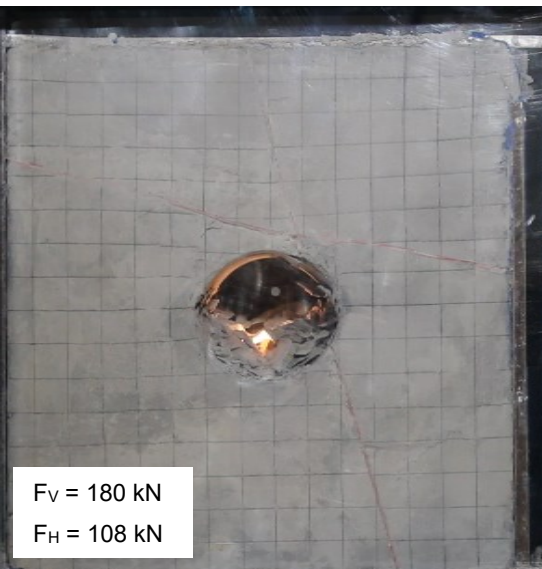
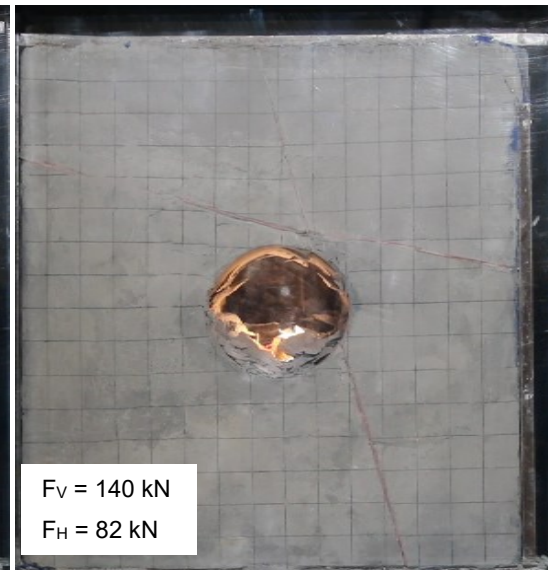
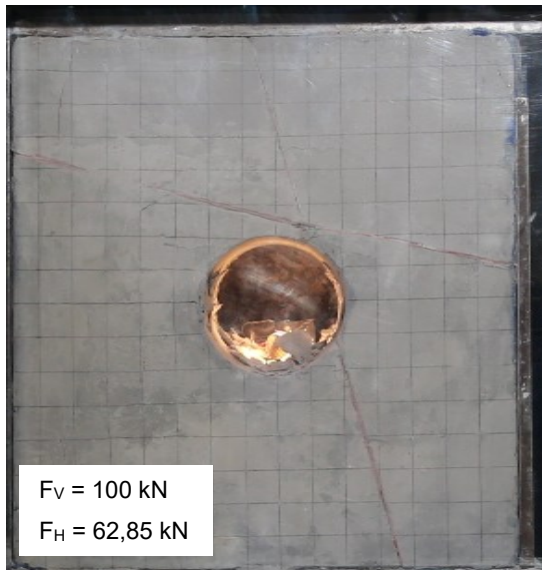
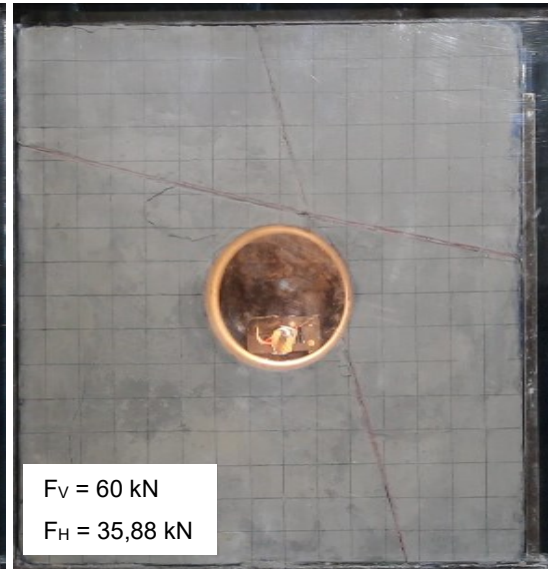
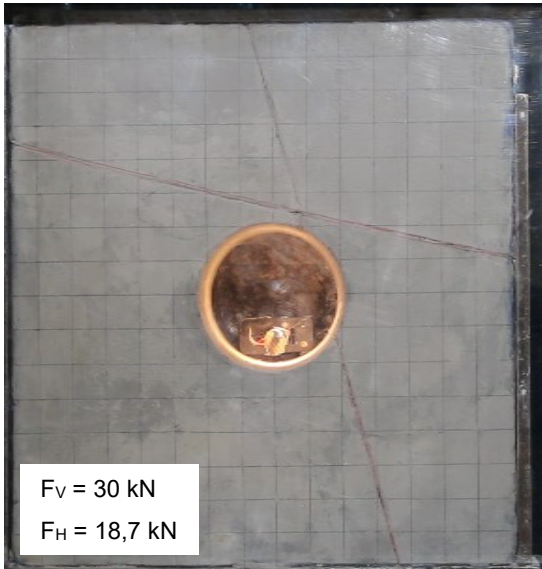
Kraft- und Verschiebungsdaten

Verformung horizontal [mm]	Kraft horizontal [kN]	Verformung vertikal [mm]	Kraft vertikal [kN]	K_0 [-]
-0.28	5.37	-0.97	10.18	0.53
-0.55	18.73	-2.08	30.02	0.62
-0.82	29.37	-3.46	50.10	0.59
-1.01	35.88	-4.68	60.01	0.60
-1.40	45.14	-8.97	80.10	0.56
-1.99	62.85	-11.56	100.06	0.63
-2.56	72.34	-14.10	120.01	0.60
-3.11	82.05	-16.89	140.25	0.59
-3.92	97.25	-19.64	160.20	0.61
-4.67	107.96	-21.80	180.89	0.60
-5.40	119.93	-24.30	200.68	0.60
-5.96	120.14	-26.94	220.14	0.55

Versuchsablauf

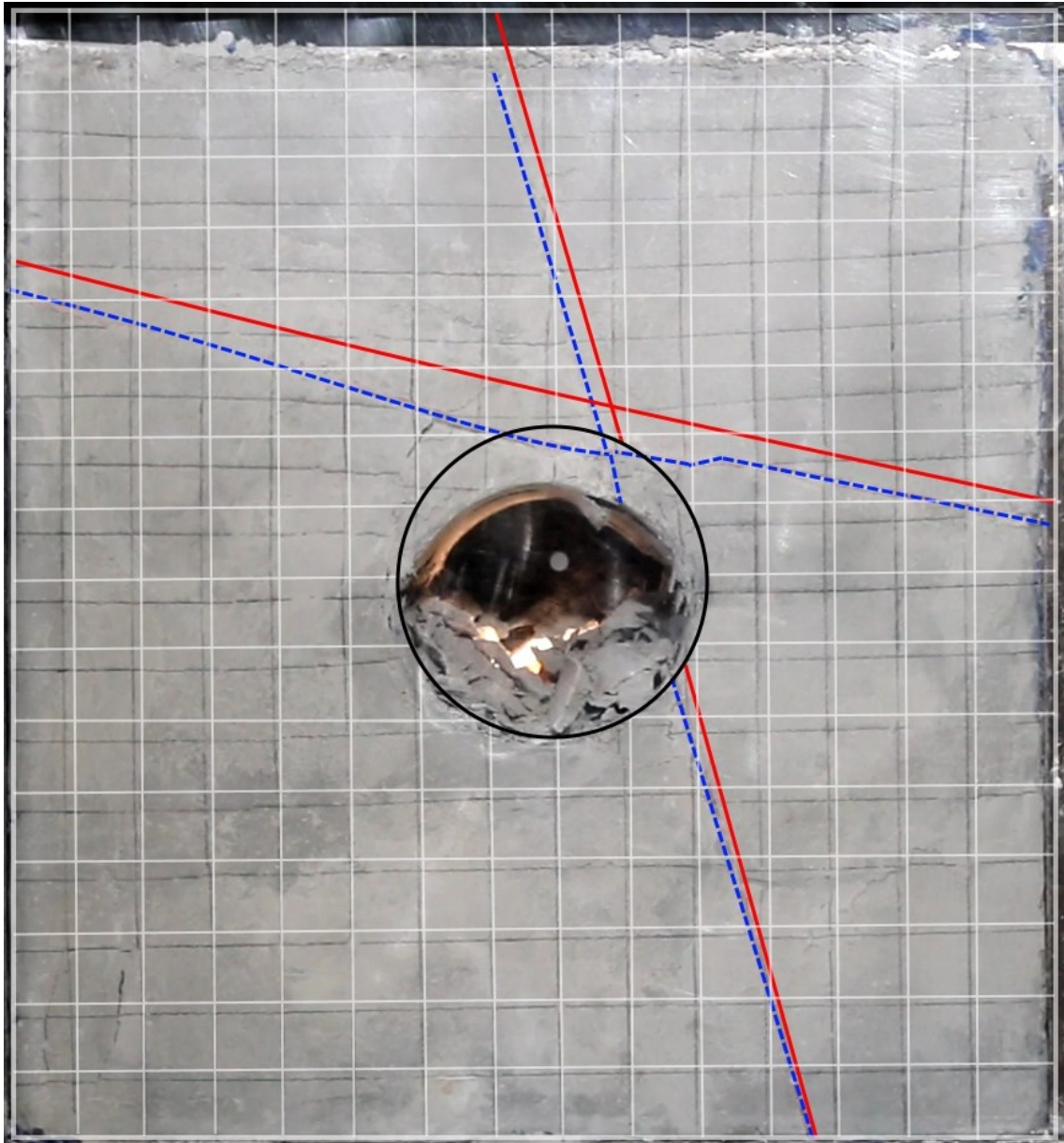


Modellversuch 8



Modellversuch 8

Verschiebungsbild



Harnischfläche vor Belastung



Harnischfläche nach Belastung

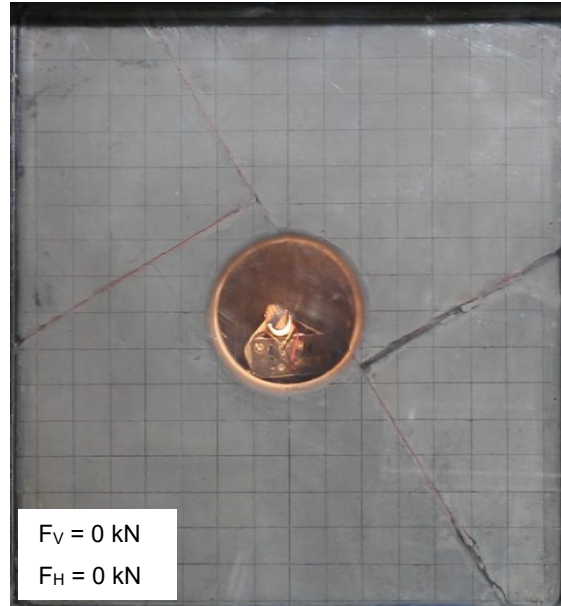
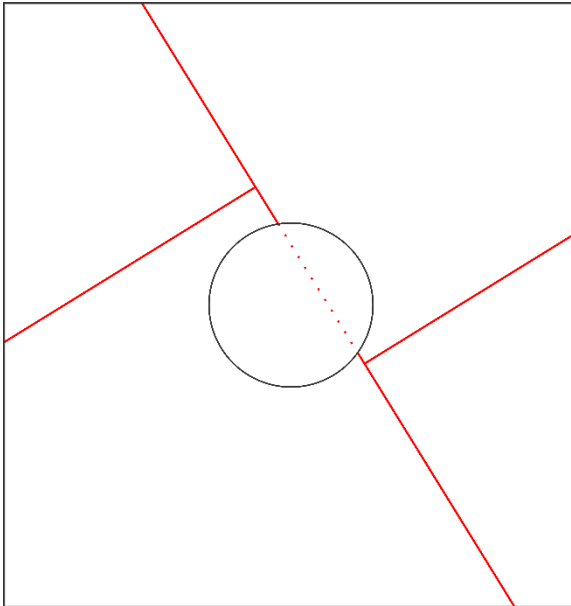


Geometrie des Hohlraumes vor Belastung

Modellversuch 9

Modellparameter		
Material	1:7:2:0,011	[A:SM:W:FM]
Festigkeit	0,64	[MPa]
K_0	0,5	[-]
Raster	2,5	[cm]
Modellbreite	38,5	[cm]
Modellhöhe	40,5	[cm]
Modelltiefe	20	[cm]
Tunnelgeometrie	11	[cm]
Tunnelachse	000/00	[°]
Trennflächen	2	[Stk.]
Harnisch 1 (rot)	090/58	[°]
Harnisch 2 (rot)	270/32	[°]

Modellgeometrie



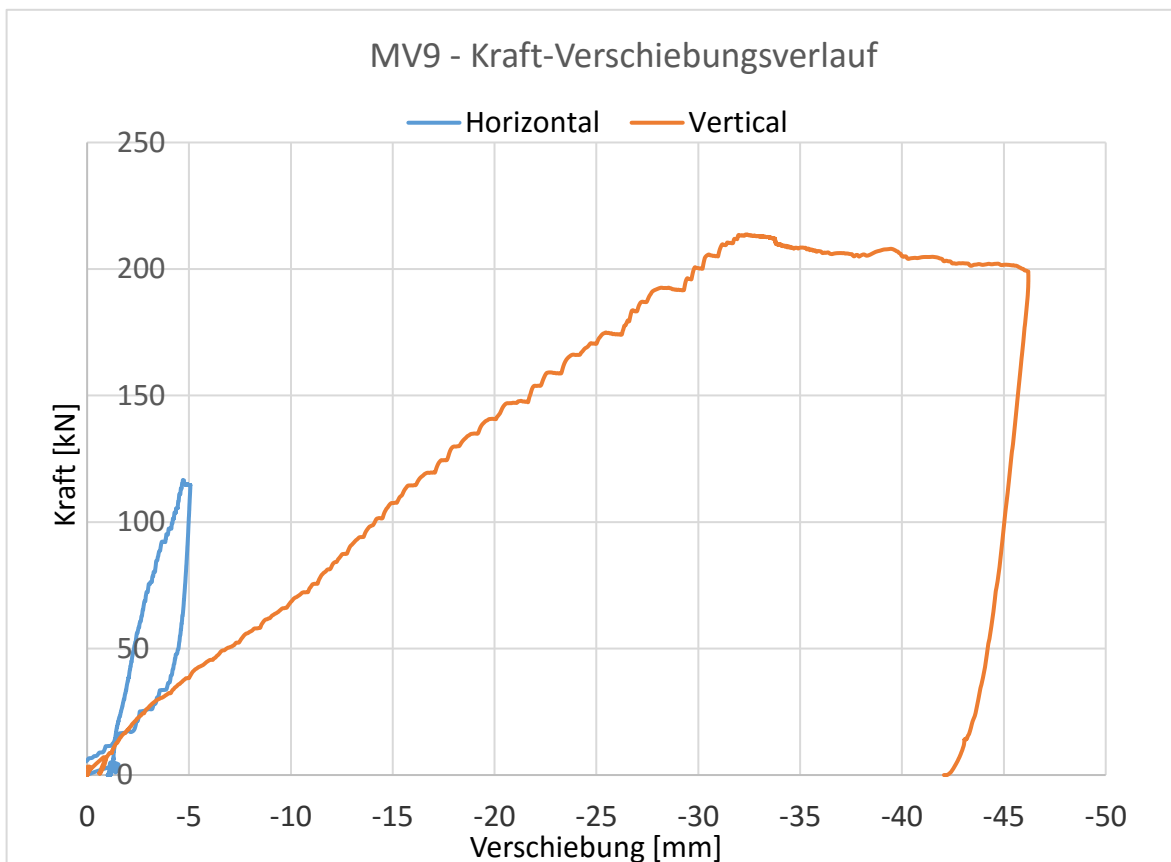
$F_V = 0 \text{ kN}$

$F_H = 0 \text{ kN}$

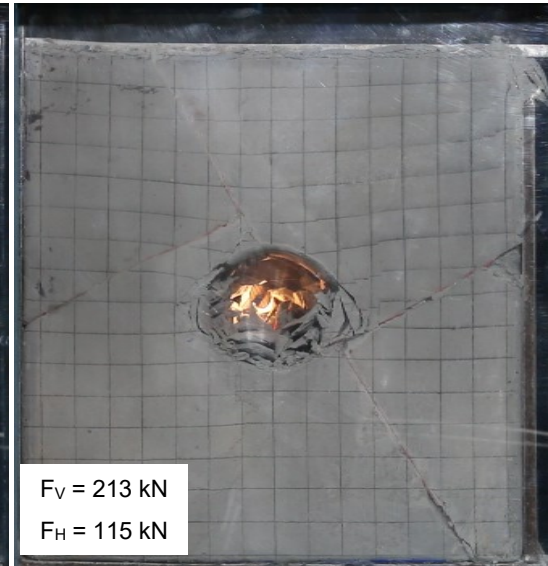
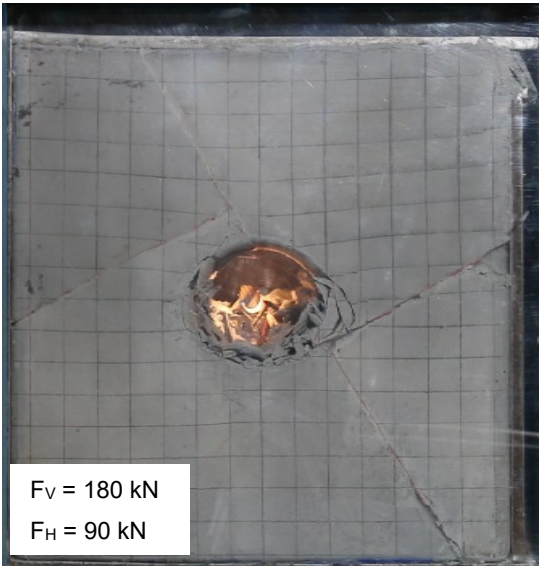
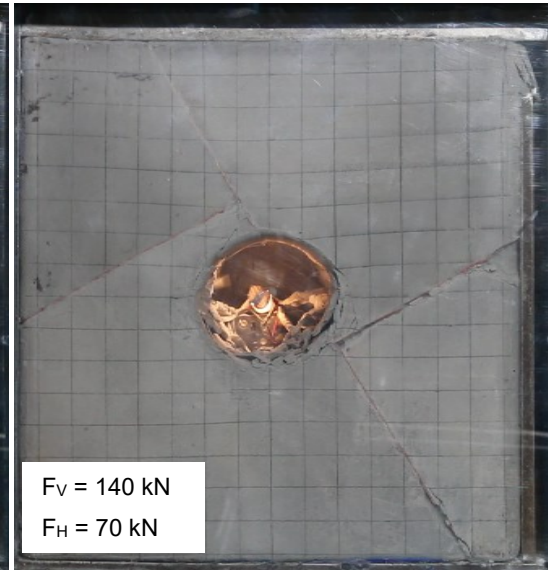
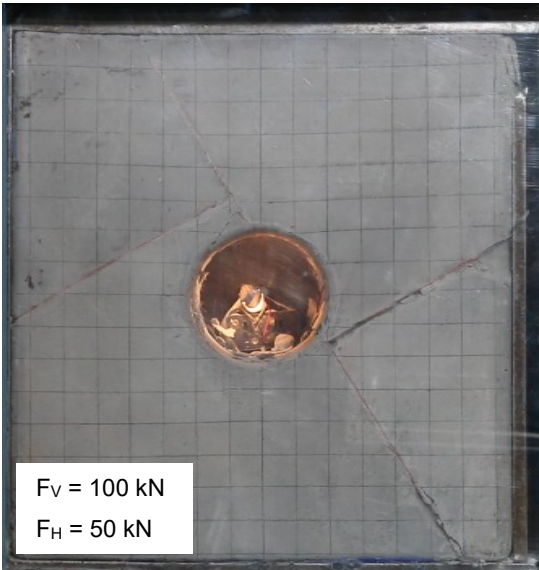
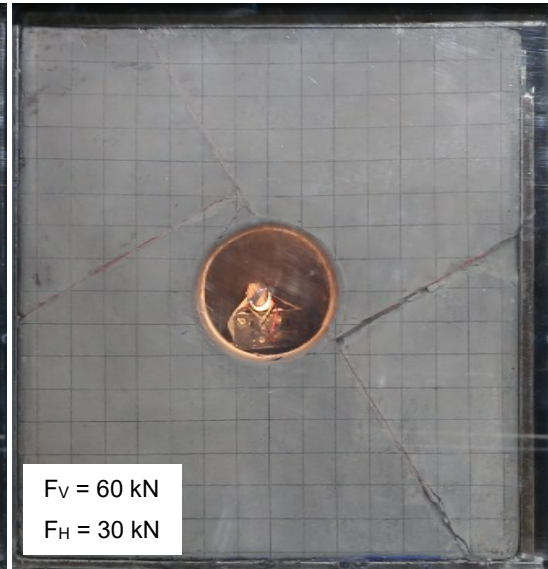
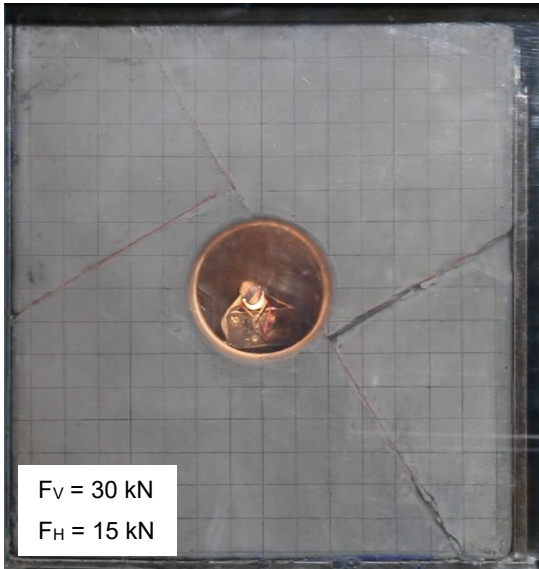
Kraft- und Verschiebungsdaten

Verformung horizontal [mm]	Kraft horizontal [kN]	Verformung vertikal [mm]	Kraft vertikal [kN]	K_0 [-]
-1.29	5.54	-1.27	10.21	0.54
-1.39	14.85	-3.52	30.03	0.49
-1.68	25.70	-6.87	50.12	0.51
-1.83	30.27	-8.61	60.07	0.50
-2.07	40.43	-11.65	80.10	0.50
-2.35	51.90	-14.14	100.21	0.52
-2.64	61.10	-17.10	120.23	0.51
-2.92	72.37	-19.64	140.19	0.52
-3.34	80.57	-23.30	159.45	0.51
-3.91	95.18	-26.65	180.83	0.53
-4.21	101.26	-29.80	200.29	0.51
-4.56	110.94	-32.25	213.16	0.52

Versuchsablauf

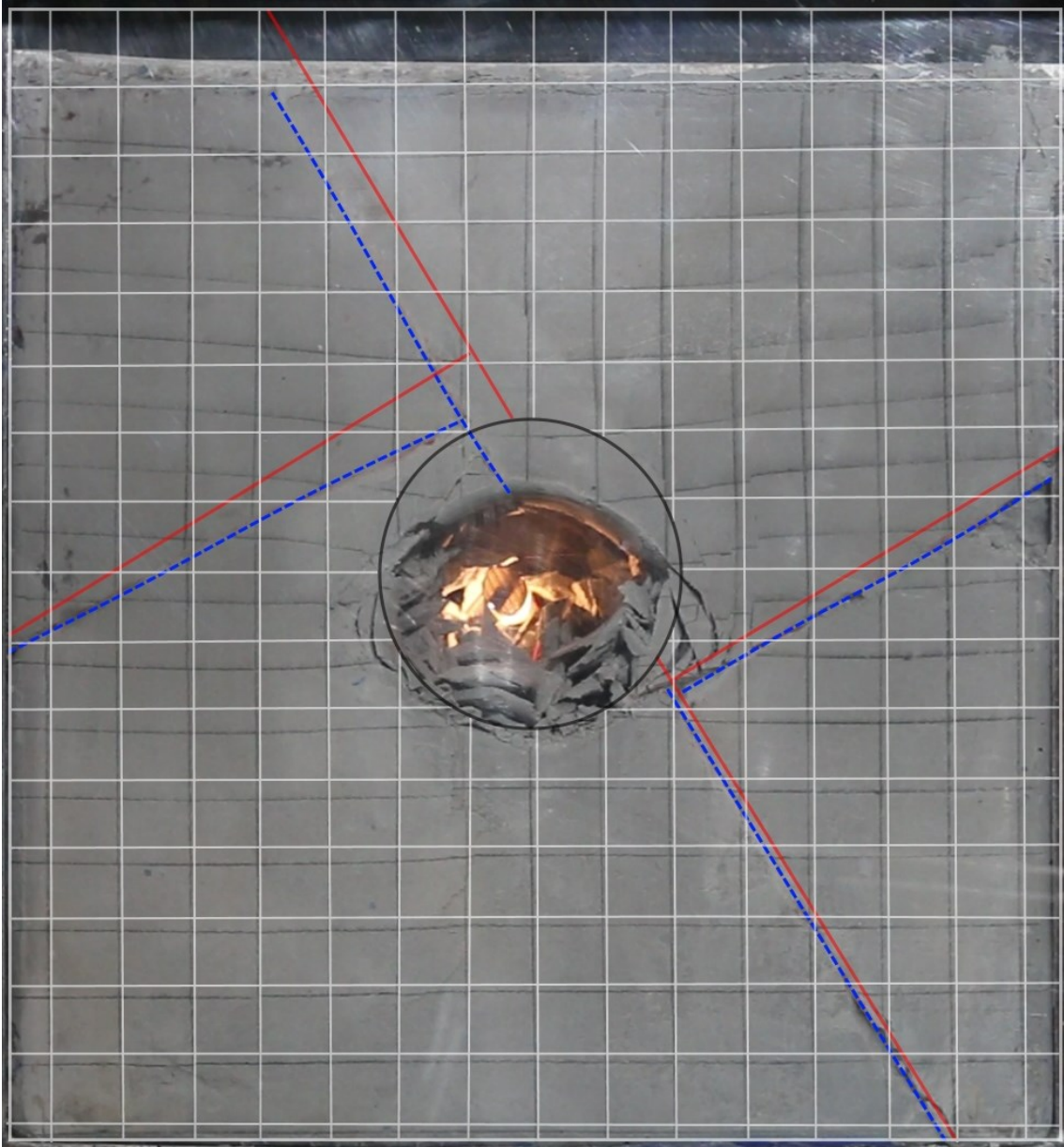





Modellversuch 9



Modellversuch 9

Verschiebungsbild

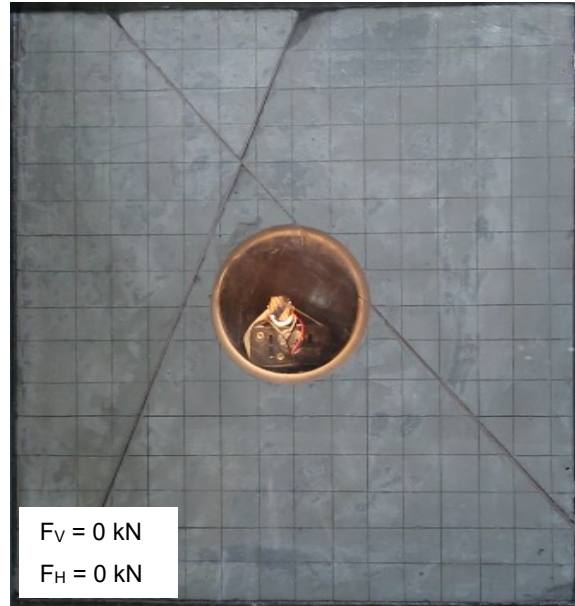
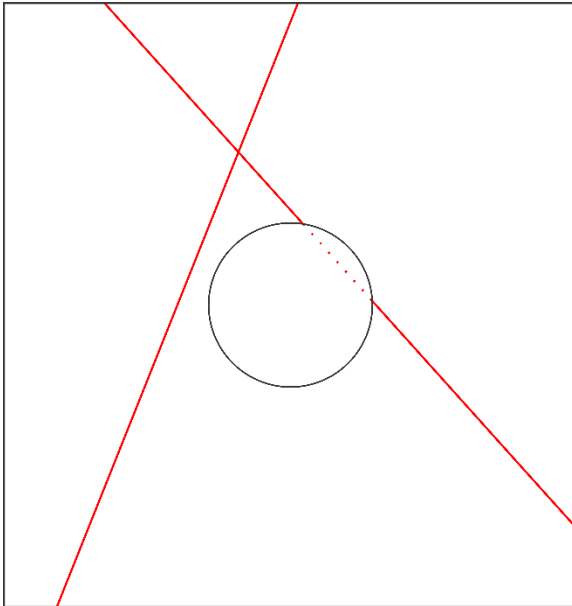


-  Harnischfläche vor Belastung
-  Harnischfläche nach Belastung
-  Geometrie des Hohlraumes vor Belastung

Modellversuch 10

Modellparameter		
Material	1:7:2:0,011	[A:SM:W:FM]
Festigkeit	0,62	[MPa]
K_0	0,6	[-]
Raster	2,5	[cm]
Modellbreite	38,5	[cm]
Modellhöhe	40,5	[cm]
Modelltiefe	20	[cm]
Tunnelgeometrie	Kreisprofil, 11cm	[-]
Tunnelachse	000/00	[°]
Trennflächen	2	[Stk.]
Harnisch (rote Linie)	090/48	[°]
Harnisch (rote Linie)	270/68	[°]

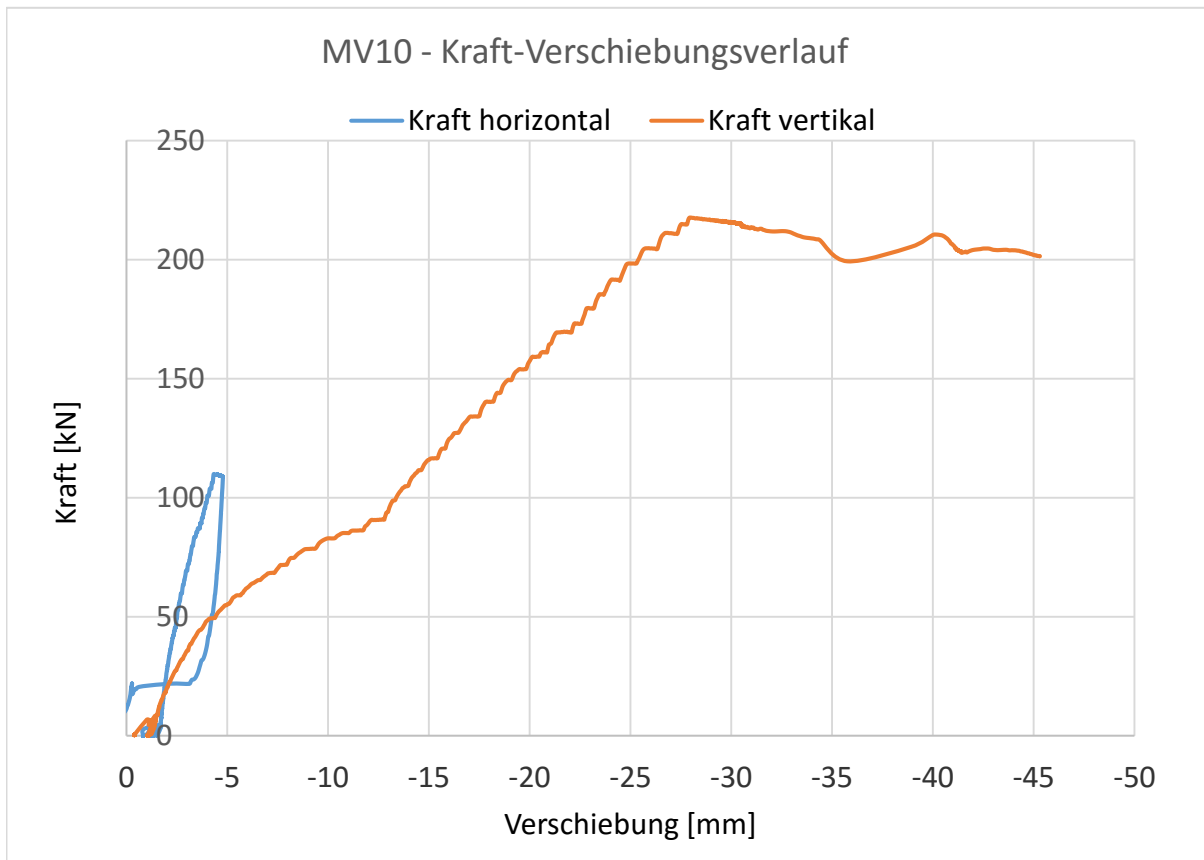
Modellgeometrie



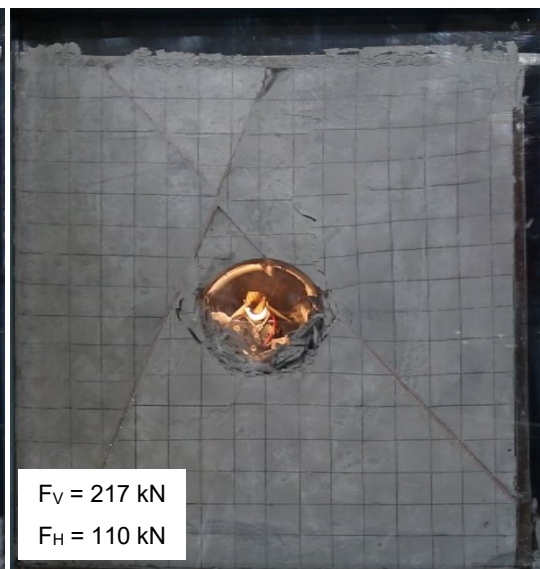
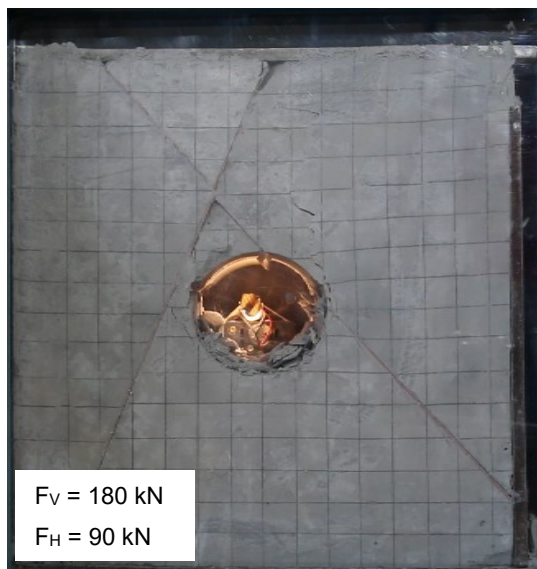
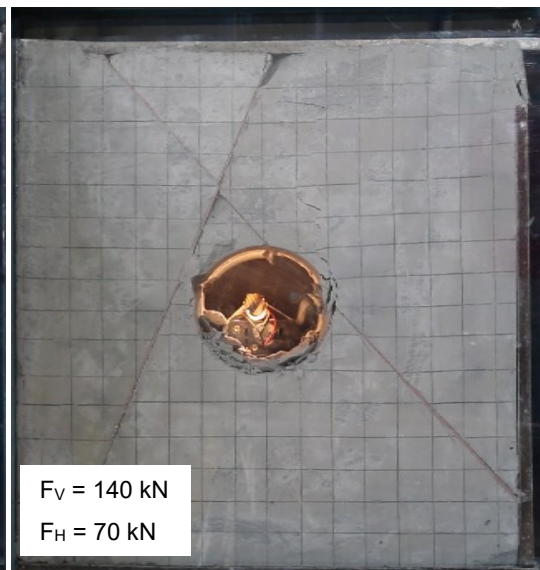
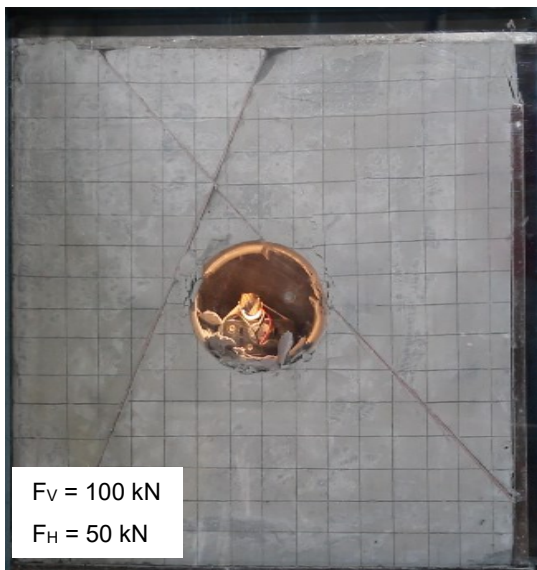
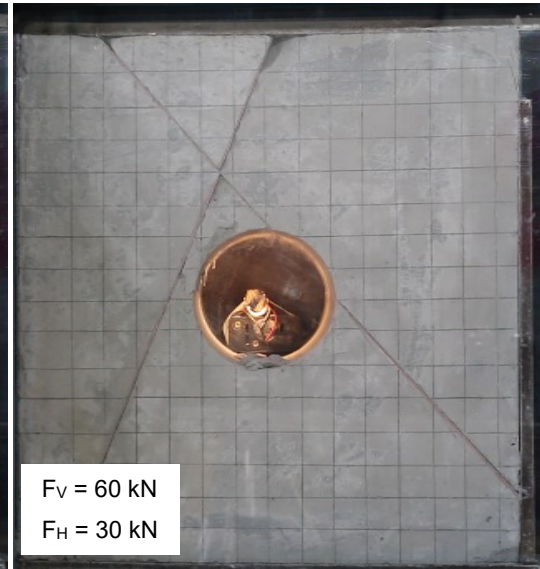
Kraft- und Verschiebungsdaten

Verformung horizontal [mm]	Kraft horizontal [kN]	Verformung vertikal [mm]	Kraft vertikal [kN]	K_0 [-]
-1.70	5.30	-1.56	10.08	0.53
-1.82	15.07	-2.61	30.09	0.50
-1.97	25.12	-4.44	50.35	0.50
-2.07	30.37	-5.78	60.04	0.51
-2.27	40.15	-9.51	80.26	0.50
-2.51	50.67	-13.40	100.32	0.51
-2.79	62.35	-15.61	120.22	0.52
-3.05	72.09	-17.79	140.01	0.51
-3.41	83.37	-20.52	160.02	0.52
-3.79	91.82	-23.23	180.74	0.51
-3.99	98.48	-25.43	200.56	0.49
-4.35	109.90	-28.06	217.52	0.51

Versuchsablauf

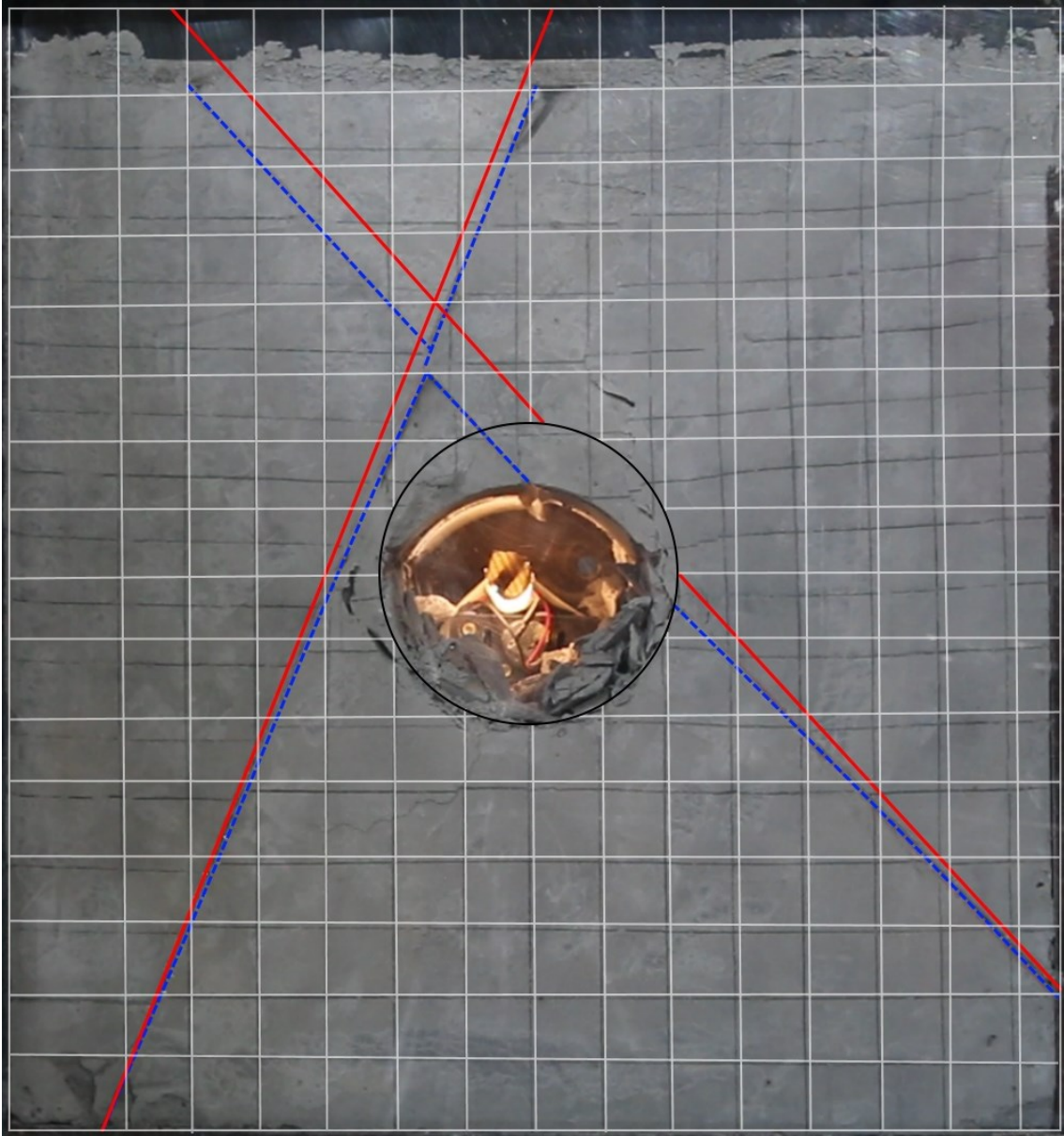





Modellversuch 10



Modellversuch 10

Verschiebungsbild

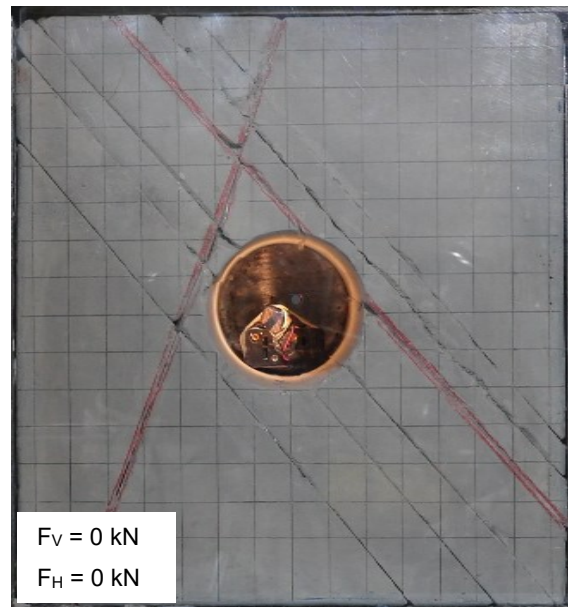
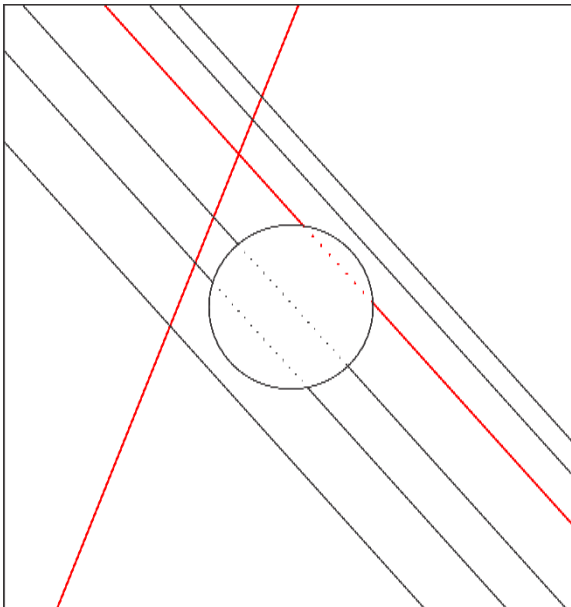


-  Harnischfläche vor Belastung
-  Harnischfläche nach Belastung
-  Geometrie des Hohlraumes vor Belastung

Modellversuch 11

Modellparameter		
Material	1:7:2:0,011	[A:SM:W:FM]
Festigkeit	0,65	[MPa]
K_0	0,5	[-]
Raster	2,5	[cm]
Modellbreite	38,5	[cm]
Modellhöhe	40,5	[cm]
Modelltiefe	20	[cm]
Tunnelgeometrie	11	[cm]
Tunnelachse	000/00	[°]
Trennflächen	8	[Stk.]
Harnisch (rot)	090/48	[°]
Harnisch (rot)	270/68	[°]
Schieferung	090/48	[°]

Modellgeometrie

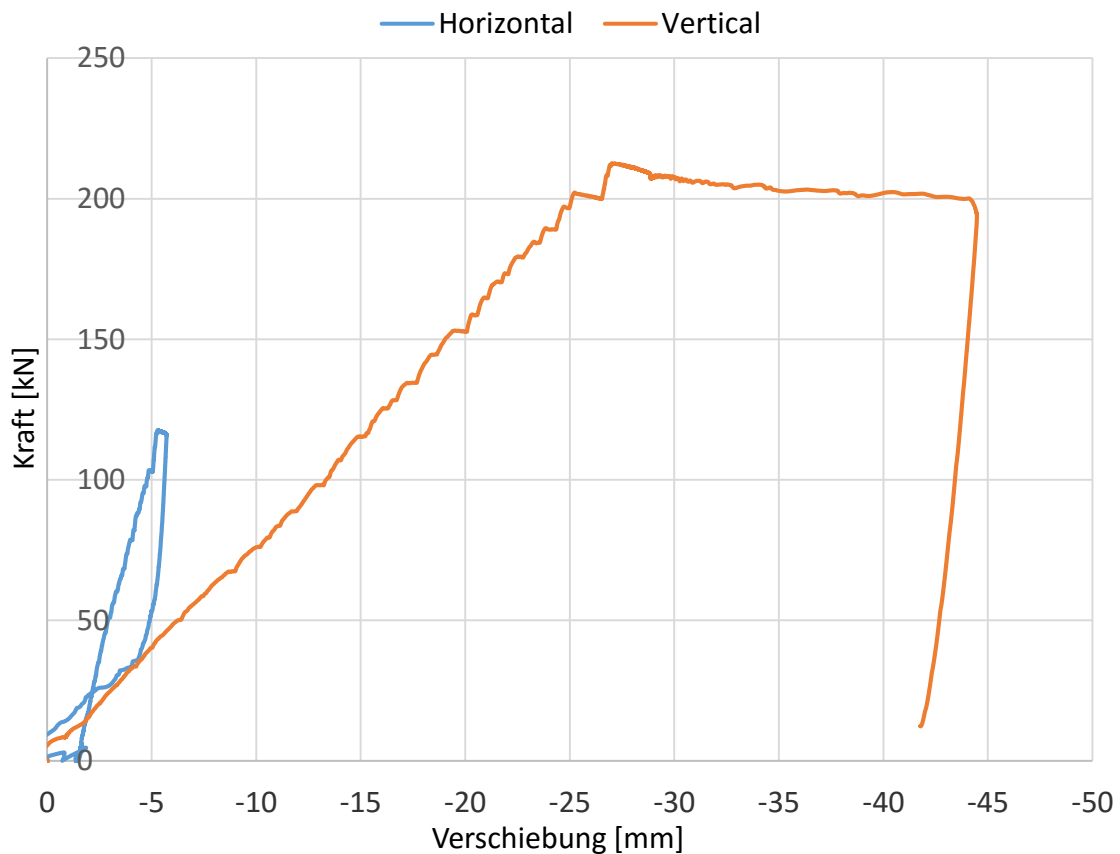


Kraft- und Verschiebungsdaten

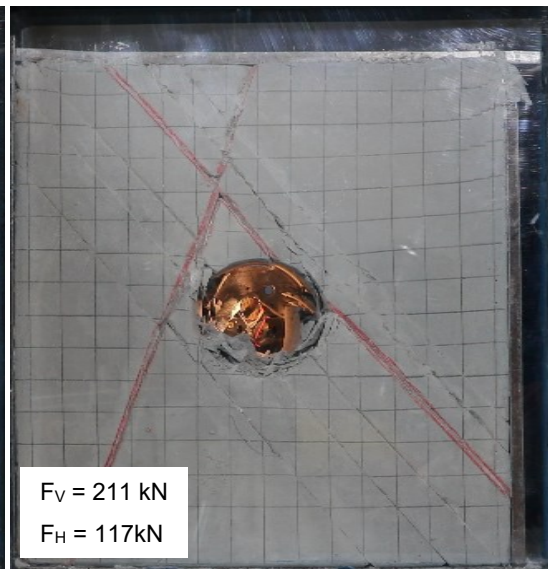
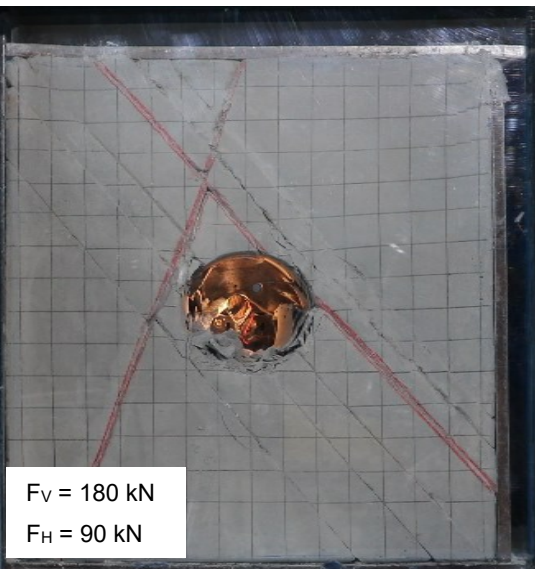
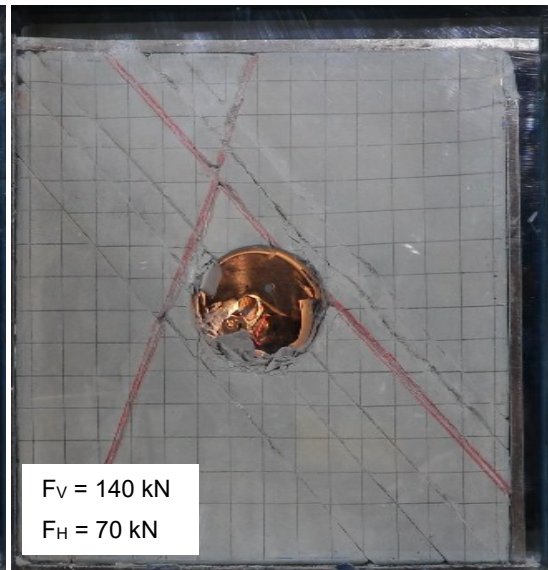
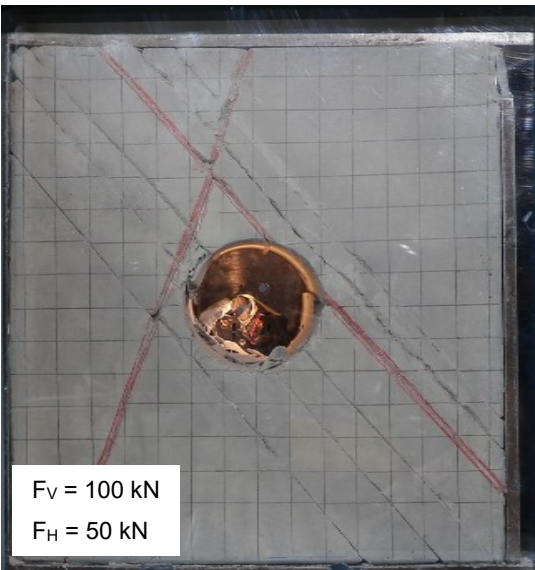
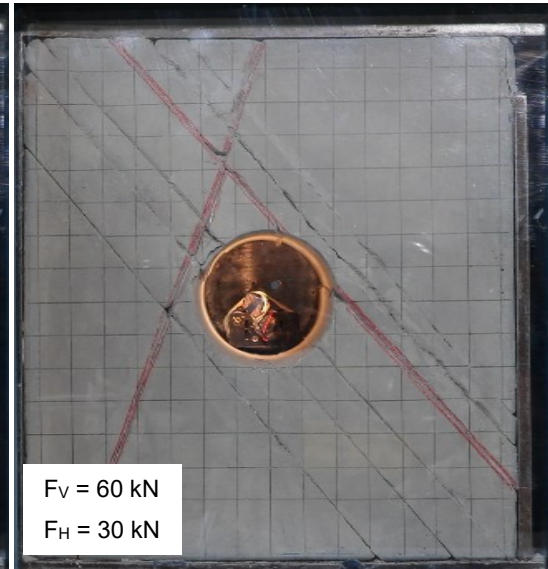
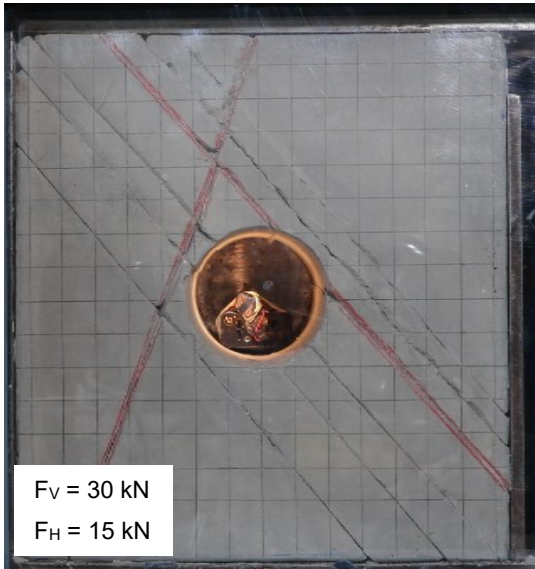
Verformung horizontal [mm]	Kraft horizontal [kN]	Verformung vertikal [mm]	Kraft vertikal [kN]	K_0 [-]
-1.64	5.38	-1.05	10.00	0.54
-1.93	16.57	-3.70	30.09	0.55
-2.19	25.93	-6.26	50.03	0.52
-2.34	30.32	-7.63	60.02	0.51
-2.64	41.45	-10.70	80.54	0.51
-3.04	52.21	-13.34	100.01	0.52
-3.42	62.81	-15.53	120.28	0.52
-3.75	71.23	-18.00	140.77	0.51
-4.18	82.83	-20.64	160.20	0.52
-4.50	92.31	-22.83	180.03	0.51
-4.83	101.49	-25.07	199.37	0.51
-5.37	117.38	-27.39	212.12	0.55

Versuchsablauf

MV11 - Kraft-Verschiebungsverlauf

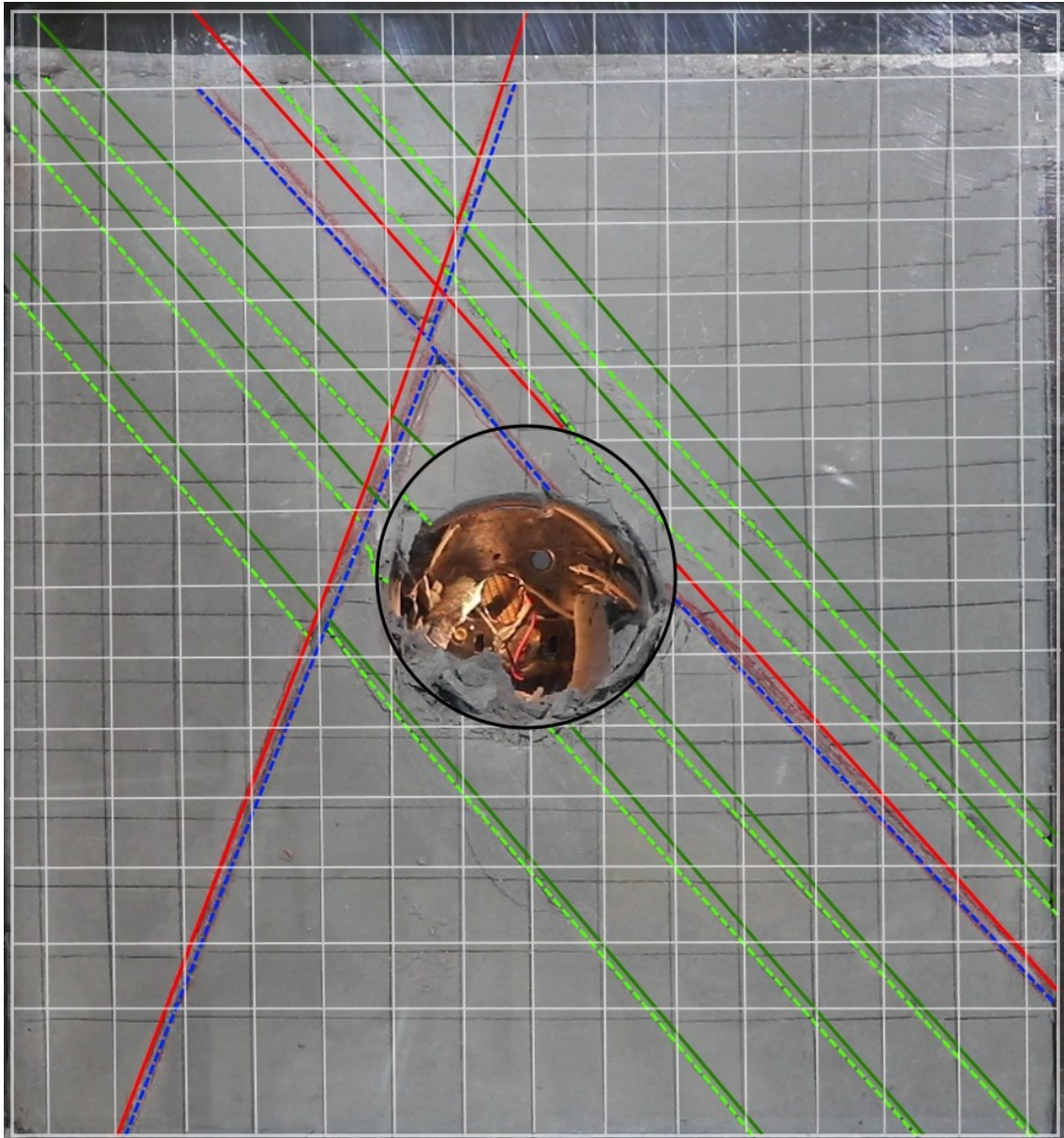


Modellversuch 11



Modellversuch 11

Verschiebungsbild



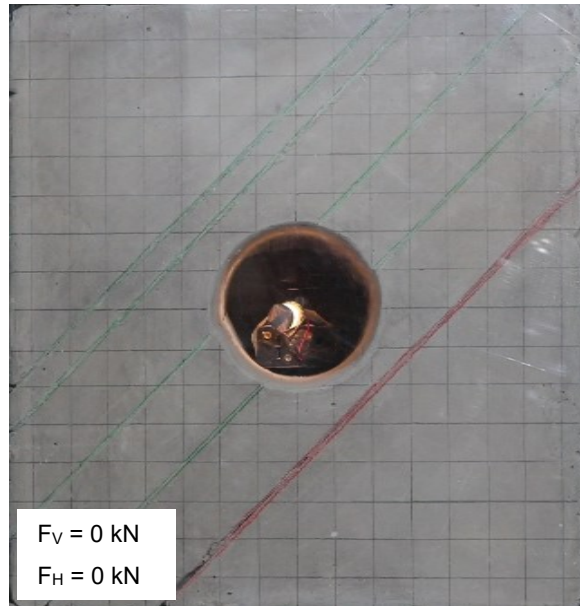
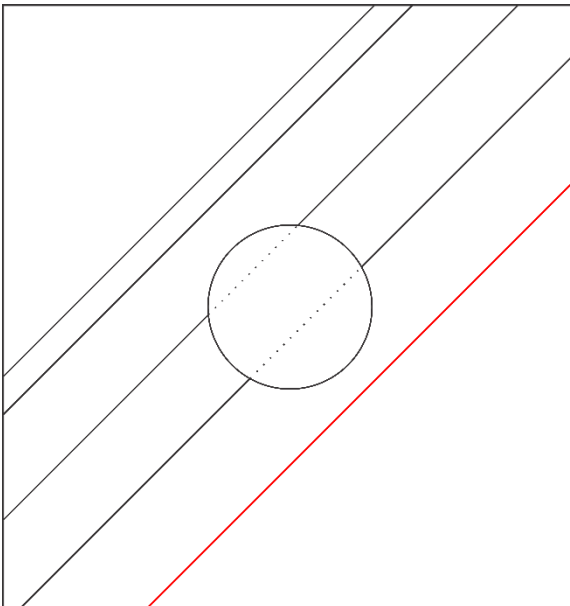
- Harnischfläche vor Belastung
- - - Harnischfläche nach Belastung
- Trennfläche vor Belastung
- - - Trennfläche nach Belastung
- Geometrie des Hohlraumes vor Belastung

Modellversuch 12

Modellparameter

Material	1:7:2:0,011	[A:SM:W:FM]
Festigkeit	0,69	[MPa]
K_0	2,0	[-]
Raster	2,5	[cm]
Modellbreite	38,5	[cm]
Modellhöhe	40,5	[cm]
Modelltiefe	20	[cm]
Tunnelgeometrie	11	[cm]
Trennflächen	5	[Stk.]
Tunnelachse	000/00	[°]
Harnisch (rot)	270/45	[°]
Trennflächen	270/45	[°]

Modellgeometrie

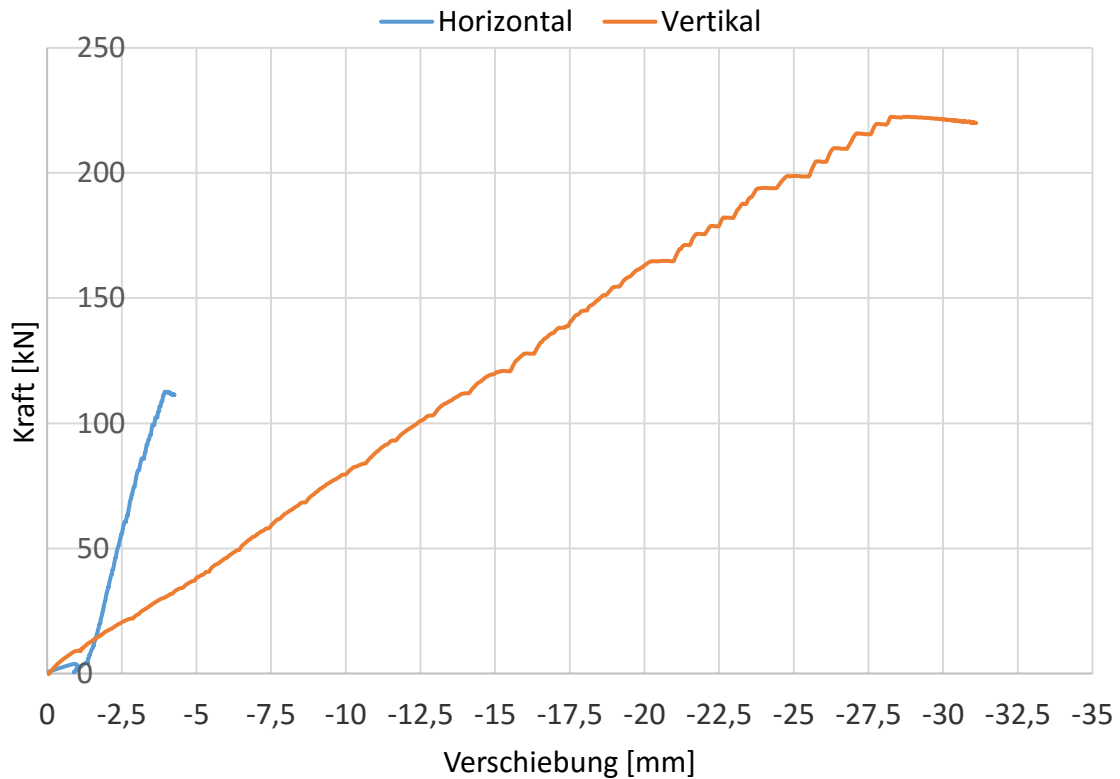


Kraft- und Verschiebungsdaten

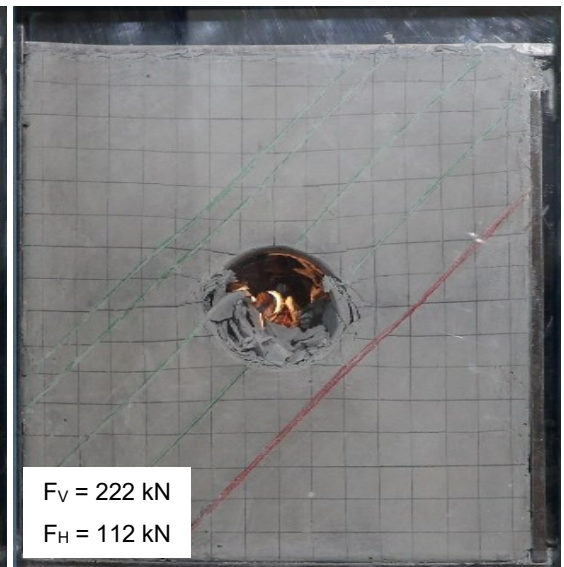
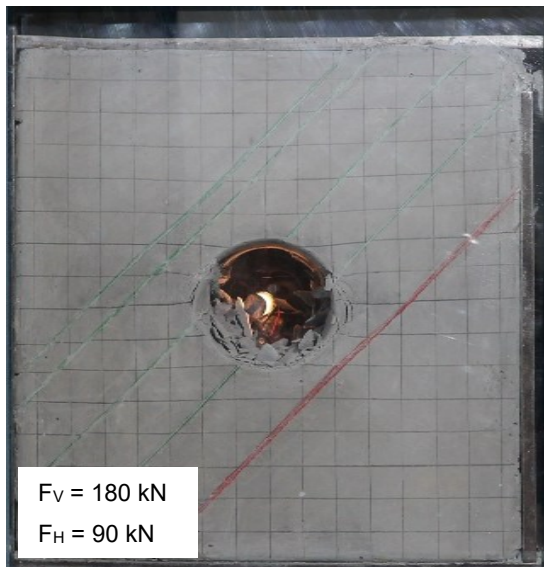
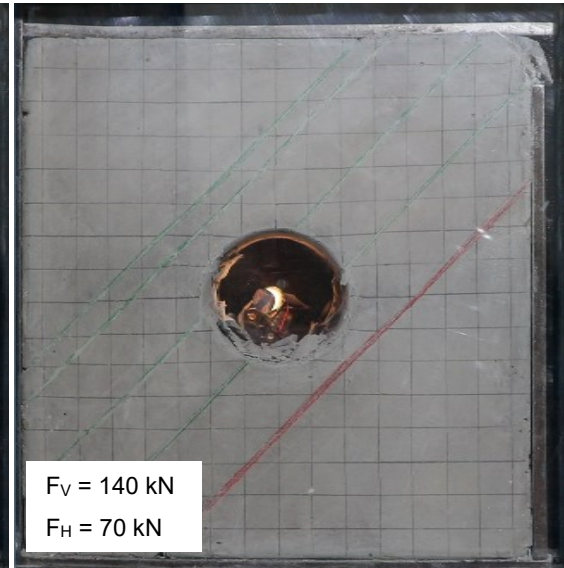
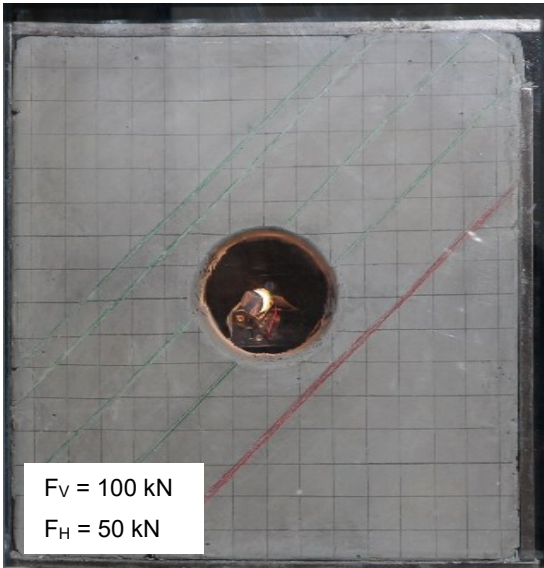
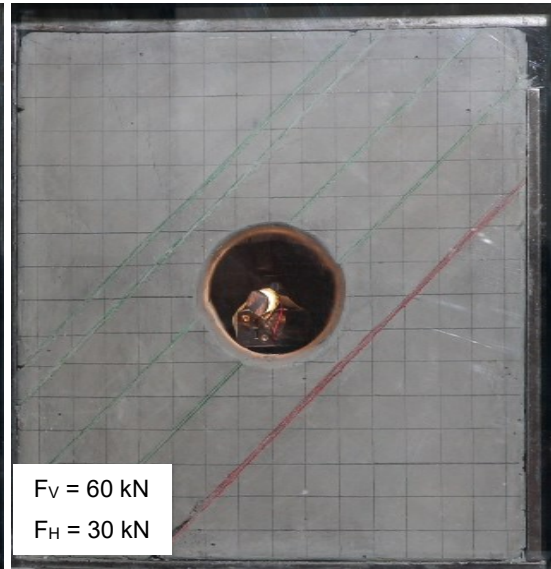
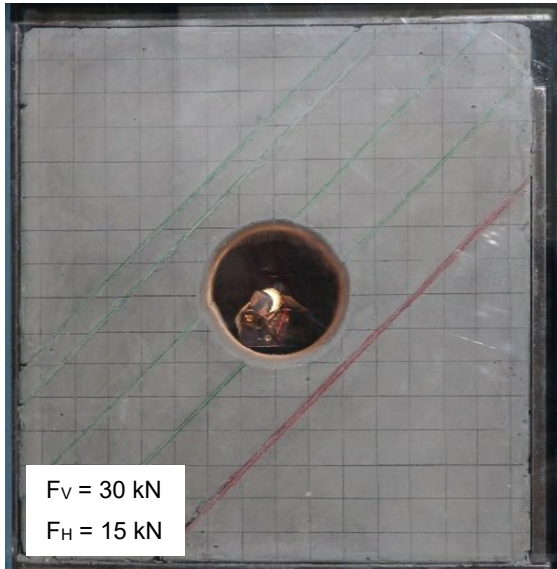
Verformung horizontal [mm]	Kraft horizontal [kN]	Verformung vertikal [mm]	Kraft vertikal [kN]	K_0 [-]
-1.37	5.20	-1.18	10.04	0.52
-1.66	15.15	-3.89	30.09	0.50
-1.88	25.84	-6.48	50.31	0.51
-1.98	31.33	-7.59	60.17	0.52
-2.17	39.74	-10.04	80.00	0.50
-2.38	50.52	-12.43	100.38	0.50
-2.60	60.67	-15.00	120.08	0.51
-2.85	71.48	-17.51	140.50	0.51
-3.10	82.59	-19.65	160.19	0.52
-3.42	93.70	-22.53	179.93	0.52
-3.69	102.33	-25.59	200.98	0.51
-3.99	112.49	-29.03	222.37	0.51

Versuchsablauf

MV12 - Kraft-Verschiebungverlauf

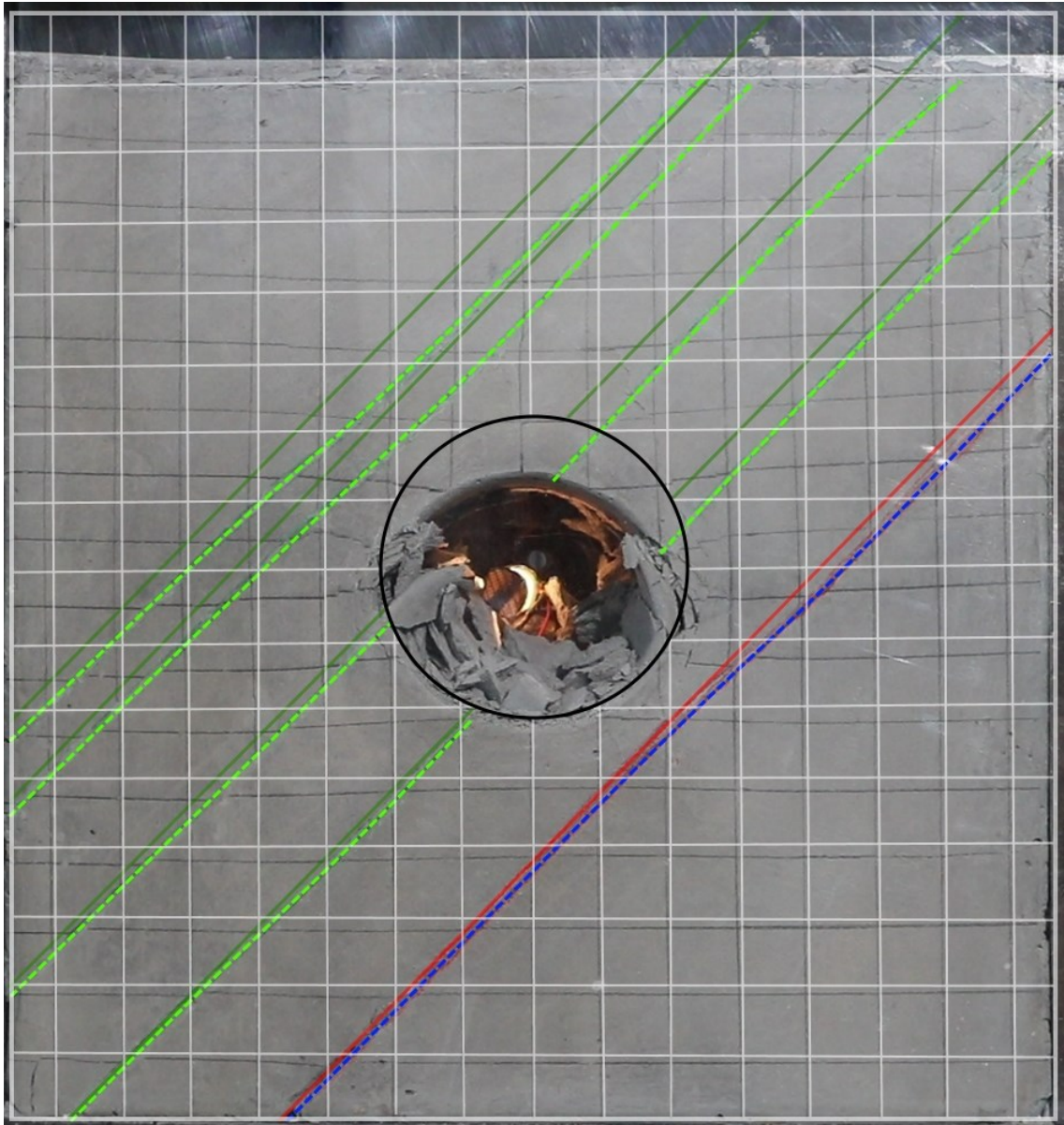







Modellversuch 12



Modellversuch 12

Verschiebungsbild



-  Harnischfläche vor Belastung
-  Harnischfläche nach Belastung
-  Trennfläche vor belastung
-  Trennfläche nach Belastung
-  Geometrie des Hohlraumes vor Belastung